ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

"ESTUDIO PARAMÉTRICO DEL PROCESO DE COLADO CENTRÍFUGO HORIZONTAL PARA LA OBTENCIÓN DE TUBOS DE ALUMINIO SIN COSTURA"

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

MARIO DAVID GÓMEZ CHÁVEZ
mario.gomez@epn.edu.ec

HENRY ESTUARDO JAMI SANGO
henry.jami@epn.edu.ec

DIRECTOR: ING. FAUSTO HERNÁN OVIEDO FIERRO, M.Sc.
fausto.oviedo@epn.edu.ec

CODIRECTOR: ING. ÓSCAR EFRAÍN SOTOMAYOR GÁLVEZ, M.Sc.
oscar.sotomayor@epn.edu.ec

Quito, Diciembre 2017

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue desarrollado por **MARIO DAVID GÓMEZ CHÁVEZ** y **HENRY ESTUARDO JAMI SANGO**, bajo nuestra supervisión.

_____

Ing. Fausto Oviedo, M.Sc.
DIRECTOR DEL PROYECTO

_____

Ing. Óscar Sotomayor, M.Sc.
CODIRECTOR DEL PROYECTO

DECLARACIÓN

Nosotros, **Mario David Gómez Chávez** y **Henry Estuardo Jami Sango**, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedemos nuestros 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.

_____	_____
Mario David Gómez Chávez	Henry Estuardo Jami Sango

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de titulación a mis padres; que con su apoyo y esfuerzo me han permitido cumplir este gran objetivo.

Mario

El presente trabajo va dedicado para mi familia, a mis padres que con su apoyo y tolerancia me han ayudado con mi desarrollo personal, a mi hermano que me comparte su experiencia y conocimiento, y a toda mi familia que se apoya mutuamente para salir adelante.

Henry

AGRADECIMIENTO

Agradecemos a los ingenieros Fausto Oviedo y Óscar Sotomayor por su colaboración en el desarrollo de este proyecto de titulación.

A Don Fabián Peñaloza, Erick Córdova, Santiago Camacho, Santiago Suárez, Marlon Ordoñez, Juan Núñez y Víctor por la ayuda prestada en la parte práctica de este proyecto y en la utilización de los equipos del Laboratorio de Fundición de la Escuela Politécnica Nacional.

A Jorge Macas y al Centro de Investigación y Recuperación de Turbinas Hidráulicas y Partes Industriales (CIRT) por la colaboración brindada en la prestación de los equipos de medición de rugosidad.

Mario y Henry

ÍNDICE

CERTIFICACIÓN i
DECLARACIÓN ii
DEDICATORIA iii
AGRADECIMIENTO iv
ÍNDICE v
INTRODUCCIÓN 1
Objetivo general 2
Objetivos específicos 2
Alcance 2
1. MARCO TEÓRICO 3
1.1. Fundición en molde permanente 3
1.1.1. Moldes metálicos 3
1.1.2. Precalentamiento del molde permanente 4
1.1.3. Temperatura de operación del molde permanente 4
1.1.4. Temperatura de colado 5
1.1.5. Acabado superficial 6
1.2. Tipos de Fundición en moldes permanentes 7
1.2.1. Fundición centrífuga 7
1.3. Fundición centrífuga horizontal 10
1.3.1. Moldes para fundición centrífuga horizontal 10
1.3.2. Parámetros en la fundición centrífuga horizontal 11
1.3.3. Solidificación 13
1.3.4. Ventajas de la fundición centrífuga 13
1.3.5. Defectos en la fundición centrífuga 14
1.3.6. Aplicaciones 15
1.3.7. Investigaciones realizadas a la fundición centrífuga 16
1.4. Tubos sin costura 17
1.4.1. Aplicación de los tubos sin costura de aluminio 18
1.5. Aluminio y sus aleaciones 19
1.5.1. Nomenclatura 20
2. METODOLOGÍA 22
2.1. Materiales y equipos utilizados para la obtención de los tubos 23
2.1.1. Material para los tubos 23
2.1.2. Fundente 24
2.1.3. Desgasificante 26

2.1.4. Recubrimiento para el molde 28
2.1.5. Horno de crisol a gas 28
2.1.6. Termocuplas y multímetro 29
2.1.7. Máquina de colado centrífugo horizontal 31
2.2. Preparación de la máquina de colado centrífugo horizontal 32
2.2.1. Carcasas de los rodamientos 32
2.2.2. Tapas de entrada y salida del molde 34
2.2.3. Extensiones para modificar la longitud del tubo 35
2.2.4. Motor eléctrico 36
2.2.5. Variador de frecuencia 37
2.2.6. Panel de control 38
2.2.7. Sistema de transmisión de movimiento 38
2.2.8. Otras modificaciones 39
2.3. Protocolo experimental para la obtención de los tubos de aluminio sin costura 41
2.3.1. Parámetros de referencia 41
2.3.2. Procedimiento de obtención de los tubos de aluminio sin costura 44
2.4. Prueba de cantidad de porosidad interna 45
2.4.1. Equipos utilizados para la prueba de porosidad 45
2.4.2. Método de densidad relativa 46
2.4.3. Procedimiento para prueba de porosidad 47
2.5. Medición de rugosidad 48
2.5.1. Textura superficial 48
2.5.2. Parámetros de rugosidad 51
2.5.3. Rugosidad media aritmética (Ra) 52
2.5.4. Medición de rugosidad en los tubos de aluminio sin costura 54
2.6. Ensayo de Tracción 59
2.6.1. Generalidades 59
2.6.2. Equipo para el ensayo de tracción 60
2.6.3. Probetas para el ensayo de tracción 61
2.6.4. Procedimiento para el ensayo de tracción 62
2.7. Espectrometría 63
2.7.1. Análisis de espectrometría por chispa 63
2.7.2. Espectrómetro 63
2.7.3. Probetas para análisis de espectrometría 64
2.7.4. Procedimiento para el análisis de espectrometría por chispa 65
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS 66
3.1. Fundición de prueba 66

3.1.1. Resultados 66
3.1.2. Análisis de la fundición de prueba 68
3.2. Proceso de obtención de los tubos destinados al estudio paramétrico 69
3.2.1. Parámetros reales del proceso de colado centrífugo 69
3.2.2. Tiempo del proceso de colado centrífugo 69
3.2.3. Análisis del proceso de obtención de los tubos destinados al estudio paramétrico 70
3.3. Inspección visual de los tubos de aluminio sin costura 73
3.3.1. Resultados 73
3.3.2. Análisis de la inspección visual de los tubos de aluminio 81
3.4. Características físicas de los tubos 83
3.4.1. Resultados 83
3.4.2. Análisis de las características físicas de los tubos de aluminio 85
3.5. Porosidad interna 86
3.5.1. Resultados 86
3.5.2. Análisis de la porosidad interna 89
3.6. Medición de la rugosidad superficial 90
3.6.1. Resultados 90
3.6.2. Análisis de la rugosidad superficial 93
3.7. Ensayo de tracción 94
3.7.1. Resultados 94
3.7.2. Análisis del ensayo de tracción 98
3.8. Ensayo de espectrometría 100
3.8.1. Resultados 100
3.8.2. Análisis del ensayo de espectrometría 101
3.9. Evaluación de los tubos de aluminio sin costura 102
3.9.1. Evaluación de rugosidad y defectos superficiales 102
3.9.2. Evaluación de porosidad interna y resistencia a la tracción 103
3.9.3. Evaluación total 104
3.10. Resumen de análisis 105
4. CONCLUSIONES 109
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 113
ANEXOS 116

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Tipos de fundición en molde permanente. 7
Figura 1.2. Arreglo para la fundición centrífuga real. 8
Figura 1.3. Fundición semicentrífuga. 9
Figura 1.4. Fundición centrifugada. 10
Figura 1.5. Ciclo de rotación en fundición centrífuga horizontal. 12
Figura 1.6. Aplicaciones de la fundición centrífuga horizontal en la industria del hierro y el acero. 15
Figura 1.7. Aplicación de tubos sin costura de aluminio en la industria eléctrica. 18
Figura 1.8. Tubo sin costura de aluminio utilizado como camisa en un cilindro neumático. 19
Figura 2.1. Chatarra de aluminio para la elaboración de tubos. 23
Figura 2.2. Fundente ALUFUNDEX EXTRA. 25
Figura 2.3. Pastillas desgasificantes APARTAGAS. 27
Figura 2.4. Grafito en polvo utilizado para el molde. 28
Figura 2.5. Horno de crisol a gas utilizado para fundir la chatarra de aluminio. 29
Figura 2.6. Partes de una termocupla industrial. 30
Figura 2.7. Multímetro y termocuplas utilizados para medir la temperatura. 31
Figura 2.8. Máquina de colado centrífugo del laboratorio de fundición de la EPN luego de las modificaciones realizadas 32
Figura 2.9. Estado inicial de las carcasas de los rodamientos. 33
Figura 2.10. Carcasas de los rodamientos modificadas. 33
Figura 2.11. Tapas iniciales del molde. 34
Figura 2.12. Nuevas tapas del molde. 35
Figura 2.13. Extensiones de la tapa de salida del molde para modificar la longitud del tubo. 36
Figura 2.14. Motor monofásico de la máquina de colado centrífugo horizontal. 36
Figura 2.15. Motor trifásico de la máquina de colado centrífugo horizontal. 37
Figura 2.16. Variador de frecuencia implementado en la máquina de colado centrífugo horizontal. 37
Figura 2.17. Panel de control de la máquina de colado centrífugo horizontal. 38
Figura 2.18. Adecuaciones en el sistema de transmisión. 39
Figura 2.19. Guía para embudo retirada de la puerta. 39
Figura 2.20. Guía para embudo unida a la puerta mediante pernos. 40
Figura 2.21. Perno con tuerca mariposa para asegurar la puerta. 40
Figura 2.22. Embudo para alimentación de metal líquido. 41

Figura 2.23. Conexión de gas de la hornilla cambiada. 41
Figura 2.24. Diagrama pseudo-binario para aleaciones Al-Mg-Si. 43
Figura 2.25. Equipos utilizados para la prueba de porosidad. 46
Figura 2.26. Representación de superficie ideal plana. 49
Figura 2.27. Representación del Perfil ideal. 49
Figura 2.28. Representación de la Superficie real. 49
Figura 2.29. Representación del Perfil real. 50
Figura 2.30. Perfil de rugosidad. 50
Figura 2.31. Sistema “M” o de la línea media. 51
Figura 2.32. Representación de las longitudes de medición de rugosidad. 51
Figura 2.33. Parámetros Rt, Rp, Rv de un perfil de rugosidad. 52
Figura 2.34. Parámetro Ra en el perfil de rugosidad. 53
Figura 2.35. Centro de Investigación y Recuperación de Turbinas Hidráulicas y Partes Industriales- CIRT. 54
Figura 2.36. Franja extraída del tubo de aluminio para realizar el ensayo de tracción. 55
Figura 2.37. Franja dividida en zonas. 55
Figura 2.38. Medición con rugosímetro INSIZE ISR-C100. 55
Figura 2.39. Rugosímetro INSIZE ISR-S1000B. 58
Figura 2.40. Palpador del rugosímetro ubicado en el interior del molde. 58
Figura 2.41. Parámetros de rugosidad en la pantalla del rugosímetro. 59
Figura 2.42. Máquina Universal de Ensayos Tinius Olsen Super L-120. 60
Figura 2.43. Dimensiones de las probetas del ensayo de tracción para productos tubulares de diámetro grande. 62
Figura 2.44. Probetas para el ensayo de tracción. 62
Figura 2.45. Espectrómetro BRUKER Q2 ION. 63
Figura 2.46. Probetas para el análisis de espectrometría. 65
Figura 3.1. Tubo con fundición incompleta. 67
Figura 3.2. Esquema de medición de temperatura del molde. 68
Figura 3.3. Defecto de la unión del molde y el rodamiento. 72
Figura 3.4. Aberturas alrededor del molde. 72
Figura 3.5. Tubo a 679 RPM. 74
Figura 3.6. Tubo a 901 RPM. 74
Figura 3.7. Tubo a 1000 RPM. 75
Figura 3.8. Tubo a 1097 RPM. 75
Figura 3.9. Tubo a 1192 RPM. 75
Figura 3.10. Tubo con molde a 165°C. 76
Figura 3.11. Tubo con molde a 207°C. 77

Figura 3.12. Tubo con molde a 243°C. 77
Figura 3.13. Tubo con molde a 297°C. 77
Figura 3.14. Tubo con molde a 340°C. 78
Figura 3.15. Tubo con temperatura de colado a 750°C. 79
Figura 3.16. Tubo con temperatura de colado a 774°C. 79
Figura 3.17. Tubo con temperatura de colado a 802°C. 79
Figura 3.18. Tubo con temperatura de colado a 824°C. 80
Figura 3.19. Tubo con temperatura de colado a 852°C. 80
Figura 3.20. Representación del comportamiento de la colada con la vibración. 82
Figura 3.21 Gráfico de diferencia de espesor vs número de tubo. 83
Figura 3.22. Secciones transversales longitudinales de los tubos. 85
Figura 3.23. Gráfico de porosidad vs velocidad de rotación del molde. 87
Figura 3.24. Gráfico de porosidad vs Temperatura de precalentamiento. 88
Figura 3.25. Gráfico de porosidad vs Temperatura de colado. 88
Figura 3.26. Valores de porosidades de todos los tubos. 89
Figura 3.27. Gráfico de rugosidad promedio vs velocidad de rotación del molde. 91
Figura 3.28. Gráfico de rugosidad promedio vs Temperatura de precalentamiento. ... 92
Figura 3.29. Gráfico de rugosidad promedio vs Temperatura de colado 92
Figura 3.30. Valores de rugosidad Ra promedio de todos los tubos. 93
Figura 3.31. Probeta con falla dentro de la marca. 95
Figura 3.32. Probeta con falla fuera de la marca. 96
Figura 3.33. Probeta de ensayo fallido del tubo número 4. 96
Figura 3.34. Gráfico de resistencia a la tracción vs velocidad de rotación del molde. . 97
Figura 3.35. Gráfico de resistencia a la tracción vs Temperatura de precalentamiento del molde. 97
Figura 3.36. Gráfico de resistencia a la tracción vs Temperatura de colado. 98
Figura 3.37. Valores de resistencia a la tracción de todos los tubos. 98
Figura 3.38. Fotos del tubo con mejor acabado superficial. 107
Figura 3.39. Fotos del tubo con alta resistencia mecánica 108

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Temperaturas de colado para metales más comunes utilizados en fundición. 6
Tabla 1.2. Temperatura Liquidus y de Fundición de aleaciones de Aluminio. 20
Tabla 1.3. Nomenclatura del aluminio y sus aleaciones de acuerdo con la Asociación de Aluminio. 21
Tabla 2.1. Cantidad de chatarra de aluminio utilizada en la fabricación de los tubos. 24
Tabla 2.2. Cantidad de fundente utilizado en la fabricación de los tubos. 25
Tabla 2.3. Cantidad de desgasificante utilizado en la fabricación de los tubos. 27
Tabla 2.4. Valores referenciales de los parámetros para la obtención de los tubos de aluminio. 43
Tabla 2.5. Especificaciones técnicas del rugosímetro INSIZE ISR-C100. 56
Tabla 2.6. Especificaciones técnicas del rugosímetro INSIZE ISR-S1000B. 57
Tabla 2.7. Especificaciones técnicas de la máquina universal de ensayos Timius Olsen Super L-120. 61
Tabla 2.8. Especificaciones técnicas del espectrómetro BRUKER Q2 ION. 64
Tabla 3.1 Valores reales de los parámetros del proceso. 69
Tabla 3.2. Tiempos relacionados al proceso de obtención de los tubos. 70
Tabla 3.3. Observaciones de tubos obtenidos con variación de velocidad de rotación del molde. 74
Tabla 3.4. Observaciones de tubos obtenidos con variación de temperatura de precalentamiento. 76
Tabla 3.5. Observaciones de tubos obtenidos con variación de temperatura de colado. 79
Tabla 3.6. Peso y dimensiones de los tubos de aluminio sin costura. 84
Tabla 3.7. Resultados del análisis de porosidad. 87
Tabla 3.8. Medidas de la rugosidad de los tubos. 90
Tabla 3.9. Medida de rugosidad del molde 91
Tabla 3.10. Resultados del ensayo de tracción. 95
Tabla 3.11. Resultados del ensayo de espectrometría. 100
Tabla 3.12. Valor promedio de la composición de los tubos y de las aleaciones de la chatarra. 101
Tabla 3.13. Evaluación de rugosidad y defectos superficiales. 103
Tabla 3.14. Evaluación de porosidad interna y resistencia a la tracción. 104
Tabla 3.15. Evaluación de las características de los tubos de aluminio sin costura. 105
Tabla 3.16. Parámetros óptimos del proceso de colado centrífugo horizontal. 107

RESUMEN

El presente trabajo de titulación tiene por objetivo encontrar los parámetros ideales de funcionamiento de la máquina de colado centrífugo horizontal del Laboratorio de Fundición de la Escuela Politécnica Nacional que permite la obtención de tubos de aluminio sin costura, disminuyendo los defectos de fundición que se presentan en el proceso y así mejorar la calidad del producto. Se realizó el estudio de tres parámetros: la velocidad de rotación del molde, la temperatura de precalentamiento del molde y la temperatura de colado. Se fabricaron cinco tubos variando cada uno de estos parámetros, obteniendo un total de quince tubos. Posterior a la obtención de los tubos se realizó el análisis de porosidad, medición de rugosidad, ensayo de tracción, y adicionalmente el análisis de espectrometría; la porosidad se determinó con el análisis de densidad relativa, la rugosidad se midió con un rugosímetro digital, las propiedades mecánicas se obtuvieron con el ensayo de tracción en base a la norma ASTM E8, y para determinar la composición química de los tubos se efectuó el análisis de espectrometría. Al evaluar los quince tubos obtenidos con respecto a la rugosidad superficial, los defectos superficiales, porosidad y resistencia a la tracción se concluye que los parámetros óptimos del proceso de obtención de tubos de aluminio sin costura, de la máquina de colado centrífugo horizontal, corresponde a los parámetros de obtención del tubo número 6 que son: 1198 RPM de velocidad de rotación del molde, 165ºC de temperatura de precalentamiento del molde y 801ºC de temperatura de colado.

Palabras clave: Aluminio, fundición centrífuga, tubo sin costura.

ABSTRACT

The aim of this work is to find the ideal parameters for the operation of the horizontal centrifugal casting machine of the Foundry Laboratory of the Escuela Politécnica Nacional that allows the production of seamless aluminum tubes, for reducing the casting defects that are presented in the process and thus improving the quality of the product. The rotation speed of the mold, the temperature of preheating of the mold and the temperature of casting were the three parameters of study. Five tubes were manufactured by varying each of these parameters, obtaining fifteen tubes. After the tubes were obtained, porosity analysis, roughness measurement, tensile test, and additionally the spectrometric analysis was performed. The porosity was determined with the relative density analysis, the roughness was measured with a digital rugosimeter, the mechanical properties were obtained with the tensile test based on Standard ASTM E8, and the chemical composition of the tubes was performed with spectrometric analysis. Evaluating the fifteen tubes obtained with respect to surface roughness, surface defects, porosity and tensile strength, it is concluded that the optimal parameters of the process of obtaining seamless aluminum tubes from the horizontal centrifugal casting machine corresponds to the obtaining parameters of the tube number 6 which are: 1198 RPM of rotation speed of the mold, 165 ° C of preheating temperature of the mold and 801 ° C. of casting temperature.

Keywords: Aluminum, centrifugal casting, seamless tube.

“ESTUDIO PARAMÉTRICO DEL PROCESO DE COLADO CENTRÍFUGO HORIZONTAL PARA LA OBTENCIÓN DE TUBOS DE ALUMINIO SIN COSTURA”

INTRODUCCIÓN

En el Ecuador se tiene pocas referencias del proceso de fundición centrífuga, por este motivo en el Laboratorio de Fundición de la Facultad de Ingeniería Mecánica se ha construido una máquina de fundición centrífuga horizontal la cual fue diseñada con fines educativos e investigativos, permitiendo a los estudiantes conocer uno de los procesos de obtención de tubos sin costura.

El alcance de la construcción de esta máquina fue el de obtener como primer paso un tubo de aluminio sin costura, sin embargo, se necesita un análisis adicional de parámetros para complementar el proceso de obtención del producto, ya que no se especifican los parámetros utilizados para el proceso de colado. Además, la máquina presentaba problemas en su funcionamiento, no está especificado el procedimiento a seguir para obtener los tubos y el acabado superficial que los tubos presentan no es el adecuado ya que se observan varios defectos y una de las características principales del proceso de fundición centrífuga horizontal es el buen acabado superficial que se obtiene en sus productos.

Los defectos de fundición que aparecen en los tubos pueden ser mitigados e incluso eliminados, mediante un adecuado control de los parámetros de funcionamiento de la máquina y del proceso durante la fabricación de los tubos sin costura.

En el presente proyecto se estudian los parámetros más importantes de la fundición centrífuga horizontal, con el propósito de encontrar el punto óptimo de funcionamiento de esta máquina, de manera que los tubos de aluminio sin costura que se obtienen sean de mejor calidad y que los resultados obtenidos puedan ser utilizados como una guía para encontrar parámetros óptimos de funcionamiento en máquinas de fundición centrífuga de similares características o para la construcción de estas.

Objetivo general

Determinar los parámetros óptimos del proceso de colado centrífugo horizontal para la obtención de tubos de aluminio sin costura de mejor calidad en la máquina del Laboratorio de Fundición de la FIM.

Objetivos específicos

- Estudiar los efectos de la variación de la temperatura de precalentamiento, temperatura de colado y velocidad de rotación en el proceso de colado centrífugo.
- Determinar el tiempo necesario para la obtención de tubos de aluminio sin costura mediante el proceso de colado centrífugo horizontal.
- Determinar el porcentaje de porosidad alcanzado en los tubos de aluminio sin costura mediante un análisis de densidad relativa.
- Determinar la rugosidad superficial de los tubos de aluminio sin costura utilizando un rugosímetro.
- Determinar las propiedades mecánicas de los tubos de aluminio sin costura mediante un ensayo de tracción de acuerdo con la norma ASTM E8.

Alcance

Este proyecto tiene como objetivo encontrar los valores óptimos de los parámetros del proceso de colado centrífugo horizontal para la obtención de tubos de aluminio sin costura, para lograr esto, se utiliza la máquina de colado centrífugo horizontal del Laboratorio de Fundición de la Facultad de Ingeniería Mecánica que fue construida en el año 2012 como proyecto de titulación.

Específicamente este proyecto cubre las siguientes actividades:

- Modificación y adecuación de los elementos de la máquina con problemas de funcionamiento, como las carcasas de los rodamientos, motor, tapas del molde, elementos del sistema de transmisión y de precalentamiento del molde.
- Obtención de los tubos de aluminio sin costura por colado centrífugo horizontal mediante la variación de la velocidad de rotación del molde, la temperatura de precalentamiento del molde y la temperatura de colado.

- Realización de la prueba de cantidad de porosidad, medición de rugosidad superficial, ensayo de tracción y de espectrometría a todos los tubos obtenidos por colado centrífugo.
- Análisis de los resultados obtenidos de cada uno de los ensayos y mediciones realizadas a los tubos de aluminio sin costura.
- Determinación de los parámetros óptimos del proceso de colado centrífugo para la obtención de tubos de aluminio de buena calidad, empleando la máquina de fundición centrífuga horizontal que actualmente posee el Laboratorio de Fundición de la EPN.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Fundición en molde permanente

Los procesos de fundición con molde desechable si bien son ampliamente utilizados por varias ventajas, únicamente pueden ser utilizados una sola vez por fundición, por esta razón los moldes permanentes son los más adecuados para producciones donde se requiere utilizar un molde por varias ocasiones.

En comparación con la fundición en arena, los moldes permanentes permiten la producción de fundiciones más uniformes, con mejores tolerancias dimensionales y un acabado superficial de mejor calidad y con un mejoramiento de las propiedades mecánicas. (Stefanescu, 1988)
Los moldes permanentes son generalmente moldes metálicos que también son conocidos como coquillas, sin embargo, los moldes permanentes también pueden ser fabricados de grafito. (Stefanescu, 1988)

1.1.1. Moldes metálicos

Los moldes metálicos son comúnmente fabricados de acero o hierro fundido. Los moldes constan de dos o más partes diseñadas para tener facilidad de apertura y cierre. (Groover, 2007)
En ocasiones es necesario emplear noyos o núcleos removibles que son generalmente construidos de metal o si los noyos son complejos se construyen de arena o yeso. En este caso, el proceso es llamado fundición con molde semipermanente. (Stefanescu, 1988)

Los moldes metálicos son adecuados cuando existe un alto volumen de producción de piezas fundidas con espesor de pared uniforme, también pueden ser empleados en fundiciones complejas pero la cantidad de producción debe ser suficientemente alta para justificar su costo. (Stefanescu, 1988)

Los metales más comunes que se funden en moldes permanentes son el aluminio, magnesio, aleaciones a base de cobre y hierro colado. Sin embargo, el hierro colado requiere una temperatura de vertido elevada, de 1250°C a 1500°C (2300°F a 2700°F), que tiene un efecto grande en la vida útil del molde. Las temperaturas de vertido muy altas del acero hacen que los moldes permanentes no sean apropiados para este metal, a menos que el molde se fabrique con material refractario. (Groover, 2007)

1.1.2. Precalentamiento del molde permanente

En muchas operaciones de fundición los moldes son precalentados aproximadamente a su temperatura de operación antes de iniciar con el colado. Esta práctica minimiza el número de fundiciones defectuosas producidas durante el establecimiento de la temperatura de operación. (Stefanescu, 1988)

Los moldes pueden ser precalentados mediante la exposición directa a una llama, aunque este método puede ser perjudicial para los moldes debido a que no existe una distribución uniforme del calor. El precalentamiento de los moldes en un horno es el mejor método porque los gradientes térmicos son de menor magnitud. Desafortunadamente, este método es usualmente impráctico para moldes de grandes dimensiones. (Stefanescu, 1988)

1.1.3. Temperatura de operación del molde permanente

Cuando la temperatura del molde es demasiada alta las fundiciones son muy débiles para ser extraídas sin daños y las propiedades mecánicas como también el acabado superficial son deficientes. En cambio, cuando la temperatura del molde es demasiada baja es probable que se formen juntas frías y que no se alimente a todo el molde, resulta también en salpicaduras y adherencia de la fundición al molde.

La temperatura final de operación del molde es lograda luego de los primeros ciclos de producción. (Stefanescu, 1988)

De acuerdo con (Stefanescu, 1988) las variables que determinan la temperatura del molde son las siguientes:

- Temperatura de colado: a mayor temperatura de colado entonces mayor debe ser la temperatura del molde.
- Frecuencia de ciclo: a mayor frecuencia del ciclo de operación entonces mayor debe ser la temperatura del molde.
- Peso de la fundición: si el peso del metal fundido aumenta entonces la temperatura debe incrementarse.
- Forma de la fundición: cuando existen secciones pesadas que están aisladas, perforaciones y esquinas afiladas se debe aumentar la temperatura del molde, estas formas también provocan gradientes térmicos indeseables.
- Espesor de la pared de la fundición: a mayor espesor entonces se debe incrementar la temperatura del molde.
- Espesor de la pared del molde: la temperatura del molde disminuye cuando el espesor de la pared del molde se incrementa.
- Espesor del recubrimiento del molde: la temperatura del molde disminuye cuando el espesor del recubrimiento es mayor.

1.1.4. Temperatura de colado

Las fundiciones con moldes permanentes son generalmente coladas con metal que es mantenido dentro de un reducido rango de temperatura. Este rango es establecido por la composición del metal a ser colado, el espesor de la pared de la fundición, el tamaño y peso de la fundición, el método de enfriamiento del molde, su recubrimiento y sistemas de llenado que posea. (Stefanescu, 1988)

En la Tabla 1.1 se indica las temperaturas de colado para los metales más comunes utilizados en fundición.

- Baja temperatura de colado: provoca que la cavidad del molde no se llene y las entradas se solidifiquen antes que la última parte de la fundición, además las secciones más delgadas se solidifican demasiado rápido y se interrumpe la solidificación direccional. Además, se originan porosidades, se reproducen pocos detalles de la fundición y se forman juntas frías. A veces solo un pequeño incremento en la temperatura de colado es necesario para prevenir las juntas frías. (Stefanescu, 1988)

- Alta temperatura de colado: causan contracciones en la fundición y deformaciones en el molde. Las deformaciones conducen a la pérdida de la precisión dimensional del molde. Además, variaciones en la composición del metal se pueden desarrollar si el metal fundido tiene componentes que llegan a ser volátiles en altas temperaturas de colado. Las altas temperaturas de colado también reducen el tiempo de solidificación por lo tanto se disminuye la tasa de producción y la vida útil del molde se reduce. (Stefanescu, 1988)

Tabla 1.1. Temperaturas de colado para metales más comunes utilizados en fundición.

Aleaciones	Rango Temperatura de colado	Observaciones
Aluminio	675-790°C (1250-1450°F)	Fundiciones de pared delgada pueden ser coladas a temperaturas altas como 845°C (1550°F). La temperatura de colado debe ser controlada dentro de ±8°C (±15°F).
Magnesio	705-790°C (1300-1450°F)	La temperatura de colado debe ser controlada dentro de ±8°C (±15°F).
Cobre	980-1230°C (1800-2250°F)	La temperatura de colado debe ser controlada dentro de ±15°C (±25°F).
Hierro Gris	1275-1355°C (2325-2475°F)	Excesivas temperaturas pueden distorsionar al molde y los defectos aumentan debido a puntos calientes.

(Fuente: Stefanescu, 1988)

1.1.5. Acabado superficial

Stefanescu (1988) señala que el acabado superficial de las fundiciones obtenidas en molde permanente es mejor en comparación a las fundiciones en moldes perdidos, sin embargo, el acabado superficial de las molduras depende principalmente de los siguientes parámetros:

- Superficie del molde: el acabado superficial de la fundición no será mejor que la del molde, las imperfecciones que posee el molde serán reproducidas en la fundición.
- Recubrimiento del molde: recubrimientos excesivamente gruesos, desiguales o desprendidos degradan el acabado final de la fundición.
- Diseño del molde: un diseño adecuado previene el agrietamiento del molde.
- Tamaño y diseño del sistema de llenado: son muy importantes en el acabado final de la fundición porque influyen en la velocidad y la suavidad del flujo de metal fundido.
- Ventilación: la eliminación del aire atrapado en las cavidades del molde es importante para asegurar un llenado suave y completo.

- Temperatura del molde: para un óptimo acabado superficial de la fundición, la temperatura del molde debe ser correcta para el trabajo y razonablemente uniforme.
- Diseño de la fundición: el acabado superficial es afectado negativamente por severos cambios de sección, complejidad, requerimientos para cambio en la dirección del flujo de metal y áreas planas grandes.

1.2. Tipos de Fundición en moldes permanentes

En la Figura 1.1 se observa que existen varios procesos de fundición que utilizan moldes permanentes, en este proyecto se enfoca más en la fundición centrífuga y por eso se la describe con mayor detalle.

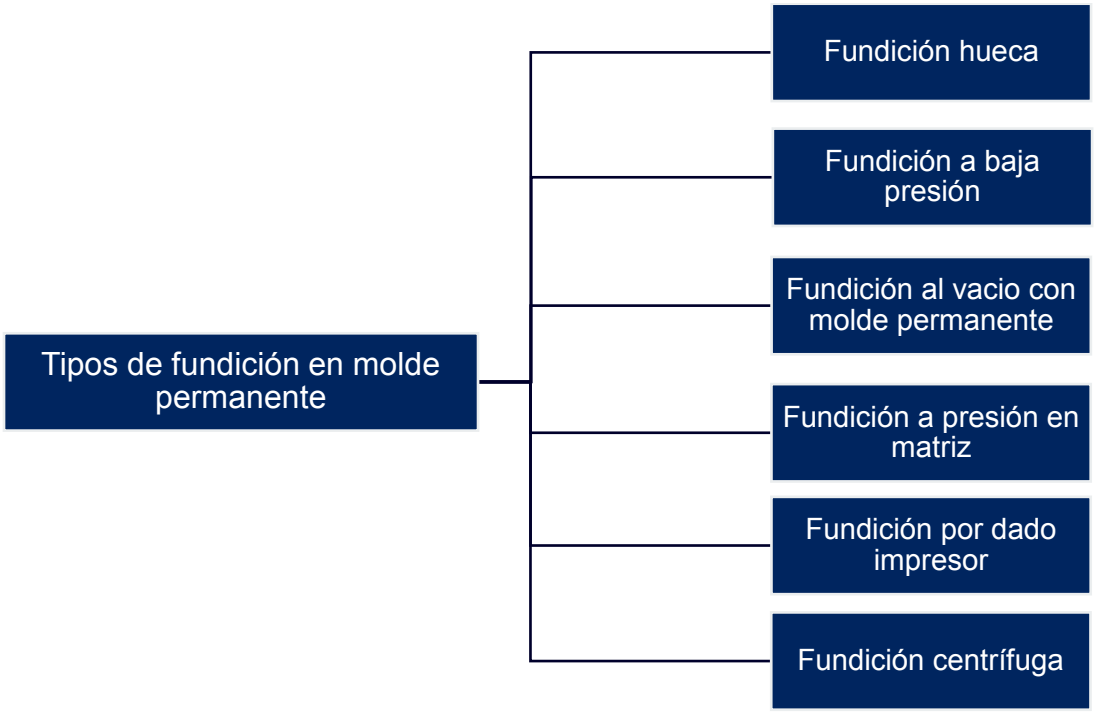


Figura 1.1. Tipos de fundición en molde permanente.
(Fuente: Propia)

1.2.1. Fundición centrífuga

La fundición centrífuga se caracteriza porque el molde gira a gran velocidad de modo que la fuerza centrífuga distribuye el metal derretido a las regiones externas de la cavidad del molde. (Groover, 2007)

Los moldes permanentes son generalmente empleados en la fundición centrífuga, la selección del molde depende del tamaño de la fundición, el grado de calidad que se

necesita y el número de producción requerida. Las fundiciones obtenidas son isotrópicas ya que tienen iguales propiedades en todas las direcciones, además poseen un buen acabado superficial. (Stefanescu, 1988)

De acuerdo con la disposición del eje de rotación del molde, la fundición centrífuga se divide en fundición centrífuga horizontal y fundición centrífuga vertical.

- Fundición centrífuga horizontal: Se utiliza principalmente para la obtención de productos tubulares. La fundición centrífuga horizontal se aborda con mayor detalle en este documento en el subcapítulo “1.3 Fundición centrífuga horizontal”.
- Fundición centrífuga vertical: En este proceso el molde está dispuesto de manera que gira alrededor de un eje vertical, si bien la fundición centrífuga horizontal se la utiliza para fabricar productos cilíndricos, la fundición centrífuga vertical posee un amplio rango de aplicaciones ya que las fundiciones obtenidas no son únicamente cilíndricas e incluso se pueden obtener piezas que no son simétricas (Stefanescu, 1988)

Otra forma de clasificar la fundición centrífuga es: 1) fundición centrífuga real, 2) fundición semicentrífuga y 3) fundición centrifugada.

1) Fundición centrífuga real: en la fundición centrífuga real se vierte metal fundido a un molde rotatorio para producir una pieza tubular. Las piezas más comunes que se fabrican con este proceso incluyen tubos, boquillas y anillos. Como se indica en la Figura 1.2, el metal derretido se vierte por un extremo del molde horizontal rotatorio y la gran velocidad de rotación ocasiona que las fuerzas centrífugas hagan que el metal adopte la forma de la cavidad del molde. La orientación del eje de rotación del molde puede ser horizontal o vertical, siendo la más común el horizontal. (Groover, 2007)

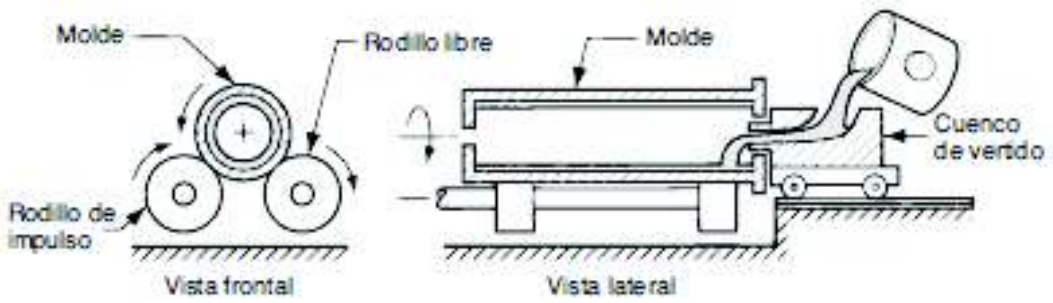


Figura 1.2. Arreglo para la fundición centrífuga real.
(Fuente: Groover, 2007)

2) Fundición semicentrífuga: se utiliza para producir fundiciones sólidas en vez de piezas tubulares. Como se observa en la Figura 1.3, comúnmente la orientación del eje de rotación es vertical y los moldes se diseñan con mazarotas en el centro a fin de suministrar metal. Este método se emplea con frecuencia para piezas en las que el centro de la fundición se realiza un maquinado, lo que elimina la porción donde la calidad es más baja. (Groover, 2007)

   Las piezas que se funden con este método son ruedas, poleas, impulsores y rotores de motores eléctricos. (Stefanescu, 1988)

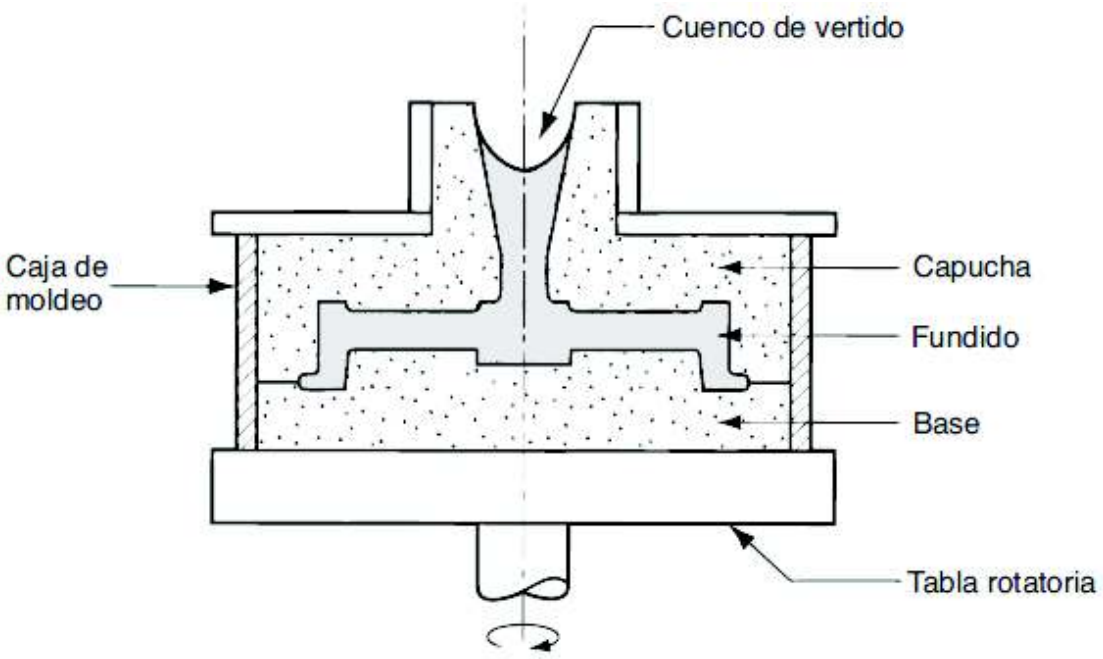


Figura 1.3. Fundición semicentrífuga.
(Fuente: Groover, 2007)

3) Fundición centrifugada: en la fundición centrifugada el molde está diseñado con las cavidades de la pieza localizada hacia afuera del eje de rotación (Figura 1.4), de modo que el metal vertido en el molde se distribuya hacia ellas por medio de la fuerza centrífuga. El proceso se emplea para piezas pequeñas y no es un requerimiento la simetría radial de la pieza, como si lo es para los otros dos tipos de fundición centrífuga. Las aplicaciones más comunes son cuerpos de válvulas, tapones, yugos, etc. (Groover, 2007)

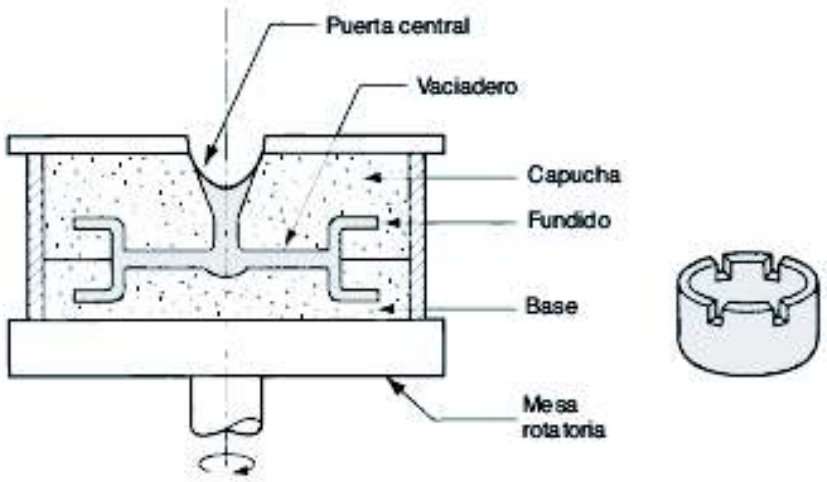


Figura 1.4. Fundición centrifugada.
(Fuente: Groover, 2007)

1.3. Fundición centrífuga horizontal

Se denomina fundición centrífuga horizontal porque el molde se encuentra dispuesto de manera horizontal. Se usa la fuerza centrífuga generada por un molde cilíndrico rotativo, a través del cual el metal derretido se adhiere contra las paredes del molde y forma la figura deseada. (Stefanescu, 1988)

La fundición centrífuga horizontal fue usada principalmente para fabricar tubos de pared delgada de hierro gris, hierro dúctil y latón. (Stefanescu, 1988)
El mejoramiento del equipo y las aleaciones han hecho posible el desarrollo de un flexible y confiable proceso que es económico y capaz de cumplir rigurosos requerimientos metalúrgicos y dimensionales. En la actualidad muchas industrias usan piezas cilíndricas producidas por fundición centrífuga horizontal, se utilizan tubos de pared gruesa en la industria química, en la industria de la pulpa y del papel, acerías e industria petrolera. (Stefanescu, 1988)

1.3.1. Moldes para fundición centrífuga horizontal

Los moldes utilizados en la fundición centrífuga son empleados de acuerdo con la geometría y cantidad de fundiciones que se realizarán y las características de la aleación o metal a ser fundido. Los moldes generalmente son moldes permanentes que pueden ser de acero, cobre o grafito y en ocasiones se pueden utilizar moldes perdidos revestidos con arena. (Stefanescu, 1988)

En la fundición centrífuga horizontal los moldes consisten en una boquilla o entrada, guías para los rodillos, revestimiento y las tapas a los extremos. Debido a que en ciertas máquinas los rodamientos pueden ser colocados a diferentes distancias, es posible emplear moldes de varios diámetros. Los moldes son comúnmente enfriados por atomizadores de agua que están ubicados a lo largo de su longitud. (Stefanescu, 1988)

1.3.2. Parámetros en la fundición centrífuga horizontal

Los parámetros más importantes que deben ser controlados en la fundición centrífuga horizontal con el objetivo de obtener piezas con buenas propiedades mecánicas y de buena apariencia son los siguientes:

- Velocidad de vertido o colado: las velocidades de colado varían ampliamente de acuerdo con el tamaño de la fundición y del metal que está siendo colado, también el metal líquido puede ser introducido en el molde por un extremo, por los dos extremos o incluso a través de un canal de longitud variable. Las tasas de colado que son muy lentas pueden resultar en la formación de traslapes o juntas frías y porosidades debido a gas atrapado, mientras que tasas de colado excesivamente altas ralentizan la solidificación y son una de las principales causas de agrietamiento longitudinal. (Stefanescu, 1988)

- Temperatura de colado: la temperatura de sobrecalentamiento requerida para producir una fundición es una función del metal o aleación a ser colada, tamaño del molde y propiedades físicas del material del molde. Una alta temperatura de fundición requiere de altas velocidades de rotación para evitar deslizamiento del metal, bajas temperaturas de fundición pueden causar juntas frías y porosidades. La temperatura de colado también influye en la tasa de solidificación y por lo tanto afecta la cantidad de segregaciones formadas. (Stefanescu, 1988)

- Temperatura del molde: la temperatura inicial del molde varía sobre un amplio rango, de acuerdo con la temperatura de fusión del metal colado, el espesor del molde y el espesor de la pared del tubo a ser fundido. De acuerdo con varias investigaciones que se han realizado, la temperatura inicial del molde no afecta a la estructura de la fundición resultante tanto como los parámetros anteriormente mencionados. (Stefanescu, 1988)

- Velocidad de rotación: generalmente el molde gira a una fuerza centrífuga que varía de 75 a 120 veces la fuerza de la gravedad. Es recomendable que la velocidad de rotación sea variada durante el proceso de fundición como se observa en la Figura 1.5, donde se ilustra un ciclo de rotación típico. (Stefanescu, 1988)

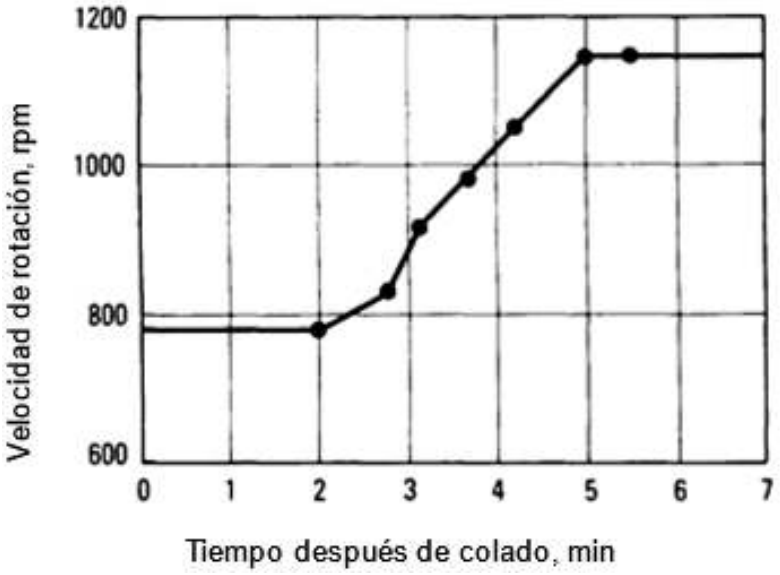


Figura 1.5. Ciclo de rotación en fundición centrífuga horizontal.
(Fuente: Stefanescu, 1988)

El ciclo de rotación puede ser dividido en tres partes.

1) En el instante de colar el metal, el molde está girando a una velocidad suficiente para adherir el metal líquido contra las paredes del molde.

2) Cuando el metal alcanza el extremo opuesto del molde la velocidad de rotación se incrementa.

3) La velocidad de rotación se mantiene constante por un tiempo luego del colado, el tiempo que se mantiene a velocidad constante varía con el tipo de molde, metal a ser fundido y espesor de pared requerido.

La velocidad de rotación ideal es aquella que causa una rápida adhesión del metal derretido a la pared del molde con una mínima vibración. De esta manera la fundición resultará con una estructura uniforme. (Stefanescu, 1988)

Cuando el metal derretido entra al molde, un gradiente de presión es establecido a través del espesor del tubo por la aceleración centrífuga, esto causa que los constituyentes del metal que son de menor densidad como la escoria e impurezas no metálicas se adhieran

en el diámetro interno del tubo ya que son más ligeras, el espesor de estas impurezas son de milímetros que luego pueden ser removidas fácilmente por maquinado. (Stefanescu, 1988)

Una velocidad de rotación demasiada baja puede causar un deslizamiento del metal, llenado incompleto y resulta en un acabado superficial deficiente. En cambio, velocidades de rotación muy elevadas puede generar vibraciones que resultan en segregaciones circunferenciales o se pueden dar un incremento de esfuerzos circunferenciales, suficientes para causar fracturas radiales o grietas circulares cuando el metal se contrae durante la solidificación. (Stefanescu, 1988)

1.3.3. Solidificación

En la fundición centrífuga horizontal el calor se elimina de la fundición solo a través de la pared del molde que es comúnmente refrigerada por agua. La solidificación empieza en el diámetro exterior de la fundición que está en contacto con el molde y continua internamente hacia el diámetro interno de la fundición. (Stefanescu, 1988)
De acuerdo con Stefanescu (1988) los parámetros que influyen en la solidificación son:

- El material, espesor y temperatura inicial del molde.
- Conductividad térmica del molde.
- Condiciones de fundición, como el sobrecalentamiento de la colada, tasa de vertido y velocidad de rotación.
- Vibraciones presentes en el sistema.

1.3.4. Ventajas de la fundición centrífuga

- La fundición centrífuga horizontal es aplicable a casi todas las composiciones de materiales utilizados en fundición, con excepción de aceros de alto contenido de carbono (0,40 a 0,85% C), debido a las segregaciones de carbono que representan un problema en este rango. (Stefanescu, 1988)
- Las características metalúrgicas de los tubos obtenidos por fundición centrífuga se caracterizan principalmente por su solidez, textura, estructura y propiedades mecánicas. (Stefanescu, 1988)
- Los productos pueden ser manufacturados con una amplia gama de microestructuras adaptadas para satisfacer las demandas de aplicaciones específicas. Tubos obtenidos por fundición centrifuga horizontal pueden ser fabricados con resistencia a

elevadas temperaturas, resistencia a la corrosión, resistencia a la fatiga térmica, ductilidad a baja temperatura, etc. (Stefanescu, 1988)

- Los productos obtenidos tienen un alto grado de limpieza metalúrgica y una microestructura homogénea, no presentan la anisotropía de las propiedades mecánicas que son evidentes en los tubos laminados, soldados o forjados. (Stefanescu, 1988)
- La fundición centrifuga horizontal permite fabricar tubería de grandes dimensiones, con diámetros máximos cercanos a 1.6 m (63 in) y espesores de pared de hasta 200 mm (8 in). (Stefanescu, 1988)

1.3.5. Defectos en la fundición centrífuga

Los principales defectos de la fundición centrífuga son:

- Bandas de segregación. - Se forman generalmente cuando el espesor de la pared de la fundición excede de 50 a 75 mm (2 a 3 pulgadas); en pocas ocasiones se forma segregaciones en paredes delgadas. La segregación es asociada a velocidades de rotación bajas. (Stefanescu, 1988)
- Salpicaduras (Efecto Lluvia). - Pueden ocurrir si el giro del molde es muy bajo o si el vertido del metal líquido en el molde es muy rápido. (Stefanescu, 1988)
- Defectos de vibración. - La vibración causa que la colada se lamine. Estos defectos pueden mantenerse al mínimo con un adecuado montaje y balance del molde, y la inspección frecuente de rodamientos, cojinetes y otras partes vitales de la máquina. (Stefanescu, 1988).

Otros defectos que aparecen en el proceso de fundición centrífuga horizontal, y se presentan exclusivamente en la fabricación de tubos, son:

- Traslapes o juntas frías. - Resultado de la fusión inadecuada de capas sucesivas del metal fundido. (Wallace, 1953)
- Grietas. - Aparecen de la contracción no uniforme o restringida de la tubería. (Wallace, 1953)
- Cuerpos no metálicos. - Consecuencia del desprendimiento del elemento utilizado para el transporte del material fundido, por ejemplo, la cuchara o crisol. (Wallace, 1953)

Este proceso de fundición se ha desarrollado a tal punto en donde la aparición de los defectos descritos anteriormente es poco probable. La fundición de tubos delgados debe

ser rápida para evitar traslapes o juntas frías y que las partículas ligeras no-metálicas no logren desplazarse al centro de la pieza fundida. (Wallace, 1953)

1.3.6. Aplicaciones

La flexibilidad del proceso de fundición centrífuga horizontal en términos de materiales y el amplio rango de tamaños de las piezas que se pueden producir, han conducido a la aplicación de piezas fundidas centrífugamente en varias industrias. (Stefanescu, 1988)

En la industria del hierro y el acero como se observa en la Figura 1.6, se utilizan rodillos de fundición continua, rodillos de laminación, rodillos de hornos, tuberías especiales y carretes que son fabricados mediante fundición centrífuga. (Stefanescu, 1988)

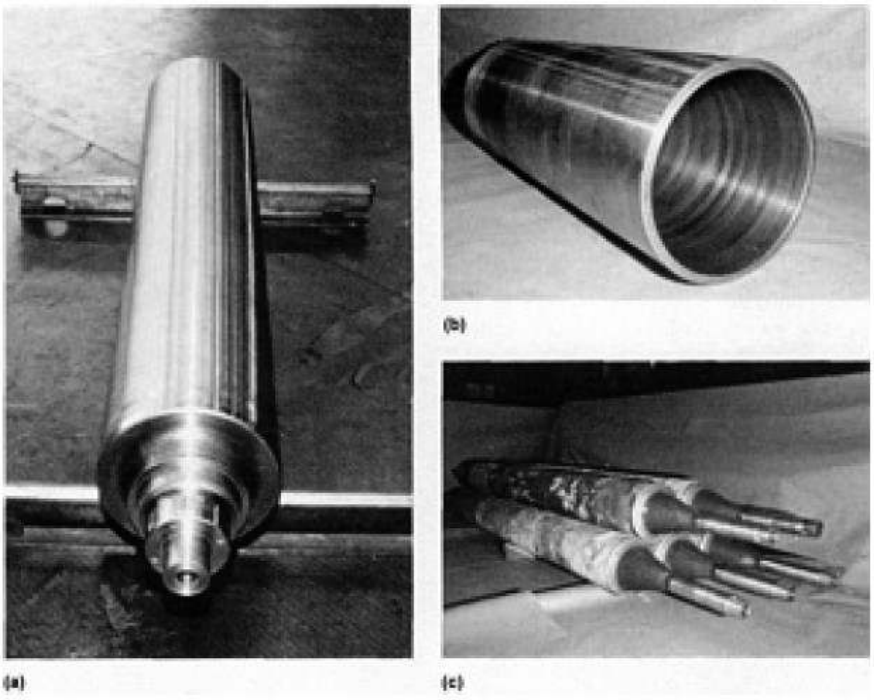


Figura 1.6. Aplicaciones de la fundición centrífuga horizontal en la industria del hierro y el acero. (a) Rodillos para fundición continua, (b) carretes, (c) rodillos para hornos de recocido. (Fuente: Stefanescu, 1988)

Las plataformas de producción que están en el mar de las industrias de petróleo y gas utilizan tuberías en varias aplicaciones, tubos bimetálicos que son fabricados por fundición centrífuga horizontal se producen por la sucesiva fundición de una aleación dentro de otra. Los tubos bimetálicos son usados por dos razones principales: para reducir el costo de usar un material especial unido a un material de refuerzo de menor costo y para obtener combinaciones de propiedades que no pueden ser alcanzadas por

otros métodos. Para tubería se utiliza como material exterior aceros de baja aleación y para el interior hierro gris perlítico, acero inoxidable o superaleaciones. (Stefanescu, 1988)

Otras aplicaciones de la fundición centrífuga horizontal incluyen cilindros hidráulicos, rodillos para la producción de vidrio, tubería para transporte de materiales abrasivos, rodillos para la industria de la pulpa y el papel, tubos para la industria química, pilotes de cimentación, y columnas de construcción. (Stefanescu, 1988)

1.3.7. Investigaciones realizadas a la fundición centrífuga

La Industria fundidora en el país ha tenido poco desarrollo, son pocas las empresas que han optado por procesos eficientes e innovadores con tecnología de punta, ampliando sus servicios y mejorado la calidad de sus productos, la mayor parte de las empresas que la constituyen, realizan productos de baja o mediana complejidad, sin mayor desarrollo tecnológico ni optimización de los procesos, pocas empresas lideran la Industria de la Fundición en el Ecuador. (Villamarín & Vozmediano, 2010)

En el Ecuador la fundición se utiliza la fundición centrífuga vertical para realizar productos decorativos como llaveros, hebillas para cinturones, adornos, etc., utilizando como materia prima el ZAMAC (Aleación de zinc, aluminio, magnesio y cobre).

Las máquinas de fundición centrífuga horizontal que existen en el país fueron desarrolladas dentro de las universidades como proyectos de titulación, permitiendo a los estudiantes conocer cómo se fabrican productos con este proceso.

Existen varias investigaciones realizadas a los efectos que produce la fundición centrífuga en algunos materiales, con respecto al aluminio se tiene las siguientes conclusiones:

Shailesh, Sundarrajan y Komaraiah (2014) indican lo siguiente:

- Disminuir la temperatura de colado conduce a un incremento de todas las propiedades mecánicas debido a que se forma un tamaño de grano fino durante el proceso.
- Aumentar la velocidad de rotación del molde incrementa la resistencia última a la tracción debido al efecto de la fuerza centrífuga actuando en el metal.

Rao, Tattimani y Rao (2015) concluyen respecto a los tubos obtenidos que:

- La tasa de vertido o colado afecta fuertemente a las propiedades del tubo fundido.
- A bajas velocidades de rotación se forman tubos de formas irregulares.

Patel (2015) en su investigación determina:

- La velocidad de rotación tiene un fuerte impacto en la dureza y el comportamiento de desgaste de las aleaciones hipereutécticas de Al-Si.
- Hay una tendencia decreciente en la dureza de la periferia interna a la externa de la fundición obtenida, debido a que las partículas de silicio son empujadas hacia la región interior en la fundición centrífuga horizontal.

Chirita, Soares y Silva (2008) en su investigación concluyen:

- Las propiedades mecánicas y resistencia a la fatiga son mucho mejores en comparación al colado por gravedad.
- La fundición centrífuga puede ser útil en el diseño de componentes estructurales y en particular cuando las especificaciones son distintas en posiciones diferentes.

1.4. Tubos sin costura

Los tubos sin costura son aquellos elementos que no requieren soldadura para su fabricación, y se pueden obtener mediante laminado, forjado, fundición centrífuga o por proceso de extrusión.

(Wallace, 1953) , realiza una comparación de la fabricación de tubos entre el proceso de fundición centrífuga, proceso de forja y proceso de fundición estática, indica lo siguiente:

- La calidad de una fundición centrífuga de acero es similar a la de un material forjado y superior a una fundición estática.
- Los metales no-ferrosos fundidos con el proceso centrífugo tienen mejores propiedades que las fundiciones estáticas, y son similares, pero no superiores a elementos de materiales forjados o extruidos.
- Los equipos necesarios para la fundición centrífuga tienen un costo superior a los equipos necesarios para el proceso de forjado o proceso de fundición estática.
- La fundición centrífuga puede producir contornos irregulares que con el proceso de forjado no es factible.
- La colada tiene un mejor rendimiento en el proceso de fundición centrífuga que en el de fundición estática, resultando en el ahorro de la colada.

1.4.1. Aplicación de los tubos sin costura de aluminio

Los tubos de aluminio sin costura se aplican en la industria eléctrica, como se observa en la Figura 1.7, sirve como estructura que sostiene varios transformadores. (Williams Metals and Welding Alloys, 2013)

Figura 1.7. Aplicación de tubos sin costura de aluminio en la industria eléctrica.
(Fuente: Williams Metals and Welding Alloys, 2013)

Por su resistencia a la corrosión es usado en aplicaciones hidráulicas, transportando agua, aire, aceite y fluido hidráulico. (Grainger, S.A., n.d.)

También existe su aplicación en elementos neumáticos, como parte de los cilindros, (Figura 1.8). Los tubos sin costura de aluminio pueden utilizarse como camisa del cilindro. (Águeda, Navarro, & Morales, 2012)

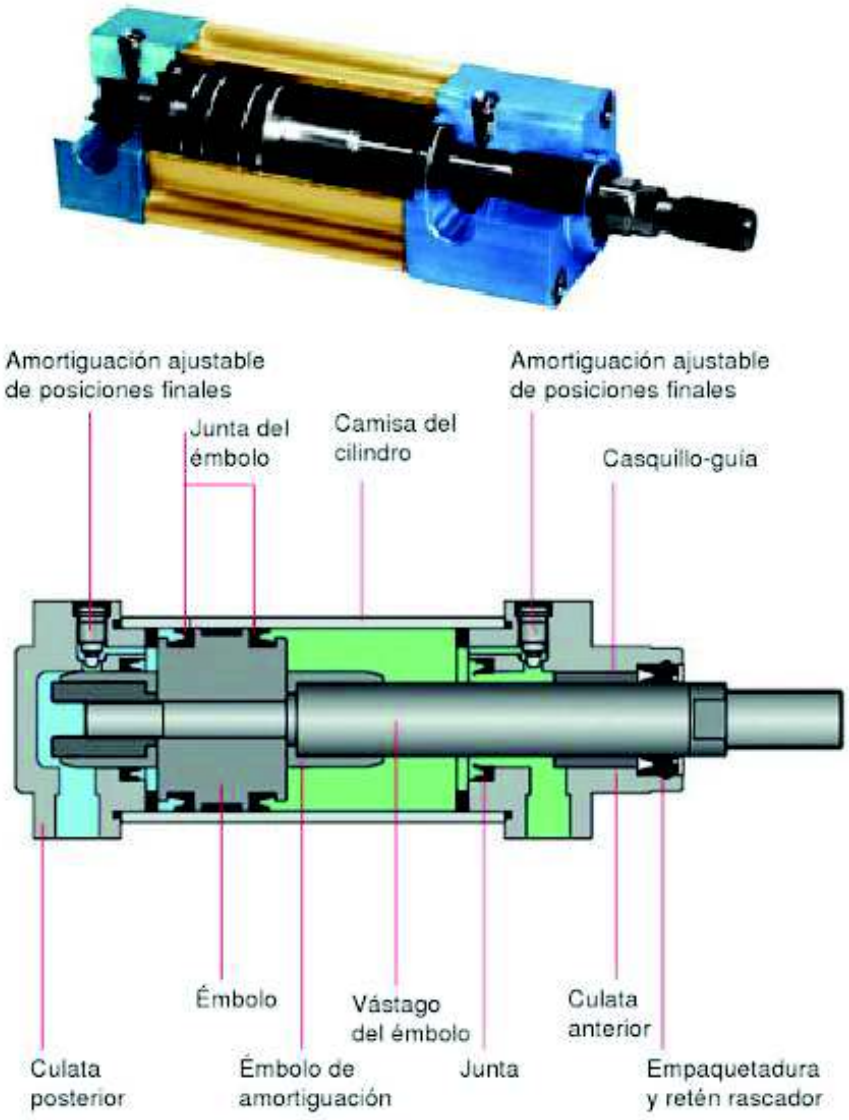


Figura 1.8. Tubo sin costura de aluminio utilizado como camisa en un cilindro neumático.
(Fuente: Águeda, Navarro, & Morales, 2012)

1.5. Aluminio y sus aleaciones

El aluminio es un metal de reciente aparición, su inicio fue a finales del siglo XIX, es de los metales más abundantes en la tierra, sin embargo, su obtención a partir de su estado natural no es fácil; el aluminio es producido a partir del mineral bauxita. (Groover, 2007)

Las características principales, para que el aluminio sea considerado como material de uso de ingeniería son: ligero con una alta relación resistencia-peso, no es magnético, tiene excelentes propiedades térmicas y eléctricas, con alta resistencia a la corrosión y a varios químicos por la formación de una delgada película de óxido en la superficie. (Groover, 2007) (Kalpakjian & Schmid, 2008)

El aluminio también es dúctil y tiene facilidad de conformado mecánico y la resistencia del aluminio puro es relativamente bajo, sin embargo, puede alearse o ser tratado térmicamente y llegar a tener propiedades similares a ciertos aceros. (Groover, 2007)

El aluminio clasificado como chatarra puede reciclarse y recuperar el metal por lo menos un 90%, esto se debe a la resistencia a la corrosión que presenta el aluminio lo que preserva al metal. El costo de un lingote de aluminio producido por reciclaje de chatarra es menor que el costo del aluminio obtenido a partir del mineral. (Kaufman & Rooy, 2004)

Para procesos de fundición del aluminio, se debe tener en cuenta que el metal fundido debe estar como mínimo con 28ºC (50ºF) sobre la temperatura de liquidus; la Tabla 1.2 muestra las temperaturas liquidus y de fundición para las de aleaciones más comunes de aluminio. (Saha, 2000)
El metal fundido debe evitar la captación de gases y la formación de óxido. (Saha, 2000)

Tabla 1.2. Temperatura Liquidus y de Fundición de aleaciones de Aluminio.

Sistema de aleación	Temperatura Liquidus, ºC (ºF)	Temperatura de Fundición, ºC (ºF)
Al, AlMn	660 (1220)	688 (1270)
AlMg, AlMgSi	650 (1202)	680 (1252)
AlCuMg, AlZnMgCu	640 (1184)	670 (1234)

(Fuente: Traducido de Saha, 2000)

1.5.1. Nomenclatura

La denominación o nomenclatura usada para el aluminio y sus aleaciones fue establecida por la Asociación de Aluminio (Aluminum Association), y se divide en dos partes, una parte utilizada para el aluminio forjable y la otra para el aluminio fundido, consta de cuatro dígitos. (Groover, 2007) (Kaufman & Rooy, 2004)

El primer dígito, indica el componente principal de la aleación, la Tabla 1.3 presenta las series del aluminio y aleaciones con su designación del primer dígito. (Kaufman & Rooy, 2004)

Tabla 1.3. Nomenclatura del aluminio y sus aleaciones de acuerdo con la Asociación de Aluminio.

Grupo de aleación	Código de Aluminio Forjable	Código de Aluminio fundido
Aluminio puro, 99% o mayor	1xxx	1xx.x
Aleaciones:		
Cobre	2xxx	2xx.x
Manganeso	3xxx	---
Silicio + Cobre y/o magnesio	--	3xx.x
Silicio	4xxx	4xx.x
Magnesio	5xxx	5xx.x
Magnesio y silicio	6xxx	Serie no usada
Zinc	7xxx	7xx.x
Estaño	--	8xx.x
Otros	8xxx	9xx.x

(Fuente: Groover, 2007)

Para aluminios forjables, el segundo dígito indica las modificaciones hechas a la aleación; para series 1xxx, el tercer y cuarto número indica el porcentaje mínimo de aluminio, sobre el 99%, es decir el 99, xx% de aluminio; para las demás series, el tercer y cuarto dígito no tiene relevancia, solo identifica el tipo de aleación. (Kalpakjian & Schmid, 2008)

Para aluminio fundido, para series 1xx.x, el segundo y tercer número indica el porcentaje mínimo, sobre el 99%, de aluminio; y para el resto de las series, el segundo y tercer dígito no tienen importancia; el cuarto dígito, ubicado a la derecha del decimal, define la forma del producto, 0 si es pieza fundida, 1 si es lingote normalizado y 2 si un lingote no es estándar. (Kalpakjian & Schmid, 2008) (Kaufman & Rooy, 2004)

2. METODOLOGÍA

En el presente proyecto se determinarán los parámetros óptimos del proceso de colado centrífugo horizontal para la obtención de tubos de aluminio sin costura de mejor calidad.

Los parámetros que se estudiarán son la velocidad de rotación del molde, la temperatura de precalentamiento del molde y la temperatura de colado; estos parámetros fueron seleccionados de acuerdo con los equipos y materiales disponibles en el laboratorio de fundición de la EPN.

La máquina de colado centrífugo horizontal del laboratorio de fundición se empleará para la obtención de los tubos de aluminio sin costura. Estos tubos son los que permitirán determinar cuáles son los parámetros más influyentes en su proceso de fabricación. Para determinar los parámetros óptimos se utilizará un método experimental; los valores de los parámetros de referencia con los cuales se realizará la obtención de los tubos de aluminio están seleccionados de acuerdo con las recomendaciones del Metals Handbook de la ASM Volume 15- Casting (Stefanescu, 1988) y a la bibliografía relacionada a la fundición centrífuga horizontal.

Primero se obtendrán cinco tubos, variando la velocidad de rotación del molde mientras los otros dos parámetros permanecerán constantes, luego, se analizará la calidad y apariencia que presentan los tubos mediante inspección visual y se escogerá el de mejor acabado superficial y su valor de velocidad de rotación será un valor de referencia para la obtención de los siguientes tubos. Después, se obtendrán cinco tubos variando la temperatura de precalentamiento del molde, mientras la velocidad de rotación y temperatura de colado permanecen constantes, de la misma manera se analizará mediante inspección visual y se escogerá el de mejor calidad superficial y servirá de referencia para los restantes tubos. Finalmente se obtendrán cinco tubos variando la temperatura de colado, mientras la rotación del molde y temperatura de precalentamiento serán valores constantes. Con lo descrito anteriormente se tendrán en total quince tubos que serán analizados en diferentes aspectos y se determinará el mejor tubo que es posible fabricar en la máquina.

A continuación, se detalla los materiales y equipos necesarios, las modificaciones realizadas a la máquina de colado centrífugo horizontal, el protocolo experimental que fue

seguido durante la fabricación de los tubos, los procedimientos para la realización del análisis de porosidad, ensayo de tracción, medición de rugosidad y espectrometría.

2.1. Materiales y equipos utilizados para la obtención de los tubos

2.1.1. Material para los tubos

La materia prima que se utiliza para fabricar los tubos es chatarra de aluminio, como se ve en la Figura 2.1, la chatarra está conformada de perfilería de aluminio que es empleada en ventanas, puertas y cortinas. El aluminio corresponde a las aleaciones 6063 y 6005.

Figura 2.1. Chatarra de aluminio para la elaboración de tubos.
(Fuente: Propia)

En este proyecto se utilizó la cantidad señalada en la Tabla 2.1. Para los primeros tubos se utilizó una mayor cantidad, de 5.5 kg y 6 kg por tubo, ya que no se conocía la cantidad de chatarra a fundir para obtener un tubo completo, esto resulto en la formación del tubo con un exceso de material en la entrada del molde, es por esto por lo que a partir del tubo número seis en adelante se utiliza la misma cantidad de 5 kg y se corrige este problema.

Tabla 2.1. Cantidad de chatarra de aluminio utilizada en la fabricación de los tubos.

Número de Tubo	Cantidad de chatarra de Aluminio (Kg)
1	6
2	5.5
3	5.5
4	5.5
5	5.1
6	5
7	5
8	5
9	5
10	5
11	5
12	5
13	5
14	5
15	5

(Fuente: Propia)

2.1.2. Fundente

El fundente empleado para la fabricación de los tubos de aluminio es el denominado ALU FUNDEX EXTRA (Figura 2.2).

Este fundente escorificante de alta eficiencia es aplicado en la fundición de aluminio en crisol u horno de reverbero. Este producto forma una capa protectora sobre el metal fundido, la cual reduce la oxidación y minimiza la absorción de hidrógeno. (Garrido & Sánchez, 2011)

Las ventajas que mencionan Garrido y Sánchez (2011) con el uso de este fundente son:

- Reducción, de la oxidación y las pérdidas de aluminio, lo que implica un incremento de su fluidez.
- Evita que la fundición absorba materiales no metálicos o inclusiones, mejorando sus propiedades mecánicas.
- Evita la absorción de gases, ya que se forma una capa protectora.
- Disminuye la cantidad de metal que puede estar contenido en las escorias, lo que conlleva a un mayor rendimiento de la fusión.

La cantidad de fundente recomendada por el fabricante es de 0,3 a 0,5% en peso. (Garrido & Sánchez, 2011). En este proyecto se utilizó una cantidad del 0,5% en peso de la cantidad de aluminio, en la Tabla 2.2 se indica el valor para cada uno de los tubos.

Figura 2.2. Fundente ALUFUNDEX EXTRA.
(Fuente: Propia)

Tabla 2.2. Cantidad de fundente utilizado en la fabricación de los tubos.

Número de Tubo	Cantidad de chatarra de Aluminio (Kg)	Cantidad de Fundente (g)
1	6	30
2	5.5	27,5
3	5.5	27,5
4	5.5	27,5
5	5.1	25,5
6	5	25
7	5	25
8	5	25
9	5	25
10	5	25
11	5	25
12	5	25
13	5	25
14	5	25
15	5	25

(Fuente: Propia)

El fundente se añade a la colada una vez que todo el aluminio se haya fundido y se encuentre a la temperatura de colado deseada; se adiciona el fundente que está envuelto en papel aluminio procurando que este llegue hasta el fondo del crisol utilizando una campana perforada o cualquier herramienta que cumpla la misma función y se lo mantiene por alrededor de un minuto y luego se agita la colada para que las inclusiones y la escoria vayan a la superficie y puedan ser retiradas de la colada.

2.1.3. Desgasificante

Se utilizan pastillas desgasificantes para aluminio (Figura 2.3) denominadas APARTAGAS para disminuir las porosidades en los tubos sin costura.

Garrido y Sánchez (2011), indican que “las porosidades se presentan en las fundiciones debido al hidrógeno disuelto en el metal fundido, cuyo gas es expulsado en pequeñas burbujas a través de la pieza fundida mientras ésta se solidifica. La presencia de hidrógeno se debe en primer lugar a condiciones defectuosas del horno, herramientas húmedas, chatarra oxidada y prolongado mantenimiento del metal a excesiva temperatura. Piezas de aluminio porosas, significan piezas rechazables, con baja resistencia mecánica, ausencia de compactibilidad y mal acabado superficial”.

Las pastillas desgasificantes APARTAGAS además de eliminar las porosidades a través de un suave y prolongado desprendimiento de pequeñas burbujas sin verter el metal fuera del crisol, ayudan a refinar el tamaño de grano. (Garrido & Sánchez, 2011)

Para realizar fundiciones a base de lingotes de metal en bruto se recomienda el 0.15% de APARTAGAS con respecto al peso del metal; si la fundición es hecha a base de desperdicios o chatarras se deberá utilizar un 0.25% en peso del material; la diferencia de cantidad de desgasificante a utilizar se debe a que la chatarra tendrá otros elementos, además del aluminio, como pinturas o recubrimientos platicos que generarán más gases que requerirán ser expulsados, a comparación de los lingotes que solo son los metales puros y generarán menor cantidad de gases. (Garrido & Sánchez, 2011). En este proyecto se emplea chatarra de aluminio así que 0.25% en peso es el utilizado y la cantidad para cada uno de los tubos se indica en la Tabla 2.3.

Figura 2.3. Pastillas desgasificantes APARTAGAS.
(Fuente: Propia)

Tabla 2.3. Cantidad de desgasificante utilizado en la fabricación de los tubos.

Número de Tubo	Cantidad de chatarra de Aluminio (Kg)	Cantidad de Desgasificante (g)
1	6	15
2	5.5	13,75
3	5.5	13,75
4	5.5	13,75
5	5.1	12,75
6	5	12,5
7	5	12,5
8	5	12,5
9	5	12,5
10	5	12,5
11	5	12,5
12	5	12,5
13	5	12,5
14	5	12,5
15	5	12,5

(Fuente: Propia)

El desgasificante se añade a la colada después de que haya sido añadido el fundente, de la misma manera el desgasificante en forma de polvo es envuelto en papel de aluminio y se coloca en la colada por medio de una campana perforada o cualquier herramienta que cumpla la misma función, el desgasificante es dirigido hacia el fondo del crisol donde es mantenido por alrededor de un minuto o hasta que cese el desprendimiento de burbujas, luego se agita la colada para que las impurezas suban a la superficie y puedan ser retiradas de la colada.

2.1.4. Recubrimiento para el molde

El único recubrimiento que se utilizó para el molde es el grafito en polvo (Figura 2.4), este fue empleado para que los tubos no se queden adheridos al molde luego de su formación y que estos puedan ser extraídos fácilmente.
El grafito se aplica en toda la superficie interna del molde en el momento previo al armado del molde, este debe ser aplicado cada vez que se obtiene un tubo.

Figura 2.4. Grafito en polvo utilizado para el molde.
(Fuente: Propia)

2.1.5. Horno de crisol a gas

En este proyecto la chatarra de aluminio es fundida empleando el horno de crisol (Figura 2.5) del laboratorio de fundición de la EPN; el horno tiene una capacidad para fundir hasta nueve kilogramos de aluminio y utiliza como combustible el gas licuado de petróleo (GLP).

Este horno es el adecuado para fundir el volumen necesario para la fabricación de los tubos, además, el horno se encuentra cerca de la máquina por lo que no existe una gran disminución de temperatura del metal líquido en el transporte de la colada desde el horno a la máquina de colado centrífugo.

Figura 2.5. Horno de crisol a gas utilizado para fundir la chatarra de aluminio.
(Fuente: Propia)

2.1.6. Termocuplas y multímetro

Las termocuplas son sensores de temperatura que son muy utilizados en la industria. Una termocupla se fabrica con dos alambres de distinto material unidos en un extremo (soldados generalmente). Al aplicar temperatura en la unión de los metales se genera un voltaje muy pequeño (efecto Seebeck) del orden de los milivoltios el cual aumenta con la temperatura. (ARIAN)

Normalmente las termocuplas industriales están encapsuladas dentro de un tubo de acero inoxidable u otro material (vaina), en un extremo está la unión, y en el otro extremo

se encuentra el terminal eléctrico de los cables el cual es protegido adentro de una caja redonda de aluminio (cabezal) como se observa en la Figura 2.6. (ARIAN)

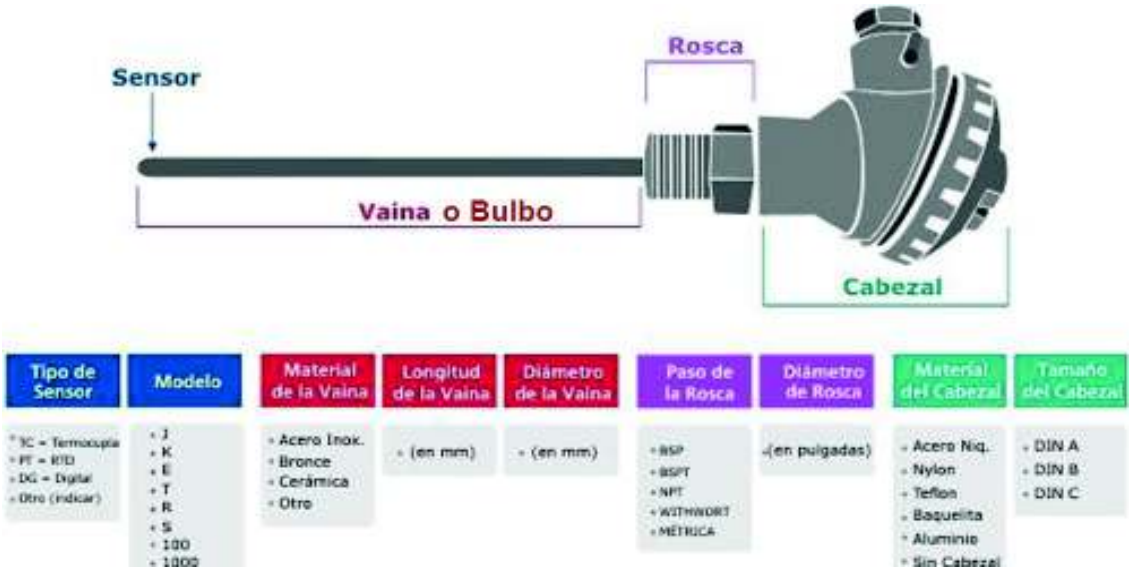


Figura 2.6. Partes de una termocupla industrial.
(Fuente: Bravo, 2016)

Las termocuplas tipo K se usan típicamente en fundición y hornos a temperaturas menores de 1300°C, por ejemplo, fundición de cobre y hornos de tratamientos térmicos. (ARIAN)

Para medir la temperatura de colado y la temperatura de precalentamiento del molde se utilizan termocuplas tipo K y un multímetro (Figura 2.7. (a)) que permite adaptar las termocuplas y que el valor de temperatura sea mostrado directamente en su pantalla, evitando así usar las tablas de temperatura que entrega el fabricante de las termocuplas.

Se utilizó dos termocuplas tipo K, la termocupla que se utiliza para medir la temperatura de la colada es una termocupla con vaina que se puede sumergir en el crisol y tiene un rango de medición de -100 a 1000°C, por lo que es adecuada para la medición del aluminio fundido, esta termocupla se observa en la Figura 2.7. (b). Para la medición de la temperatura de precalentamiento del molde se utiliza una termocupla sin vaina de menor rango de medición y se indica en la Figura 2.7. (c), de acuerdo con el fabricante tiene un rango de medición de -50 a 400°C, que es suficiente para medir la temperatura en el molde.

(a)

(b)

(c)

Figura 2.7. Multímetro y termocuplas utilizados para medir la temperatura.
(a) Multímetro, (b) Termocupla K con vaina, (c) Termocupla K sin vaina
(Fuente: Propia)

2.1.7. Máquina de colado centrífugo horizontal

Los tubos de aluminio sin costura se obtienen a través de la máquina de colado centrífugo horizontal del laboratorio de fundición de la EPN que se observa en la Figura 2.8.

En este proyecto para iniciar con la fabricación de los tubos de aluminio, la máquina primero necesitaba algunas modificaciones; estas se explican con mayor detalle a continuación en el subcapítulo “2.2. Preparación de la máquina de colado centrífugo horizontal”.

Figura 2.8. Máquina de colado centrífugo del laboratorio de fundición de la EPN luego de las modificaciones realizadas.
(Fuente: Propia)

2.2. Preparación de la máquina de colado centrífugo horizontal

Previo a la obtención de los tubos de aluminio con la máquina de colado centrífugo, se realizaron modificaciones a las carcasas de los rodamientos, las tapas utilizadas a la entrada y salida del molde, y extensiones para la tapa de salida del molde para lograr la reducción de la longitud del tubo a fundir. Además de las modificaciones anteriores, se reemplazó el motor e implementó un variador de frecuencia.

2.2.1. Carcasas de los rodamientos

En la Figura 2.9, se observa como inicialmente se encontraban las carcasas de los rodamientos; estas presentaban las siguientes características:

- La carcasa está totalmente sellada, presenta soldadura en todo el perímetro del anillo, esto dificulta la inspección y mantenimiento de los rodamientos.
- No existe grasero, por lo tanto, la única manera de proporcionar grasa a los rodamientos era mediante el orificio donde se encontraba un perno.

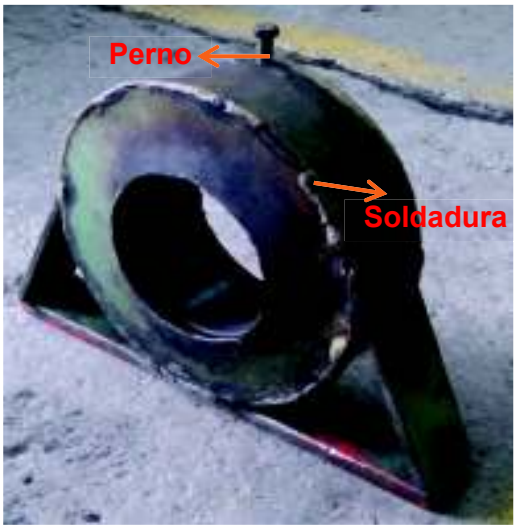


Figura 2.9. Estado inicial de las carcasas de los rodamientos.
(Fuente: Propia)

Las nuevas carcasas se pueden apreciar en la Figura 2.10, cuentan con tapas que pueden desmontarse fácilmente y graseros, permitiendo la inspección y mantenimiento de los rodamientos.

El material empleado para la construcción de las carcasas son planchas de acero A36. Para la obtención de las carcasas se realizó el rolado de las planchas, luego se realizó el torneado para la realización de canales y formar las tapas, finalmente se soldó placas pequeñas para sujetar las tapas con pernos. También se le añadió un orifico roscado para la colocación de un grasero.

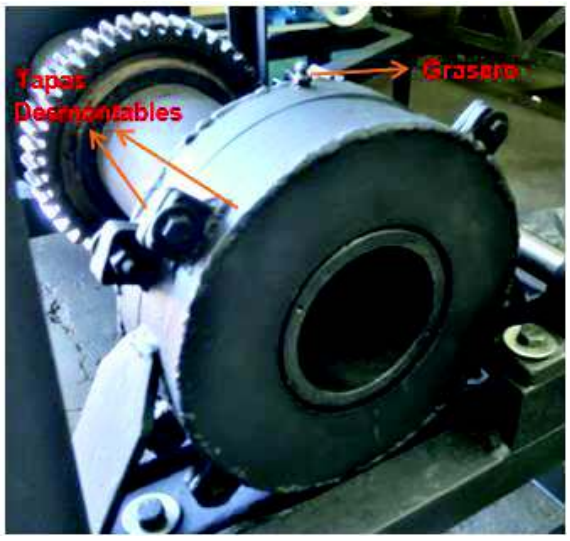


Figura 2.10. Carcasas de los rodamientos modificadas.
(Fuente: Propia)

2.2.2. Tapas de entrada y salida del molde

Como se observa en la Figura 2.11, las tapas del molde presentaban las siguientes características:

(a) Tapa de entrada con saliente corto, esto había provocado que anteriormente, en la etapa de pruebas durante la construcción de la máquina, el aluminio se derramara dentro del rodamiento, y es por ello por lo que se requería aumentar la longitud de la saliente, para en caso de derrame, éste no afecte a los componentes de la máquina.

(b) Tapa de salida del molde con abertura central, al existir un derrame al final del molde, las salpicaduras podrían ocasionar daños a la integridad de las personas ubicadas alrededor de la máquina, o dañar a la misma máquina, esto se evita al tener una tapa que cierre a la salida del molde por completo.

Figura 2.11. Tapas iniciales del molde.
(a) tapa de entrada, (b) tapa de salida.
(Fuente: Propia)

Para la construcción de las nuevas tapas del molde se utilizó placas de acero las cuales fueron maquinadas para obtener la forma redonda y como saliente se utilizó un tubo de acero de tres pulgadas de diámetro, el cual fue soldado a la placa para formar la tapa, se realizaron perforaciones en donde los pernos puedan ser colocados para ajustar al molde.

Las nuevas tapas se pueden observar en la Figura 2.12, tienen una saliente de mayor longitud, para que el metal fundido no se derrame y si llegara a ocurrir el metal se quede dentro de la tapa y no llegue a los rodamientos; la tapa de salida del molde es cerrado

por lo que se evita salpicaduras de metal hacia las personas que se encuentren alrededor de la máquina.

Figura 2.12. Nuevas tapas del molde.
(Fuente: Propia)

2.2.3. Extensiones para modificar la longitud del tubo

Los tubos que se obtienen en la máquina tienen una única longitud de 50 cm. La máquina no contaba con un elemento que controle la longitud del tubo fundido, entonces se construyó cuatro extensiones que al ser unidos con la tapa de salida del molde ocasionen que la zona destinada para el metal líquido disminuya y que por lo tanto la longitud del tubo también disminuya.

Las extensiones fueron construidas de manera similar a las tapas del molde descritos anteriormente, en base a placas maquinadas y soldadas a un tubo de acero.

En la Figura 2.13, se puede observar las cuatro extensiones fabricadas con sus correspondientes longitudes, con estos elementos se puede acortar la longitud del tubo desde 5 cm hasta 45 cm.

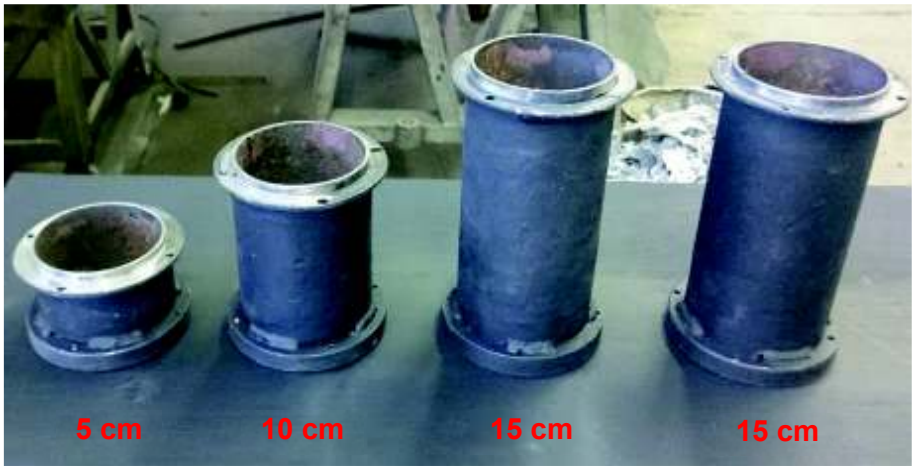


Figura 2.13. Extensiones de la tapa de salida del molde para modificar la longitud del tubo.
(Fuente: Propia)

2.2.4. Motor eléctrico

La máquina inicialmente contaba con un motor monofásico de 3HP de potencia y 1700 RPM para girar el molde, este se observa en la Figura 2.14.

Debido a que la carga se incrementó por las nuevas tapas del molde y a las extensiones para variar la longitud del tubo y porque el motor de 3 HP se sobrecalentaba se decidió utilizar un motor de mayor potencia para que no se pierda el torque, por lo que se eligió un motor de 5HP de potencia y 1700 RPM que se indica en la Figura 2.15. La velocidad de rotación del molde es un parámetro de estudio en este proyecto, entonces se decidió que el motor debe ser trifásico para que éste pueda ser controlado por un variador de frecuencia trifásico.

Figura 2.14. Motor monofásico de la máquina de colado centrífugo horizontal.
(Fuente: Propia)

Figura 2.15. Motor trifásico de la máquina de colado centrífugo horizontal.
(Fuente: Propia)

2.2.5. Variador de frecuencia

Con la implementación de un variador de frecuencia a la máquina de colado centrífugo horizontal se extiende el rango de velocidades que se pueden alcanzar para la elaboración de los tubos de aluminio. El variador de frecuencia (Figura 2.16) es trifásico y permite controlar al motor de 5HP a través de su programación.

Figura 2.16. Variador de frecuencia implementado en la máquina de colado centrífugo horizontal.
(Fuente: Propia)

2.2.6. Panel de control

Se construyó un panel de control como se observa en la Figura 2.17, para colocar los elementos eléctricos de la máquina de colado centrífugo, aquí se encuentran ubicados el interruptor trifásico de paso de corriente, los pulsadores de encendido y apagado y el variador de frecuencia.

Figura 2.17. Panel de control de la máquina de colado centrífugo horizontal.
(Fuente: Propia)

2.2.7. Sistema de transmisión de movimiento

En el sistema de transmisión de movimiento también se realizaron cambios (Figura 2.18). La polea que conduce el movimiento del eje del motor se reemplazó, ya que el eje del nuevo motor es de mayor diámetro que el anterior, por lo tanto, se cambió por una polea del mismo tamaño, pero con las dimensiones modificadas para que exista un ajuste apropiado con el eje del motor. La banda de transmisión de movimiento también se reemplazó por una nueva porque la anterior presentaba desgaste y los pernos de ajuste de las chumaceras pequeñas también fueron cambiados por unos nuevos ya que se encontraban deteriorados.

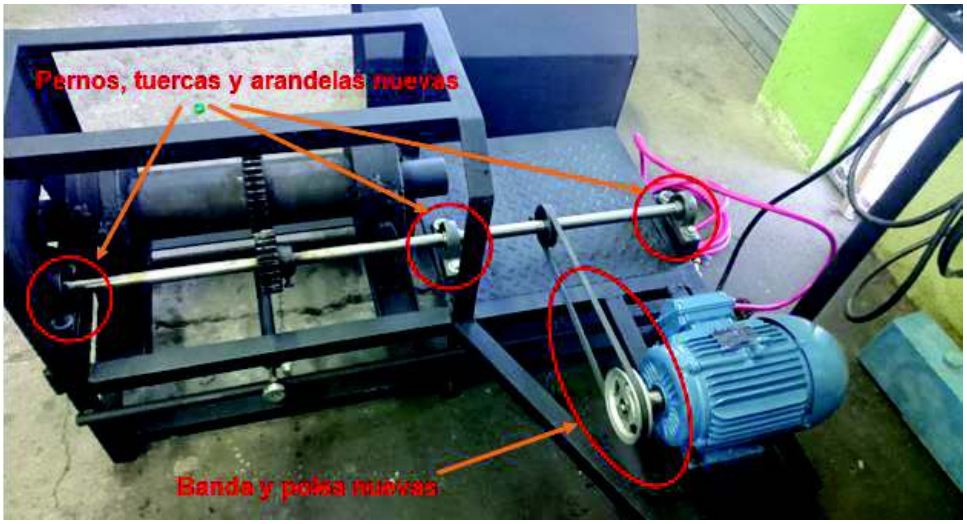


Figura 2.18. Adecuaciones en el sistema de transmisión.
(Fuente: Propia)

2.2.8. Otras modificaciones

Además de las modificaciones y adecuaciones mencionadas anteriormente, se realizaron unas modificaciones a la puerta de la máquina, debido a que la tapa de entrada del molde se aumentó en longitud, la puerta no cerraba, entonces se retiró la guía para el embudo ubicada en la puerta como se ve en la Figura 2.19 y se soldó unas platinas que permitan a esta guía ser unida a la puerta mediante pernos como se indica en la Figura 2.20.

Figura 2.19. Guía para embudo retirada de la puerta.
(Fuente: Propia)

Figura 2.20. Guía para embudo unida a la puerta mediante pernos.
(Fuente: Propia)

A la puerta se le realizó una perforación en su esquina superior para colocar un perno con tuerca mariposa (Figura 2.21) y de esta manera asegurar con mayor fuerza, evitando que se abra durante el funcionamiento de la máquina.

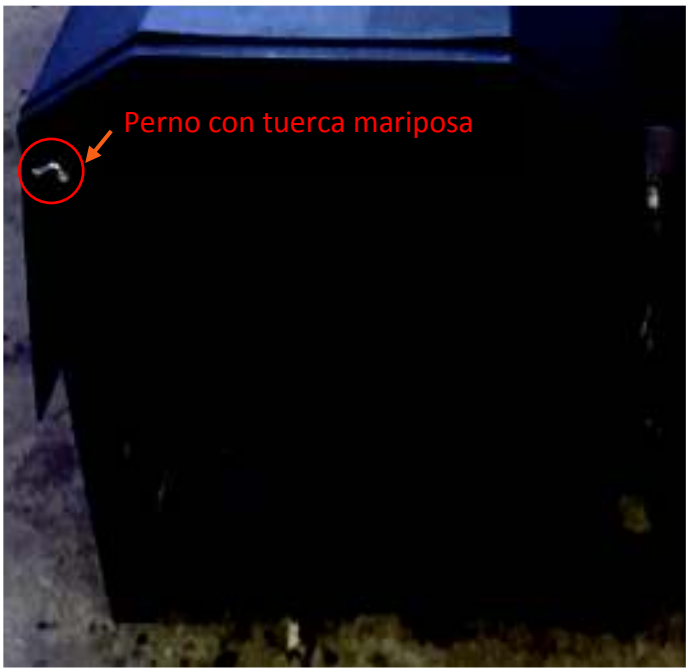


Figura 2.21. Perno con tuerca mariposa para asegurar la puerta.
(Fuente: Propia)

El embudo (Figura 2.22) que conduce el flujo de metal líquido hacia el molde también fue modificado, el extremo que va hacia el interior del molde se aumentó 3cm de longitud soldando un tubo de acero, esto se realizó para asegurar que la colada entre al molde ya que en un inicio este embudo era de menor longitud.

Figura 2.22. Embudo para alimentación de metal líquido.
(Fuente: Propia)

Por último, se cambió la conexión de gas de la hornilla de la máquina, debido a que la manguera anterior se encontraba deteriorada y no tenía una longitud adecuada y no tenía la válvula para el tanque. Los elementos reemplazados son las abrazaderas, la manguera y la válvula para el tanque de gas (Figura 2.23).

Figura 2.23. Conexión de gas de la hornilla cambiada.
(Fuente: Propia)

2.3. Protocolo experimental para la obtención de los tubos de aluminio sin costura

2.3.1. Parámetros de referencia

Los tubos serán obtenidos de acuerdo con la Tabla 2.4, los tres parámetros de estudio son: velocidad de rotación del molde, temperatura de precalentamiento y temperatura de colado.

Los valores referenciales que se indican en la Tabla 2.4, están seleccionados de acuerdo con las recomendaciones del Metals Handbook de la ASM Volume 15- Casting (Stefanescu, 1988) y a la bibliografía relacionada a la fundición centrífuga horizontal.

Los valores de velocidad de rotación del molde se seleccionaron en base a trabajos similares y teoría relacionada. El trabajo de Rao y Tattimani utilizan valores desde 600RPM a 1200RPM; Shailesh, Sundarrajan y Komaraiah utilizan velocidades desde 900RPM a 1440RPM. También se utilizó la Ecuación 2.1 que se encuentra en el libro Fundamentos de manufactura moderna de Groove, obteniendo un rango de trabajo de 1080RPM a 1247RPM.

$$N = \frac{30}{\pi}\sqrt{\frac{2gGF}{D}} \qquad \text{Ecuación 2.1}$$

Donde:

$N = Velocidad\ rotacional\ (RPM)$

$g = Aceleración\ de\ la\ gravedad\ \left(9.8\frac{m}{s^2}\right)$

$GF = Factor\ G, razón\ de\ la\ fuerza\ centrífuga\ dividida\ entre\ el\ peso\ (60 \leq GF \leq 80)$

$D = Diametro\ interior\ del\ molde\ (m)(0.092\ m)$

Las temperaturas de precalentamiento se seleccionaron en base al libro ASM Handbook de Stefanescu, donde nos indica que la temperatura de precalentamiento debe estar ente 150ºC a 260ºC.

La temperatura de colado es un parámetro que se determina en base a una fundición de prueba que se explica posteriormente. Para este valor también se tiene en consideración la Tabla 1.2, y la Figura 2.24 que es el diagrama pseudo-binario más utilizado para aluminio 6XXX.

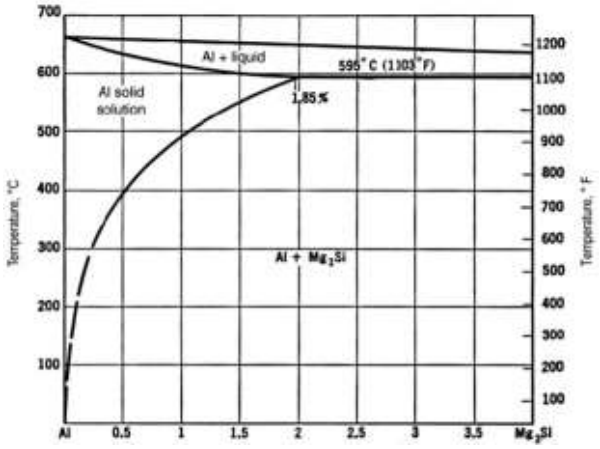


Figura 2.24. Diagrama pseudo-binario para aleaciones Al-Mg-Si.
(Fuente: Amado & Daroqui)

La manera en que de obtención de los tubos fue descrita en la parte inicial de Metodología. Los parámetros que se usaran en este trabajo se describen en la Tabla 2.4, donde $V_{óptima}$ es la velocidad de rotación del molde que se determinará en la inspección visual del primer grupo de cinco tubos y $T_{precalentamiento\ óptima}$ es la temperatura de precalentamiento del molde que se determinará al realizar la inspección visual del segundo grupo de cinco tubos.

Tabla 2.4. Valores referenciales de los parámetros para la obtención de los tubos de aluminio.

Número de tubo	Velocidad de rotación del molde (RPM)	Temperatura de Precalentamiento del molde (°C)	Temperatura de Colado (°C)
1	800	250	800
2	900	250	800
3	1000	250	800
4	1100	250	800
5	1200	250	800
6	$V_{óptima}$	150	800
7	$V_{óptima}$	200	800
8	$V_{óptima}$	250	800
9	$V_{óptima}$	300	800
10	$V_{óptima}$	350	800
11	$V_{óptima}$	$T_{precalentamiento\ óptima}$	750
12	$V_{óptima}$	$T_{precalentamiento\ óptima}$	775
13	$V_{óptima}$	$T_{precalentamiento\ óptima}$	800
14	$V_{óptima}$	$T_{precalentamiento\ óptima}$	825
15	$V_{óptima}$	$T_{precalentamiento\ óptima}$	850

(Fuente: Propia)

2.3.2. Procedimiento de obtención de los tubos de aluminio sin costura

En este proyecto la obtención de los tubos de aluminio sin costura se ha dividido en tres etapas:

a) Antes del proceso de fundición.
b) Durante el proceso de fundición y colado centrífugo.
c) Después del colado centrífugo.

Se ha decidido estas etapas luego de observar los problemas que ocurrieron durante la fundición de prueba. Con el objetivo de eliminar estos problemas, se detalla a continuación el procedimiento que se utilizó para la obtención de los quince tubos de aluminio sin costura:

a) Antes del proceso de fundición:

1. Verificar el estado de la grasa de los rodamientos, y en caso de ser necesario reponer la grasa perdida.
2. Limpiar y cubrir de grafito la superficie interna del molde y sus tapas, y posteriormente asegurar la unión molde-tapas.
3. Preparar la cantidad de chatarra de aluminio, fundente y desgasificante a usar.
4. Determinar la frecuencia a la que se debe encontrar el variador en el momento de colado, encendiendo la máquina y midiendo la velocidad de rotación del molde con un tacómetro hasta el valor deseado.

b) Durante el proceso de fundición y colado centrífugo:

1. Cargar la chatarra de aluminio en el crisol y encender el horno.
2. Encender la hornilla de la máquina de colado centrífugo para precalentar el molde.
3. Rotar el molde cada cierto tiempo para que el calor entregado por la hornilla sea lo más uniforme posible.
4. Verificar con la termocupla que el molde sea el primero en alcanzar la temperatura prevista antes que el aluminio fundido esté listo para colar. Una vez que el molde llegue a la temperatura deseada, se reducirá la intensidad de la llama de la hornilla.
5. Agregar el fundente cuando toda la chatarra de aluminio esté en estado líquido y escoriar la colada, luego agregar el desgasificante y volver a escoriar.

6. Calentar el embudo que sirve para dirigir la colada al interior del molde utilizando el flameador a gas.
7. Medir la temperatura de la colada con la termocupla sumergible y verificar que se encuentre a la temperatura deseada, anotar el valor de esta temperatura como dato.
8. Medir por última vez la temperatura de precalentamiento del molde y anotar su valor como dato.
9. Encender la máquina de colado centrífugo a la velocidad de rotación determinada.
10. Colar el aluminio fundido en la máquina a través del embudo de alimentación.
11. Retirar inmediatamente el embudo de la máquina luego de colar todo el aluminio del crisol, para evitar la vibración por el contacto entre el aluminio solidificado y el embudo.

c) Después del colado centrífugo:

1. Mantener la velocidad de rotación por alrededor de unos 30 segundos hasta que el tubo se solidifique.
2. Disminuir la velocidad progresivamente con el variador de frecuencia hasta un valor bajo (se recomienda disminuir hasta 15Hz) y luego apagar el variador de frecuencia para detener por completo la rotación.
3. Apagar la máquina de colado centrífugo.
4. Retirar la tapa de la salida del molde para extraer el tubo fundido.
5. Colocar el tubo obtenido en un lugar adecuado para que se enfríe a temperatura ambiente.

2.4. Prueba de cantidad de porosidad interna

2.4.1. Equipos utilizados para la prueba de porosidad

La prueba de porosidad se realizó utilizando los siguientes equipos (Figura 2.25):

- Balanza digital
- Vaso de precipitación de 1000 ml
- Jeringuilla de 60 ml
- Recipiente donde pueda sumergirse completamente el tubo de aluminio.

Balanza digital

Jeringilla y vaso de precipitación

Recipiente

Figura 2.25. Equipos utilizados para la prueba de porosidad.
(Fuente: Propia)

2.4.2. Método de densidad relativa

La densidad relativa de una sustancia es el cociente entre su densidad y la de otra sustancia diferente que se toma como referencia o patrón. (Garrido & Sánchez, 2011)
Para las pruebas que se van a realizar en este proyecto, la densidad del agua igual a $1\frac{g}{cc}$ se toma como patrón de referencia.

Aplicando la ecuación de densidad relativa:

$$\rho_r = \frac{\rho_{aluminio}}{\rho_{agua}} \qquad \text{Ecuación 2.2}$$

Donde:

$\rho_r = densidad\ relativa\ del\ aluminio\ \left(\frac{g}{cc}\right)$

$\rho_{aluminio} = densidad\ del\ aluminio\ \left(\frac{g}{cc}\right)$

$\rho_{agua} = densidad\ del\ agua\ \left(\frac{g}{cc}\right)$

Como la densidad del agua es igual a $1\frac{g}{cc}$ entonces de la Ecuación 2.2 se obtiene que la densidad relativa del aluminio será igual a la densidad del aluminio que se obtiene en tablas cuyo valor es de $2{,}7\frac{g}{cc}$ (Groover, 2007)

Como la densidad de un material es su peso por unidad de volumen. (Groover, 2007). El volumen desplazado por el tubo al ser sumergido en el recipiente con agua es igual al volumen del tubo de aluminio, por el principio de Arquímedes. (Garrido & Sánchez, 2011) Entonces se obtiene la ecuación:

$$\rho_r = \frac{W_{tubo}}{V_{tubo}} \qquad \text{Ecuación 2.3}$$

Donde:

$\rho_r =$ densidad relativa del aluminio $\left(\frac{g}{cc}\right)$

$W_{tubo} =$ peso del tubo de aluminio (g)

$V_{tubo} =$ volumen desplazado por el tubo al ser sumergido en el recipiente con agua (cc)

La porosidad interna se determina con la siguiente ecuación:

$$Porosidad_{tubo} = 100 - \left(\frac{\rho_r * 100}{\partial_{Al}}\right) \qquad \text{Ecuación 2.4}$$

Donde:

$Porosidad_{tubo} =$ porcentaje de porosidad del tubo (%)

$\rho_r =$ densidad relativa del aluminio $\left(\frac{g}{cc}\right)$

$\rho_{Al} =$ densidad del aluminio $\left(2{,}7\ \frac{g}{cc}\right)$

Con el valor del peso del tubo obtenido en la balanza y el volumen desplazado se utiliza la Ecuación 2.3 para obtener la densidad relativa, esta a su vez se reemplaza en la Ecuación 2.4 para obtener el porcentaje de porosidad del tubo de aluminio.

2.4.3. Procedimiento para prueba de porosidad

El procedimiento empleado para realizar la prueba de porosidad en los tubos es el siguiente:

1. Llenar el recipiente con agua a un nivel donde el tubo quede sumergido completamente y marcar en el recipiente este nivel.
2. Pesar el tubo de aluminio en la balanza y anotar su valor.
3. Sumergir completamente el tubo en el recipiente con agua y esperar que el agua se estabilice.
4. Retirar el volumen que se desplaza debido al peso del tubo, con el uso del vaso de precipitación y la jeringuilla hasta la marca realizada en el paso 1.
5. Anotar el valor de volumen retirado.
6. Retirar el tubo del recipiente y agregar más agua hasta la marca inicial para compensar el agua derramada durante el retiro del tubo.
7. Repetir desde el paso 2 para los demás tubos.

2.5. Medición de rugosidad

2.5.1. Textura superficial

Las superficies reales, por más perfectas que sean, presentan particularidades que son una marca del método empleado para su obtención, por ejemplo: torneado, fresado, rectificado, bruñido, lapidado, etc. Las superficies así producidas se presentan como conjunto de irregularidades, espaciamiento regular o irregular y que tienden a formar un patrón o textura característica en su extensión. En esta textura superficial se distinguen dos componentes distintos: rugosidad y ondulación. (GTM-Grupo Tecnología Mecánica)

- La rugosidad o textura primaria, está formada por surcos o marcas dejadas por los agentes que atacan la superficie en el proceso de mecanizado (herramienta, partículas abrasivas, acción química, etc.) y se encuentra superpuesta al perfil de ondulación.
- La ondulación o textura secundaria es el conjunto de irregularidades repetidas en ondas de paso mucho mayor que la amplitud y que pueden ocurrir por diferencia en los movimientos de la máquina-herramienta, deformación por tratamiento térmico, tensiones residuales de forja o fundición, etc.

Para estudiar y crear sistemas de evaluación del estado de las superficies es necesario definir previamente diversos conceptos, estos se mencionan a continuación:

- Superficie ideal: es la superficie ideal, por definición sin errores, perfecta. Ejemplo superficie plana (Figura 2.26), cilíndrica, etc. (GTM-Grupo Tecnología Mecánica)

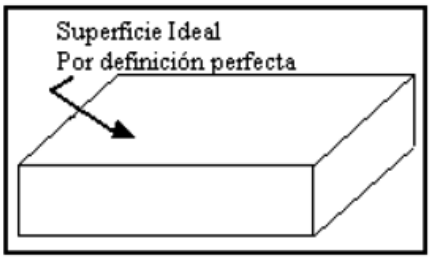


Figura 2.26. Representación de superficie ideal plana.
(Fuente: GTM-Grupo Tecnología Mecánica)

- Perfil ideal: perfil resultante del corte de una superficie ideal por un plano perpendicular (Figura 2.27). En algunas normas esta característica es denominada perfil nominal, y es el perfil ideal, por definición sin errores. (GTM-Grupo Tecnología Mecánica)

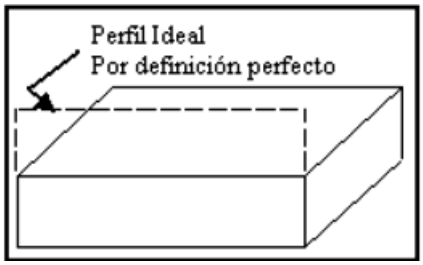


Figura 2.27. Representación del Perfil ideal.
(Fuente: GTM-Grupo Tecnología Mecánica)

- Superficie real: es la superficie que limita al cuerpo y la separa del medio ambiente (Figura 2.28). (GTM-Grupo Tecnología Mecánica)

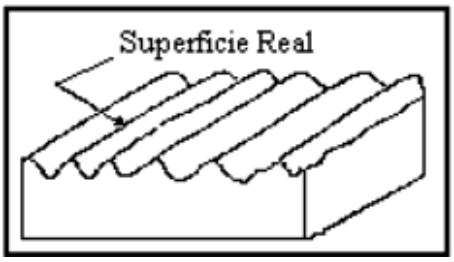


Figura 2.28. Representación de la Superficie real.
(Fuente: GTM-Grupo Tecnología Mecánica)

- Perfil real: es el perfil resultante de cortar una superficie real por un plano definido en relación con la superficie ideal. Limita la sección material y la separa del medio ambiente, incluida la ondulación (Figura 2.29). (GTM-Grupo Tecnología Mecánica)

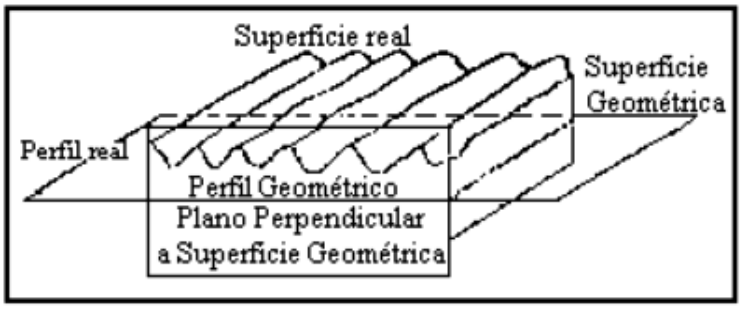


Figura 2.29. Representación del Perfil real.
(Fuente: GTM-Grupo Tecnología Mecánica)

- Perfil Efectivo: imagen aproximada de un perfil real obtenido por medio de evaluación o medición. Este perfil es función de las características geométricas y físicas del instrumento de medición y de la técnica utilizada para su evaluación. No es filtrado y su diferencia con el perfil real es una cierta deformación causada por la imprecisión del aparato. (GTM-Grupo Tecnología Mecánica)

- Perfil de rugosidad: se obtiene a partir del perfil efectivo por un instrumento de evaluación con sistema de filtrado (filtrado de ondas) para excluir otras irregularidades (ondulación, por ejemplo), en la Figura 2.30 se puede observar un perfil de rugosidad. (GTM-Grupo Tecnología Mecánica)

Figura 2.30. Perfil de rugosidad.
(Fuente: GTM-Grupo Tecnología Mecánica)

- Sistema “M” o de la línea media: en este sistema, la línea de referencia utilizada es la línea media (Figura 2.31), que se define como la línea localizada en la parte media del perfil de rugosidad, dispuesta paralela a la dirección general del perfil, dentro de los límites comprendidos como base de medición, de modo que la suma de las áreas por encima de ella sean exactamente iguales a la suma de las áreas que están por debajo. (GTM-Grupo Tecnología Mecánica)

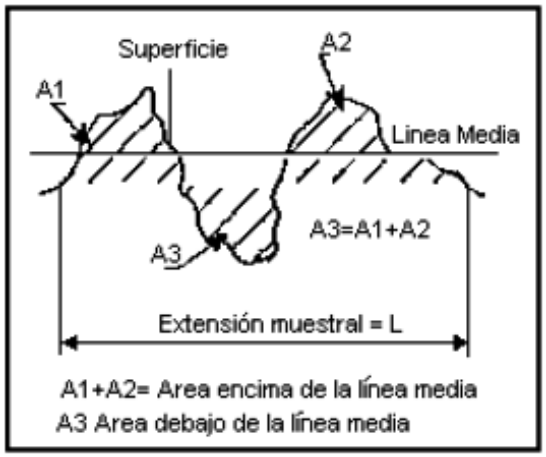


Figura 2.31. Sistema “M” o de la línea media.
(Fuente: GTM-Grupo Tecnología Mecánica)

- Módulo de medición: también conocido como CUT-OFF y no debe ser confundido con la longitud de medición. Su función es la de actuar como filtro y normas internacionales establecen cinco veces el módulo como mínimo para realizar una evaluación de la rugosidad de la superficie. En la Figura 2.32 se observa que el módulo de medición es la longitud L_1= L_2= L_3= L_4= L_5, L_m es la longitud de medición, L_v es la longitud inicial, L_n es la longitud final y L_t es la longitud total de medición. (GTM-Grupo Tecnología Mecánica)

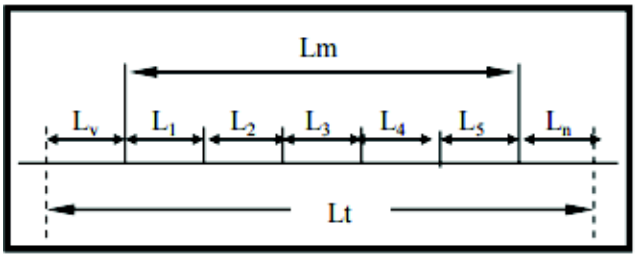


Figura 2.32. Representación de las longitudes de medición de rugosidad.
(Fuente: GTM-Grupo Tecnología Mecánica)

2.5.2. Parámetros de rugosidad

El Grupo de Tecnología Mecánica – GTM indican varios parámetros de rugosidad que se pueden utilizar para cuantificar el valor de rugosidad de una superficie, los más comunes son:

- Rugosidad media aritmética (Ra): es la media aritmética de los valores absolutos de las coordenadas de los puntos del perfil de rugosidad con relación a la línea media dentro de la longitud de medición.

- Rugosidad media cuadrática (Rq): se define como la raíz cuadrada de la media de los cuadrados de las ordenadas del perfil efectivo con relación a la línea media en un módulo de medición.
- Rugosidad parcial Zi: es igual a la suma de las ordenadas (en valor absoluto) de los puntos más alejados de la línea media dentro de cada módulo.
- Rugosidad media (Rz) (DIN 4768): es la media aritmética de los valores de rugosidad parcial Zi correspondientes a cada uno de los cinco módulos integrantes de la longitud de medición.
- Rugosidad máxima (Rmáx): es la mayor de las rugosidades parciales (zi) que se presentan en la longitud de medición.
- Profundidad total de la rugosidad (Rt): es la distancia vertical entre el pico más alto y el valle más profundo dentro de la longitud de medición. (GTM-Grupo Tecnología Mecánica)
- Cresta mayor del perfil (Rp): distancia entre el punto más alto del perfil y la línea media.
- Valle más profundo (Rv): distancia entre el punto más bajo del perfil y la línea media.

En la Figura 2.33, se indican los parámetros Rt, Rp, Rv que se utilizan para cuantificar el valor de rugosidad de una superficie.

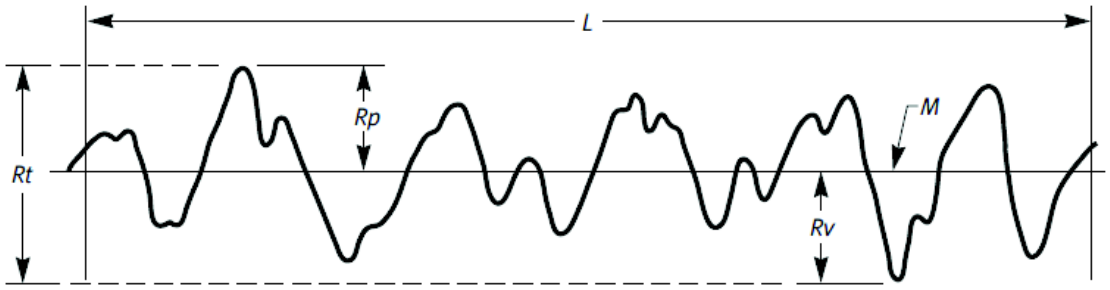


Figura 2.33. Parámetros Rt, Rp, Rv de un perfil de rugosidad.
(Fuente: ASME, 2010)

2.5.3. Rugosidad media aritmética (Ra)

En este proyecto la rugosidad superficial de los tubos se la cuantifica con el parámetro Ra, que es la media aritmética de los valores absolutos de las coordenadas de los puntos del perfil de rugosidad en relación con la línea media dentro de la longitud de medición. (GTM-Grupo Tecnología Mecánica).

En la Figura 2.34 se representa gráficamente Ra en el perfil de rugosidad.

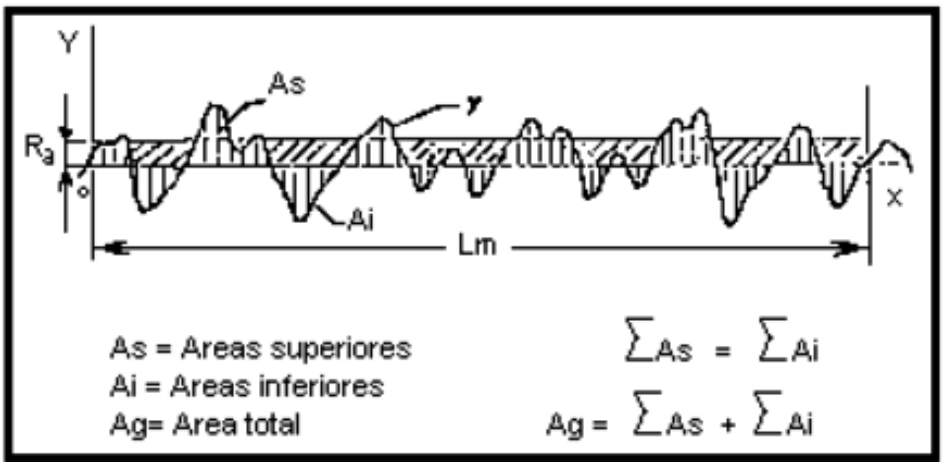


Figura 2.34. Parámetro Ra en el perfil de rugosidad.
(Fuente: GTM-Grupo Tecnología Mecánica)

De acuerdo con el Grupo de Tecnología Mecánica – GTM, la utilización del parámetro Ra es aplicado en las siguientes situaciones:

- Cuando sea necesario el control de la rugosidad en forma continua en las líneas de producción, debido a la facilidad de obtención del resultado.
- Superficies donde el acabado presenta los surcos de mecanizado bien orientados (torneado, fresado)
- Superficies rectificadas, bruñidas, lapidadas, etc.
- Superficies de poca responsabilidad, por ejemplo, acabados con fines apenas estéticos.

Las ventajas que el Grupo de Tecnología Mecánica – GTM menciona con la utilización del parámetro Ra son:

- Es el parámetro más utilizado en todo el mundo.
- Es un parámetro aplicable a la mayoría de los procesos de fabricación.
- Debido a su gran utilización, casi la totalidad de los equipos presentan este parámetro, en forma analógica o digital.
- Las marcas inherentes al proceso de mecanizado no alteran sustancialmente su valor.
- Para la mayoría de las superficies la distribución está de acuerdo con la curva de Gauss y es generalmente observado que el valor de Ra da un buen parámetro estadístico que caracteriza la distribución de amplitud.

Existen varias ventajas al utilizar el parámetro de rugosidad Ra, sin embargo, también tiene desventajas y el Grupo de Tecnología Mecánica – GTM indica las siguientes:

- El valor de Ra en un módulo de medición representa la media de la rugosidad, por eso un pico o valle no típico en una superficie, va a alterar el valor de la medida, no representando fielmente el valor medio de la rugosidad.
- El valor de Ra no define la forma de la irregularidad de un perfil, de esa forma podremos tener un valor de Ra prácticamente igual para superficies con procesos de acabado diferentes.
- Ninguna distinción es hecha entre picos y valles.
- Para algunos procesos de fabricación donde hay una diferencia muy alta de picos y valles, como ocurre en los sinterizados, el parámetro no es el adecuado, ya que la distorsión provocada por el filtro eleva el error a niveles inaceptables.

2.5.4. Medición de rugosidad en los tubos de aluminio sin costura

La medición de rugosidad de los tubos de aluminio se realizó en el Centro de Investigación y Recuperación de Turbinas Hidráulicas y Partes Industriales (CIRT), que es administrado por CELEC EP Hidroagoyán y se encuentra ubicado en baños de Agua Santa. El CIRT (Figura 2.35) colaboró en este proyecto con los rugosímetros necesarios para la medición de rugosidad del molde y la de los tubos de aluminio sin costura obtenidos por colado centrífugo horizontal.

Figura 2.35. Centro de Investigación y Recuperación de Turbinas Hidráulicas y Partes Industriales-CIRT.
(Fuente: Propia)

La franja extraída (Figura 2.36) de cada tubo para realizar el maquinado de las probetas para el ensayo de tracción y espectrometría, fue utilizada para medir su rugosidad. Esta franja fue dividida en tres partes como se indica en la Figura 2.37.

Figura 2.36. Franja extraída del tubo de aluminio para realizar el ensayo de tracción.
(Fuente: Propia)

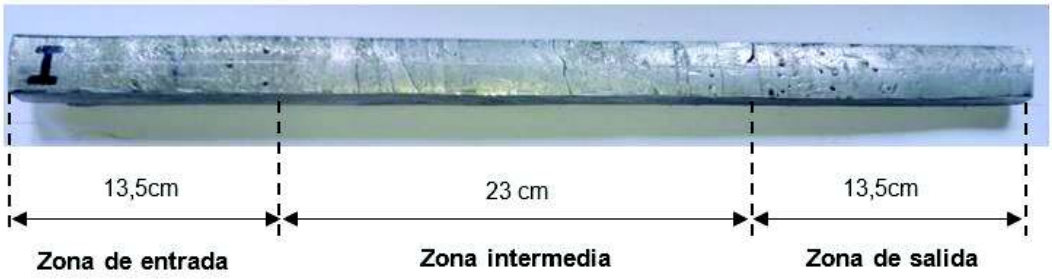


Figura 2.37. Franja dividida en zonas.
(Fuente: Propia)

La rugosidad de las franjas fueron medidas con un rugosímetro digital marca INSIZE modelo ISR-C100 (Figura 2.38) y cuyas especificaciones se indican en la Tabla 2.5.

Figura 2.38. Medición con rugosímetro INSIZE ISR-C100.
(Fuente: Propia)

Tabla 2.5. Especificaciones técnicas del rugosímetro INSIZE ISR-C100.

Parámetros		Ra, Rq, Rz, Rv, Rp, Rm, Rt, RS, Rsm, R3z, R3y, Rz (JIS), Rku, Rsk, Rmax, Rpc
Rango		160 µm
Exactitud		± 10%
Resolución (Ra)		0.001 µm
Sonda	**Tipo**	Inductivo
	Palpador radio/ángulo	5 µm/90°
	Material del palpador	diamante
Fuerza de medición		0.4mN
Unidad de medición		µm/ µin
Cut off		0.25/ 0.8/ 2.5 mm
Número de cut-offs		1 a 5
Velocidad de desplazamiento		0.5 mm/s ó 1 mm/s
Memoria		100 resultados de medición
Salida		USB y bluetooth
Energía		Batería recargable incorporada
Dimensiones (LxWxH)		140x52x48 mm
Peso		440g

(Fuente: INSIZE)

El procedimiento empleado en la medición es el siguiente:

1. Encender el rugosímetro y configurar la distancia y número CUT-OFF (en este proyecto se utilizó un número de 5 Cut-off de 0.8 mm de longitud cada uno, por lo tanto, se midió la rugosidad en una longitud total de alrededor de 4 mm).
2. Seleccionar la velocidad de avance del palpador (en este proyecto 1 mm/s).
3. Colocar la base del rugosímetro sobre la superficie a medir hasta que el rugosímetro señale que se encuentra nivelado y listo para ejecutar la medición.
4. Pulsar el botón START para que el palpador recorra la superficie a medir y el valor de Ra se muestre en la pantalla.

La rugosidad superficial del molde también fue medida, por las dimensiones del molde no se pudo utilizar el rugosímetro indicado anteriormente por lo que se utilizó un modelo diferente. El rugosímetro empleado en el molde fue el rugosímetro digital de marca INSIZE modelo ISR-S1000B (Figura 2.39) y cuyas especificaciones técnicas se indican en la Tabla 2.6. Este rugosímetro se caracteriza porque el palpador y la pantalla de visualización de parámetros están separados, el palpador es ajustable a diferentes alturas y tiene mayor longitud de medición, además la cantidad de parámetros de rugosidad mostradas en la pantalla es mayor y también tiene la posibilidad de que los resultados puedan ser imprimidos en ese instante.

Tabla 2.6. Especificaciones técnicas del rugosímetro INSIZE ISR-S1000B.

Parámetros		Ra, Rq, Rt, Rz, Rp, Rv, Rc, Rsk, Rku, RSm, Rδc, RPc, Pa, Pq, Pt, Pp, Pv, Pc, Psm, Pδc, PPc, Wa, Wq, Wt, Wz, Wp, Wv, Wc, Wsm, Wδc, WPc, Rk, Rpk, Rvk, Mr1, Mr2, Rmax, R3z, R3zm, R, AR, Rx, Aw, Rke, Rpke, Rvke, Mr1e, Mr2e
Rango		1000 µm
Exactitud		± 3%
Resolución (Ra)		0.001 µm
Sonda	**Tipo**	Inductivo
	Palpador radio/ángulo	5 µm/90°
	Material del palpador	diamante
Fuerza de medición		0.75mN
Unidad de medición		µm/ µin
Cut off		0.08 / 0.25 / 0.8/ 2.5/ 8 mm
Número de cut-offs		1-19 (cut-off 0.08/ 0.25/ 0.8/ 2.5 mm)
		1-5 (cut off 8 mm)
Velocidad de desplazamiento		0.5 mm/s ó 1 mm/s
Memoria		1000 resultados de medición
Salida		USB
Energía		Batería recargable incorporada
Dimensiones (LxWxH)		320x210x80mm
Peso		2.2kg

(Fuente: INSIZE)

Figura 2.39. Rugosímetro INSIZE ISR-S1000B.
(Fuente: Propia)

El procedimiento empleado para la medición de rugosidad en el molde es el siguiente:

1. Colocar el palpador del rugosímetro sobre la superficie interna del molde que se va a medir. (Figura 2.40)
2. Encender el rugosímetro y configurar la distancia y número CUT-OFF (para el molde se utilizó un número de 5 Cut-off de 8 mm de longitud cada uno, la longitud total medida es de 48 mm).
3. Seleccionar la velocidad de avance del palpador (se seleccionó 1 mm/s).
4. Pulsar el botón de inicio para que el palpador recorra la superficie a medir y los parámetros de rugosidad se muestren en la pantalla. (Figura 2.41)

Figura 2.40. Palpador del rugosímetro ubicado en el interior del molde.
(Fuente: Propia)

Figura 2.41. Parámetros de rugosidad en la pantalla del rugosímetro.
(Fuente: Propia)

2.6. Ensayo de Tracción

2.6.1. Generalidades

En el ensayo de tracción se somete a una probeta sobre la que se ha marcado una longitud, llamada distancia entre puntos a un esfuerzo de tracción, que se aumenta progresivamente hasta la rotura de la probeta. (Rodríguez, Llardent, González, & García, 2012)

Las propiedades mecánicas que se pueden cuantificar a partir de los parámetros obtenidos en el ensayo de tracción son las siguientes: rigidez intrínseca, resistencia mecánica a la tracción, ductilidad y tenacidad. (Rodríguez, Llardent, González, & García, 2012)

- Rigidez intrínseca: el módulo de Young es el parámetro que mide la rigidez intrínseca de los materiales, Este módulo constituye el parámetro de selección y de diseño.
- Resistencia mecánica: El límite elástico o resistencia a la cedencia es el parámetro que cuantifica la resistencia mecánica en los metales. La resistencia a la cedencia, la resistencia a la tracción y la tensión de fallo son parámetros de selección y de diseño.

- Ductilidad: se mide a través del alargamiento porcentual a la fractura, a partir de la longitud inicial y la final después del ensayo, a veces se utiliza la estricción que se obtiene de las áreas inicial y final en la zona de fractura.
- Tenacidad: la tenacidad de un material está relacionada con la energía absorbida por el mismo, la energía por unidad de volumen absorbida hasta un esfuerzo equivalente a la resistencia a la cedencia se denomina módulo de resiliencia. La energía por unidad de volumen absorbida hasta la fractura se conoce como módulo de tenacidad.

2.6.2. Equipo para el ensayo de tracción

El ensayo de tracción se lo realizó en el Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la EPN. El equipo utilizado para el ensayo es un calibrador pie de rey y la máquina universal de ensayos Tinius Olsen Super L-120 (Figura 2.42) cuyas especificaciones técnicas se indican en la Tabla 2.7.

Figura 2.42. Máquina Universal de Ensayos Tinius Olsen Super L-120.
(Fuente: Propia)

Tabla 2.7. Especificaciones técnicas de la máquina universal de ensayos Timius Olsen Super L-120.

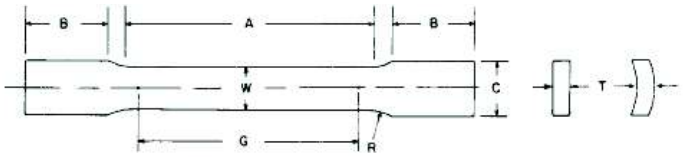
Marca	Tinius Olsen	
Modelo	Super L-120	
Tipo	Hidráulico	
Display	Digital	
Capacidad de carga	120000 lbf / 600 kN / 60000 kgf	
Carrera	6 in / 152 mm	
Velocidades de prueba	0-3 in/min 0-76 mm/min	
Velocidad de cruceta ajustable	12 in/min 305 mm/min	
Peso neto	4700 lbs / 2132 kg	
Dimensiones de la máquina	Ancho	30 in / 762 mm
	Profundidad	25 in / 635 mm
	Altura	77 in / 1956 mm
Dimensiones de la consola UTM	Ancho	36 in / 915 mm
	Profundidad	31 in / 788 mm
	Altura	40 in / 1016 mm

(Fuente: Tinius Olsen, 2010)

2.6.3. Probetas para el ensayo de tracción

Las probetas utilizadas en el ensayo de tracción fueron maquinadas a partir de la zona intermedia (Figura 2.37) de las franjas extraídas de cada tubo. La norma ASTM E8 Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials; establece las dimensiones que debe tener la probeta para el ensayo de tracción.

En el presente proyecto se tomarán las dimensiones del Specimen 1 que se indica la norma ASTM E8, presentada en la Figura 2.43. Estas probetas fueron maquinadas en el Laboratorio de Máquinas y Herramientas de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la EPN y su resultado se indica en la Figura 2.44.



	Dimensions						
	Specimen 1	Specimen 2	Specimen 3	Specimen 4	Specimen 5	Specimen 6	Specimen 7
	mm [in.]	mm [in.]	mm [in.]	mm [in.]	mm [in.]	mm [in.]	mm [in.]
G—Gage length	50.0 ± 0.1 [2.000 ± 0.005]	50.0 ± 0.1 [2.000 ± 0.005]	200.0 ± 0.2 [8.00 ± 0.01]	50.0 ± 0.1 [2.000 ± 0.005]	100.0 ± 0.1 [4.000 ± 0.005]	50.0 ± 0.1 [2.000 ± 0.005]	100.0 ± 0.1 [4.000 ± 0.005]
W—Width (Note 1)	12.5 ± 0.2 [0.500 ± 0.010]	40.0 ± 2.0 [1.5 ± 0.125-0.25]	40.0 ± 0.2 [1.5 ± 0.125,-0.25]	20.0 ± 0.7 [0.750 ± 0.031]	20.0 ± 0.7 [0.750 ± 0.031]	25.0 ± 1.5 [1.000 ± 0.062]	25.0 ± 1.5 [1.000 ± 0.062]
T—Thickness	measured thickness of specimen						
R—Radius of fillet, min	12.5 [0.5]	25 [1]	25 [1]	25 [1]	25 [1]	25 [1]	25 [1]
A—Length of reduced section, min	60 [2.25]	60 [2.25]	230 [9]	60 [2.25]	120 [4.5]	60 [2.25]	120 [4.5]
B—Length of grip section, min (Note 2)	75 [3]	75 [3]	75 [3]	75 [3]	75 [3]	75 [3]	75 [3]
C—Width of grip section, approximate (Note 3)	20 [0.75]	50 [2]	50 [2]	25 [1]	25 [1]	40 [1.5]	40 [1.5]

Figura 2.43. Dimensiones de las probetas del ensayo de tracción para productos tubulares de diámetro grande.
(Fuente: American Association of State Highway and Transportation Officials, & American Society for Testing and Materials, 2009)

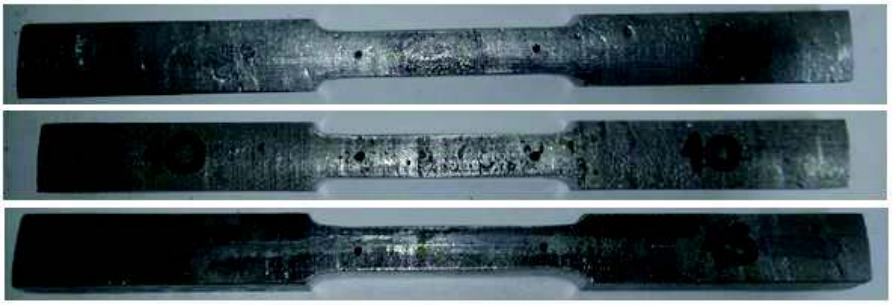


Figura 2.44. Probetas para el ensayo de tracción.
(Fuente: Propia)

2.6.4. Procedimiento para el ensayo de tracción

El procedimiento seguido durante la realización del ensayo de tracción se indica a continuación:

1. Preparar las probetas de acuerdo con las dimensiones establecidas en la norma ASTM E8.
2. Marcar la longitud calibrada de 50 ± 0,1 mm en la probeta.
3. Colocar la probeta en la máquina universal de ensayos y sujetar con las mordazas o boquillas para evitar su deslizamiento.
4. Configurar los parámetros de la máquina universal de ensayo por medio de su software.

5. Encender la máquina universal para iniciar el ensayo.
6. Guardar los datos entregados por el software al final del ensayo.
7. Retirar la probeta ensayada.
8. Medir la longitud final de la probeta ensayada utilizando el calibrador pie de rey.

2.7. Espectrometría

2.7.1. Análisis de espectrometría por chispa

Es un método estándar para el análisis directo de muestras metálicas, de gran utilidad en fabricación y control de la industria del metal. (Universidad Politécnica de Cartagena, s.f.) Este tipo de análisis permite determinar la composición química o los elementos presentes en una muestra, así como el porcentaje de cada uno de ellos. Este método consiste en detectar las longitudes de onda característica de cada elemento cuando sus electrones son excitados mediante una chispa. (Calidad y Técnica Industrial, S.A. de C.V.-CYTI, s.f.)

La chispa se obtiene entre electrodos, lo que produce un plasma de vapor en el cátodo, de una temperatura mayor de 10000 K. Esta técnica permite la determinación rápida y simultánea de muchos elementos químicos en aleaciones, incluyendo elementos ligeros como C, S, B y P, por lo que es complementaria con la espectrometría de fluorescencia de rayos X para análisis metalúrgicos. (Universidad Politécnica de Cartagena, s.f.)

2.7.2. Espectrómetro

El análisis de espectrometría por chispa se realizó en el Laboratorio de Fundición de la EPN, empleando el espectrómetro marca BRUKER modelo Q2 ION que se observa en la Figura 2.45 y cuyas especificaciones técnicas se indican en la Tabla 2.8.

Figura 2.45. Espectrómetro BRUKER Q2 ION.
(Fuente: BRUKER, 2017)

Tabla 2.8. Especificaciones técnicas del espectrómetro BRUKER Q2 ION.

Paquetes de soluciones analíticas **Analytical Solution Packages (ASP)**
• Diferentes paquetes de calibración de matriz disponibles • ASPs cubren todos los elementos principales y grupos de aleaciones
Soporte de chispa
• Libre de mantenimiento • Consumo de argón 2.5 l/min durante la medición • Calidad del argón 4.8 (o mejor)
Datos eléctricos
• 100 a 240 V (50/60Hz) • 200 W durante la medición, 25 W en espera • Fusible de acción lenta 16 A (240 V) o Fusible de acción lenta 25 A (100 V)
Dimensiones y Peso
• Ancho 440 (600) mm / 17 (24) pulgadas • Altura 530 (1280) mm / 22 (50) pulgadas • Profundidad 390 (630) mm / 15 (25) pulgadas • Peso ~ 28 (115) kg / ~ 62 (254) lbs *Los valores en (paréntesis) se refieren a la versión con soporte en el piso.

(Fuente: BRUKER, 2017)

2.7.3. Probetas para análisis de espectrometría

Las probetas empleadas en el análisis de espectrometría por chispa fueron obtenidas a partir de las zonas de entrada y de salida que se indican en la Figura 2.37. En este análisis las probetas deben poseer una superficie plana, por eso se las realizó un fresado para cumplir este requisito como se observa en la Figura 2.46.

Figura 2.46. Probetas para el análisis de espectrometría.
(Fuente: Propia)

2.7.4. Procedimiento para el análisis de espectrometría por chispa

La probeta es ubicada en el espectrómetro para que la chispa que se genera actué directamente sobre la superficie de la muestra, calentando lo suficiente para excitar los átomos, estos al ser excitados emiten ondas que inciden sobre el espectroscopio, el mismo que entrega de manera cuantitativa los porcentajes de los elementos aleantes del aluminio basándose en las longitudes de onda características de cada elemento. (Morales & Villamarín, 2017)

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este capítulo se presentan los resultados y discusiones correspondientes del estudio de la variación de la velocidad de rotación del molde, la temperatura de precalentamiento del molde y la temperatura de colado para la obtención de los tubos de aluminio sin costura. Resultados que fueron obtenidos a partir de la prueba de cantidad de porosidad interna, medición de rugosidad, ensayo de tracción y el análisis de espectrometría.

3.1. Fundición de prueba

3.1.1. Resultados

La principal razón para la realización de la fundición de prueba, antes del proceso de obtención de tubos para el estudio paramétrico, fue verificar, que, con las modificaciones realizadas a algunos componentes de la máquina de colado centrífugo horizontal, los problemas que presentaba hayan sido eliminados o mitigados. Esta fundición también ayudó a determinar la manera en que se ejecutará este proceso de obtención de tubos por colado centrífugo.

Con esta fundición también se determinó los siguientes aspectos del proceso:

- La temperatura de colado del aluminio que generalmente se alcanza en el horno de crisol a gas del laboratorio de fundición, cuando todo el aluminio cargado en el crisol se funde.
- La manera de tomar las mediciones de temperatura del molde, que será la temperatura de precalentamiento.

Como resultado de la fundición de prueba se obtuvo las siguientes observaciones del proceso:

- La máquina de colado centrífugo ya no presenta ninguna fuga del metal líquido por las tapas del molde y por lo tanto es apta para su operación.
- La temperatura de colado del aluminio que se obtiene en el horno está alrededor de los 800°C.
- El vertido del aluminio fundido se realizó sobre los quince segundos, obteniéndose como resultado un tubo con fundición incompleta, ver Figura 3.1.

- La temperatura de precalentamiento del molde se tomó con la termocupla tipo K sin vaina haciendo contacto en la superficie interna del molde, como se muestra en la Figura 3.2. Obteniéndose un valor de alrededor 150°C.
- El molde requería girarse durante su calentamiento para que el calor se distribuya de manera uniforme.
- La velocidad de rotación empleada para obtener el tubo fue de 600 RPM (25,5Hz) y se presentan vibraciones moderadas en la máquina.

Figura 3.1. Tubo con fundición incompleta.
(Fuente: Propia)

Figura 3.2. Esquema de medición de temperatura del molde.
(Fuente: Propia)

Como se mencionó anteriormente en las observaciones, la máquina de colado centrífugo podía ser operada sin generar riesgo durante el proceso. Por lo tanto, se procedió con la obtención de tubos para el estudio paramétrico, enfocado en la variación de los parámetros de velocidad del molde, temperatura de precalentamiento del molde y la temperatura de colado.

3.1.2. Análisis de la fundición de prueba

La temperatura del aluminio excede en más de 100ºC la temperatura de fundición recomendado en la Tabla 1.2. Esto se debe que el horno no cuenta con un dispositivo que permita controlar la temperatura de la colada a un valor específico. Y por ello se decidió mantener la chatarra de aluminio en el crisol hasta que este se haya fundido completamente.

Debido a la velocidad de vertido muy lenta en la fundición de prueba, resultó un tubo incompleto, es por ello, que para los tubos fundidos destinados al estudio paramétrico el vertido debe ser más rápido.

Luego de terminar de verter el aluminio fundido, retirar inmediatamente el embudo de alimentación ya que los restos de aluminio que se quedan en este se solidifican junto al tubo, ocasionando fuertes vibraciones en la máquina.

Todos los componentes de la máquina de colado centrífugo funcionan correctamente, por lo tanto, se puede continuar con la obtención de los tubos variando los parámetros de estudio sin ningún problema.

3.2. Proceso de obtención de los tubos destinados al estudio paramétrico

3.2.1. Parámetros reales del proceso de colado centrífugo

Los parámetros descritos en la Tabla 2.4 son valores referenciales, en la práctica se obtuvieron valores cercanos, y se presentan en la Tabla 3.1, donde también se especifica la frecuencia utilizada en el variador para controlar la velocidad.

Tabla 3.1 Valores reales de los parámetros del proceso.

Número de Tubo	Velocidad (RPM)	Frecuencia (Hz)	Temperatura Precalentamiento (°C)	Temperatura Colado (°C)
1	679	30	250	800
2	901	39,7	255	817
3	1000	44,1	255	814
4	1097	48,6	260	825
5	1198	52,7	257	814
6	1198	52,7	165	801
7	1198	52,7	207	810
8	1198	52,7	243	810
9	1198	52,7	297	790
10	1198	52,7	340	804
11	1198	52,7	351	750
12	1198	52,7	347	774
13	1198	52,7	353	802
14	1198	52,7	355	824
15	1198	52,7	365	852

(Fuente: Propia)

3.2.2. Tiempo del proceso de colado centrífugo

En la Tabla 3.2 se muestran los siguientes tiempos:

- Tiempo de fundición. - Es el tiempo desde que se enciende el horno hasta que se apaga y se retira el crisol con el metal fundido.

- Tiempo de colado centrífugo. - Es el tiempo desde que se vierte el metal fundido en la máquina de colado centrífugo hasta que el tubo es retirado del molde.
- Tiempo de vertido. - Es el tiempo en que se demoró el vaciar el metal fundido del crisol al molde.
- Tiempo total del proceso. - Es la sumatoria del tiempo de fundición y del tiempo de colado centrífugo.

Tabla 3.2. Tiempos relacionados al proceso de obtención de los tubos.

Número de Tubo	Tiempo de Fundición	Tiempo de Colado Centrífugo (min)	Tiempo de vertido (segundos)	Tiempo Total del Proceso
1	1h 42 min	8	8	1h 50 min
2	1h 36 min	9	8	1h 45 min
3	1h 47 min	8	12	1h 55 min
4	1h 23 min	7	7	1h 30 min
5	1h 38 min	7	6	1h 45 min
6	1h 49 min	6	7	1h 55 min
7	1h 10 min	5	7	1h 15 min
8	1h 55 min	5	6	2h 00 min
9	1h 04 min	6	7	1h 10 min
10	1h 53 min	7	6	2h 00 min
11	1h 37 min	8	5	1h 45 min
12	1h 29 min	6	5	1h 35 min
13	1h 13 min	7	4	1h 20 min
14	1h 08 min	7	3	1h 15 min
15	1h 39 min	6	4	1h 45 min

(Fuente: Propia)

3.2.3. Análisis del proceso de obtención de los tubos destinados al estudio paramétrico

De los parámetros reales del proceso se observa que la mayoría logró llegar a un valor aproximado de velocidad del molde establecido en la Tabla 2.4, sin embargo, solo el primer tubo fue el que no se alcanzó el valor previsto de la velocidad de rotación del molde de 800 RPM, alcanzando los 679 RPM; esta variación en el valor de rotación del primer tubo se debió a que durante el proceso de colado centrífugo la máquina comenzó

a producir humo (producto de la quema de grasa) y que junto a su vibración generó inseguridad en los operarios, y por lo que se decidió no aumentar la velocidad de rotación en la que se encontraba en ese momento. Para los demás tubos, se corrigió el problema de la vibración agregando peso a la estructura de la máquina y para el problema de la grasa se necesitó la limpieza y reemplazo de la grasa de los rodamientos luego de cada fundición o tubo obtenido.

La temperatura de colado tiene altas variaciones con respecto al parámetro de referencia, por motivo que no se podía estar constantemente midiendo la temperatura del metal fundido porque los operarios estaban preparando otros aspectos del proceso, como el precalentamiento del embudo de alimentación de la colada, o en la fundición del aluminio.

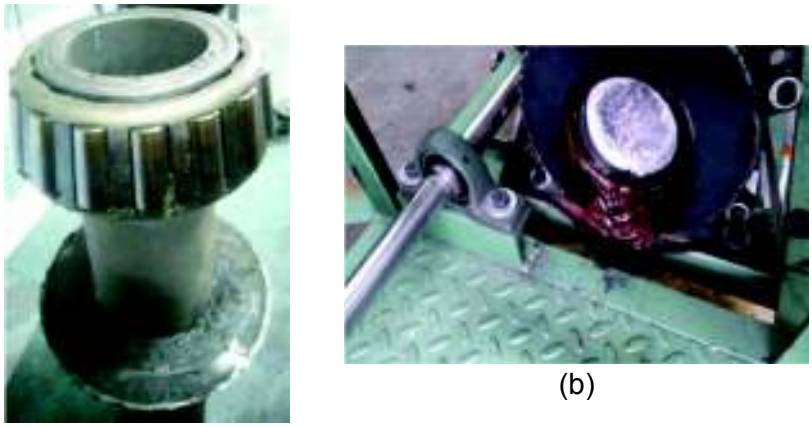
Con respecto a los tiempos de la Tabla 3.2, el tiempo de colado centrífugo va desde los 5 hasta los 9 minutos, la diferencia entre los valores de los distintos tubos se debe a la dificultad que se presentaba el extraer el tubo de aluminio del molde; para su extracción se requería la separación de la tapa de salida del molde. La tapa al estar a elevada temperatura no permitía aflojar los tornillos fácilmente que la sujetaban al molde, y también porque en ocasiones se dañaban los hilos de las roscas de los tornillos o las roscas del mismo molde.

El tiempo total del proceso varia de 1h 10min hasta 2h 00min; el tiempo máximo se da cuando en el proceso se emplea el horno frio, por lo tanto, requerirá más tiempo para alcanzar la temperatura para fundir el aluminio, y también es influenciado por los tanques de gas que no estaban completamente llenos, generando poca presión y por ende su llama proporciona poco calor; el tiempo mínimo, por el contrario a lo anterior descrito, se lo consigue cuando se utiliza el horno después de la realización de una reciente fundición, y además del uso de tanques de gas completamente nuevos.

Por el diseño que tiene la máquina se dificultaba realizar fundiciones continuas, los problemas de diseño que presenta la máquina se describen a continuación:

- Los rodamientos están en contacto directo con el molde (Figura 3.3. (a)), el cual es llevado a altas temperaturas, esto conlleva a que la grasa empleada en los rodamientos no soporte su temperatura de operación y termine quemándose y derramándose a través de las carcasas, ver Figura 3.3. (b).

- El área alrededor del molde no está cubierta totalmente, tiene aberturas en la parte posterior (Figura 3.4. (a)) e inferior (Figura 3.4. (b)), lo que resulta en pérdidas de calor y que en ocasiones se apague la hornilla para el precalentamiento.
- La máquina no es tan robusta, esto permite que las vibraciones se den más fácilmente durante el proceso de colado.



(a) (b)

Figura 3.3. Defecto de la unión del molde y el rodamiento.
(a) Unión molde-rodamiento, (b) Derrame de grasa después de una fundición.
(Fuente: Propia)

(a) (b)

Figura 3.4. Aberturas alrededor del molde.
(a) Abertura posterior del molde. (b) Abertura inferior del molde
(Fuente: Propia)

El área alrededor del molde, al estar con aberturas en la parte inferior y posterior, y al no estar aislado térmicamente permite la fuga de calor al ambiente, afectando el tiempo que éste requiere para llegar y/o conservar una cierta temperatura.

La abertura inferior alrededor del molde puede provocar que la llama en la hornilla se apague, si se presenta un pequeño flujo de aire o viento, y la abertura en la parte posterior influye en la temperatura a la que se encuentra la zona de la salida del molde evitando que el molde tenga una temperatura de precalentamiento uniforme.

La grasa utilizada para los rodamientos fue “TOP 1 Synthetic Hi-Temp Grease” (Top 1 Oil) (las especificaciones se encuentran en el ANEXO I), la cual puede soportar temperaturas de hasta 163ºC, y este valor es muy inferior a la temperatura a la que se calentó el molde (llegando hasta 365ºC), por este motivo al momento de hacer girar el molde, la grasa cambia a su estado líquido y se derrama por los costados de las carcasas, requiriendo el abastecimiento constante de la grasa o incluso de su reposición total para la realización de otras fundiciones.

Debido a que la grasa debe ser limpiada y reemplazada luego de cada fundición y sobre todo por producir muchos residuos de grasa quemada y vapores tóxicos durante el proceso de colado, considerando también, que la estructura de la máquina no es suficientemente robusta, se decidió no realizar más fundiciones de las necesarias para el estudio paramétrico, motivo por el cual no se empleó las extensiones del tope de salida para variar la longitud del tubo.

3.3. Inspección visual de los tubos de aluminio sin costura

3.3.1. Resultados

Para la inspección visual de los tubos se empleó la nomenclatura estándar dada por el Comité Internacional de Asociaciones Técnicas de Fundición, donde tienen la siguiente clasificación: (Anexo II)

- A: Proyecciones metálicas.
- B: Cavidades.
- C: Discontinuidades.
- D: Superficie defectuosa.
- E: Fundición incompleta.
- F: Dimensiones o formas incorrectas.
- G: Inclusiones.

Utilizando la nomenclatura anterior, se presenta la Tabla 3.3 y las Figuras 3.5, 3.6, 3.7, 3.8 y 3.9 de los primeros cinco tubos fundidos, junto con las observaciones de la inspección de cada uno; estos tubos se obtuvieron con variación de velocidad de rotación del molde, mientras que las temperaturas de precalentamiento y de colado permanecen constantes.

Tabla 3.3. Observaciones de tubos obtenidos con variación de velocidad de rotación del molde.

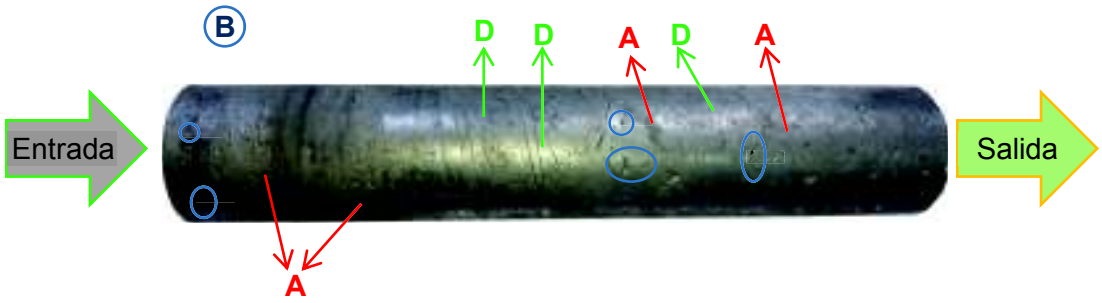


Figura 3.5. Tubo a 679 RPM.
(Fuente: Propia)

Los defectos encontrados en el tubo 1 son:

- A: Superficies rugosas
- B: Poros
- D: Traslapes, cicatrices superficiales

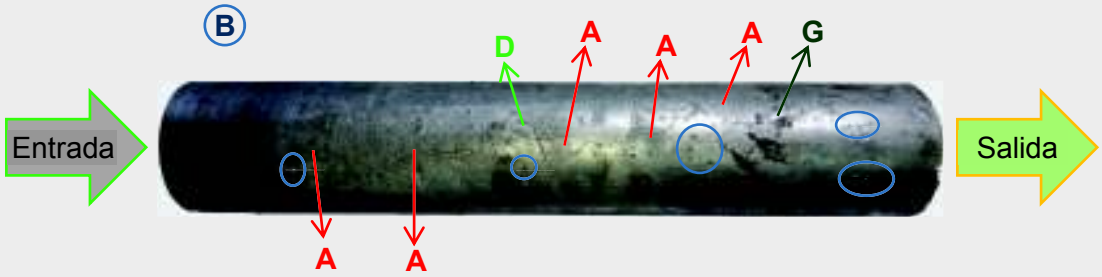


Figura 3.6. Tubo a 901 RPM.
(Fuente: Propia)

Los defectos encontrados en el tubo 2 son:

- A: Superficies rugosas
- B: Poros
- D: Cicatriz superficial
- G: Inclusiones no metálicas

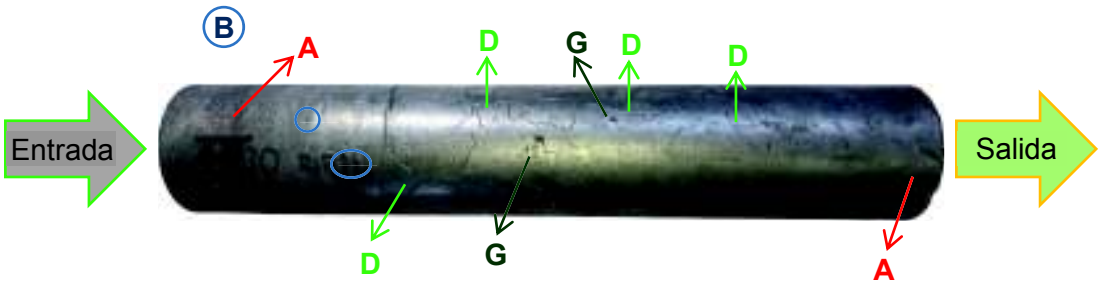


Figura 3.7. Tubo a 1000 RPM.
(Fuente: Propia)

Los defectos encontrados en el tubo 3 son:

- A: Superficies rugosas
- B: Poros
- D: Cicatriz superficial
- G: Inclusiones no metálicas

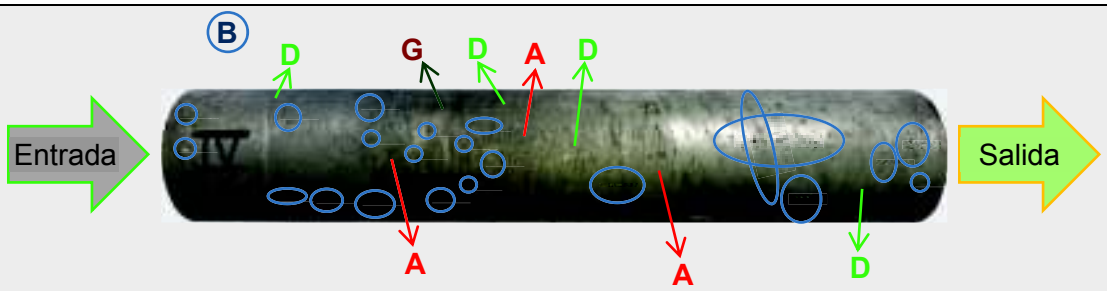


Figura 3.8. Tubo a 1097 RPM.
(Fuente: Propia)

Los defectos encontrados en el tubo 4 son:

- A: Superficies rugosas
- B: Poros
- D: Cicatriz superficial
- G: Inclusiones no metálicas

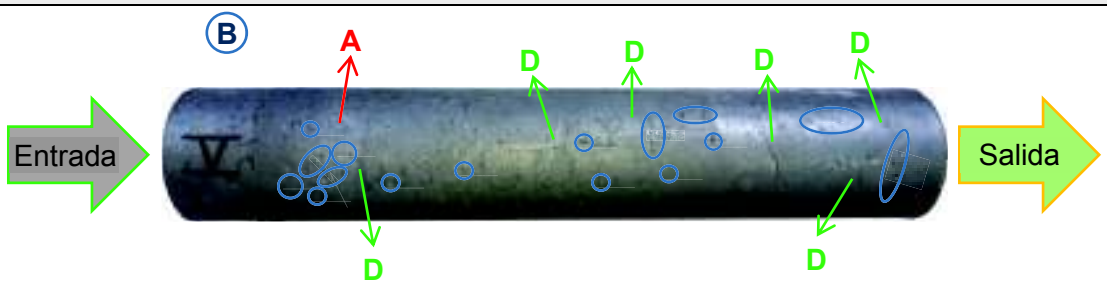


Figura 3.9. Tubo a 1192 RPM.
(Fuente: Propia)

Los defectos encontrados en el tubo 5 son:

- A: Superficie rugosa
- B: Poros
- D: Traslapes, cicatrices superficiales

De la inspección visual realizada a los primeros cinco tubos, se eligió al tubo número 5 como referente para la variable $V_{óptima}$ (Tabla 2.4), por las siguientes características:

- Superficie más uniforme.
- Defectos de menores dimensiones.

(Fuente: Propia)

Después de la inspección de los cinco primeros tubos variando la velocidad de rotación del molde, se procede a obtener los siguientes cinco tubos variando la temperatura de precalentamiento del molde.

En la Tabla 3.4 se presentan las Figuras 3.10, 3.11, 3.12, 3.13 y 3.14 que corresponden a los tubos desde el número 6 hasta el 10, junto con las observaciones de la inspección de cada uno; estos tubos se obtuvieron con variación de la temperatura de precalentamiento del molde, mientras que la velocidad de rotación del molde y temperatura de colado permanecen constantes.

Tabla 3.4. Observaciones de tubos obtenidos con variación de temperatura de precalentamiento.

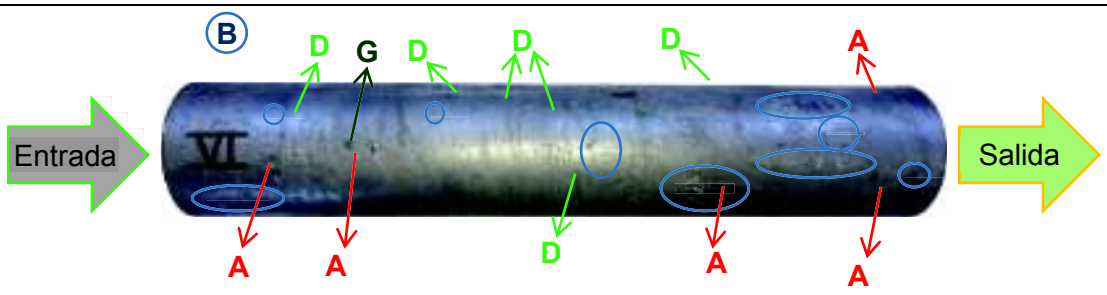


Figura 3.10. Tubo con molde a 165°C.
(Fuente: Propia)

Los defectos encontrados en el tubo 6 son:

- A: Superficies rugosas
- B: Poros

- D: Traslapes, cicatrices superficiales
- G: Inclusiones no metálicas

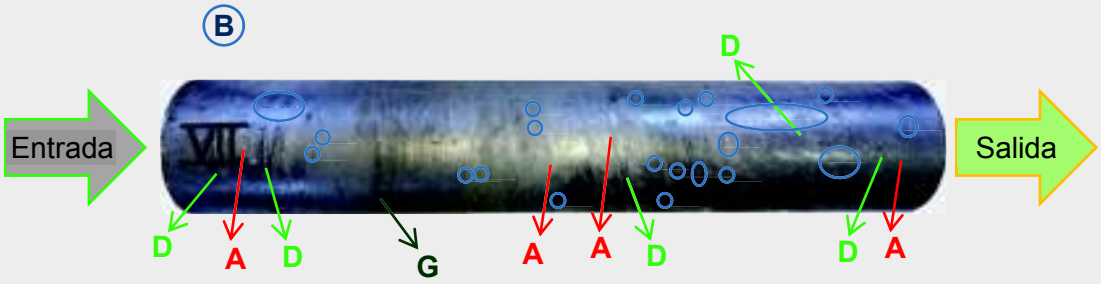


Figura 3.11. Tubo con molde a 207°C.
(Fuente: Propia)

Los defectos encontrados en el tubo 7 son:

- A: Superficies rugosas
- B: Poros
- D: Traslapes, cicatriz superficial
- G: Inclusiones no metálicas

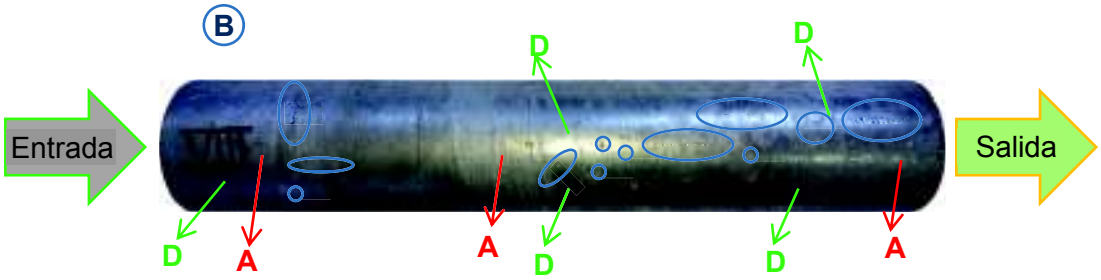


Figura 3.12. Tubo con molde a 243°C.
(Fuente: Propia)

Los defectos encontrados en el tubo 8 son:

- A: Superficies rugosas
- B: Poros
- D: Traslapes, cicatrices superficiales

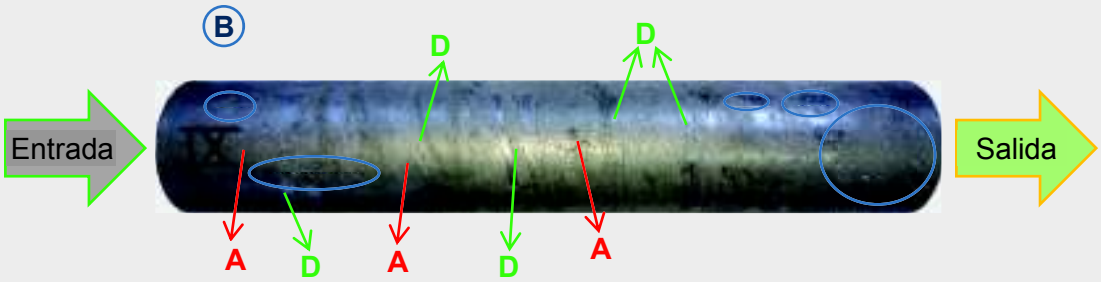


Figura 3.13. Tubo con molde a 297°C.
(Fuente: Propia)

Los defectos encontrados en el tubo 9 son:

- A: Superficies rugosas
- B: Poros
- D: Traslapes, cicatrices superficiales

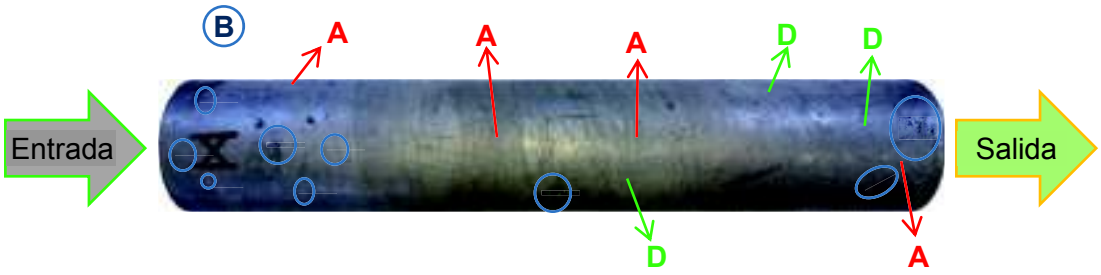


Figura 3.14. Tubo con molde a 340°C.
(Fuente: Propia)

Los defectos encontrados en el tubo 10 son:

- A: Superficies rugosas
- B: Poros
- D: Cicatrices superficiales

De la inspección visual realizada a los tubos del 6 al 10, se eligió al tubo número 10 como referente para la variable $T_{precalentamiento\ óptima}$ (Tabla 2.4), por las siguientes observaciones:

- Superficie más uniforme.
- Defectos en menor cantidad.

(Fuente: Propia)

Finalmente, se realiza la fundición de los últimos cinco tubos. En la
Tabla 3.5 se presentan las Figuras 3.15, 3.16, 3.17, 3.18 y 3.19 de los cinco tubos, junto con las observaciones de la inspección de cada uno; estos tubos se obtuvieron con variación de la temperatura de colado, mientras que la velocidad de rotación del molde y temperatura de precalentamiento del molde permanecen constantes.

Tabla 3.5. Observaciones de tubos obtenidos con variación de temperatura de colado.

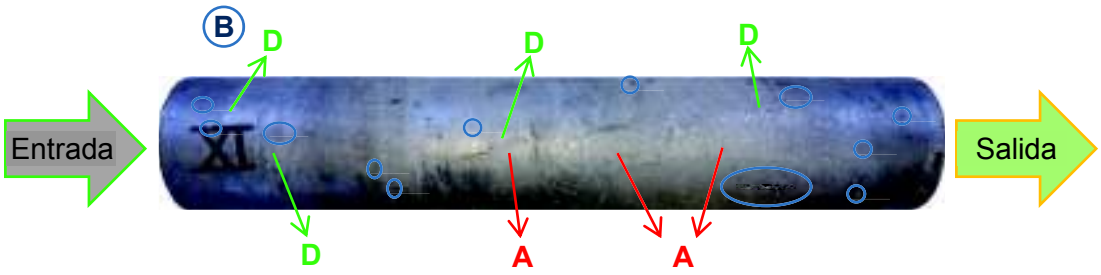


Figura 3.15. Tubo con temperatura de colado a 750°C.
(Fuente: Propia)

Los defectos encontrados en el tubo 11 son:

- A: Superficies rugosas
- B: Poros
- D: Cicatrices superficiales

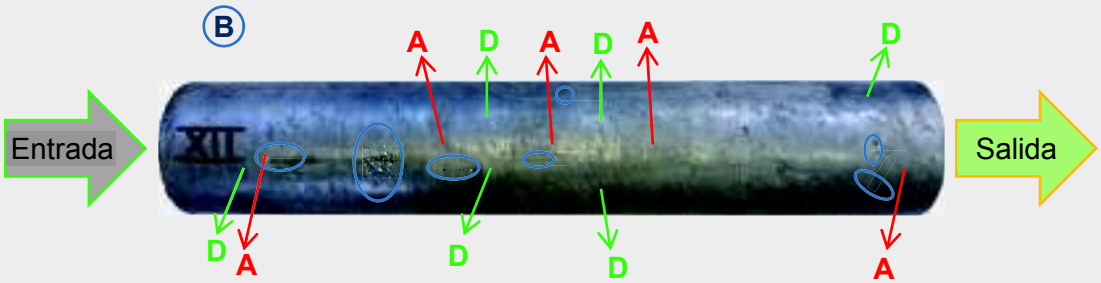


Figura 3.16. Tubo con temperatura de colado a 774°C.
(Fuente: Propia)

Los defectos encontrados en el tubo 12 son:

- A: Superficies rugosas
- B: Poros
- D: Traslapes, cicatrices superficiales

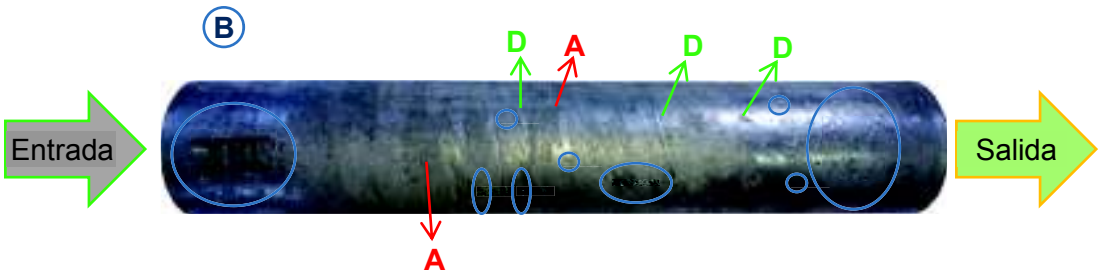


Figura 3.17. Tubo con temperatura de colado a 802°C.
(Fuente: Propia)

Los defectos encontrados en el tubo 13 son:

- A: Superficies rugosas
- B: Poros
- D: Traslapes, cicatrices superficiales

Figura 3.18. Tubo con temperatura de colado a 824°C.
(Fuente: Propia)

Los defectos encontrados en el tubo 14 son:

- B: Poros
- D: Traslapes, cicatrices superficiales

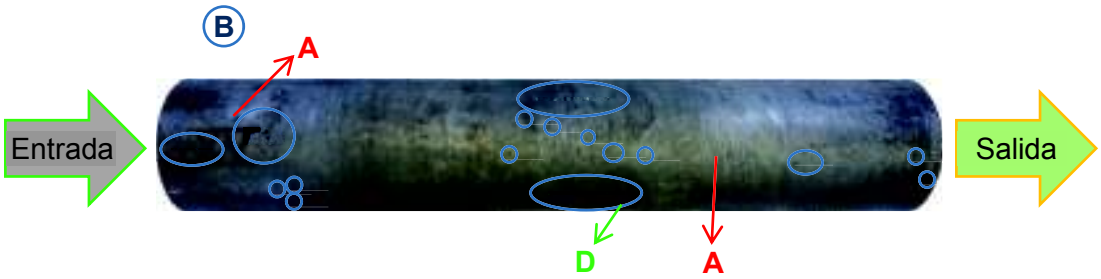


Figura 3.19. Tubo con temperatura de colado a 852°C.
(Fuente: Propia)

Los defectos encontrados en el tubo 15 son:

- A: Superficies rugosas
- B: Poros
- D: Cicatriz superficial

(Fuente: Propia)

3.3.2. Análisis de la inspección visual de los tubos de aluminio

En todos los tubos fundidos se encuentran los siguientes defectos: superficies rugosas, poros, traslapes y/o cicatrices superficiales, y en pocos tubos (tubos 2, 3, 4, 6 y 7) se tienen manchas que son inclusiones no metálicas, todos estos defectos corresponden a los más comunes que se encuentran en fundiciones centrífugas.

Las superficies rugosas y los poros superficiales se pudieron deber a que en las paredes internas del molde se encontraba con algo de humedad u otros elementos que generan gases al elevarse su temperatura, por ello al ser precalentado dichos gases no son completamente expulsados, ya que al molde es cerrado y solo había la pequeña abertura para el embudo en la entrada; los gases atrapados en el molde pueden mezclarse con la colada que se encuentra en rotación al momento de verter el metal fundido al molde, también aquellos elementos que aún no hayan sido quemados en el precalentamiento generarán más gases al elevarse la temperatura al momento de verter la colada que se encuentra a mayor temperatura que del molde.

Los traslapes y cicatrices superficiales se pudo haber dado por la manera irregular que se vertió el metal fundido; al no tener un caudal constante de la colada, la cantidad a solidificar en cada parte del tubo sería diferente, provocando la formación de traslapes y cicatrices.

Las inclusiones no metálicas se pudieron producir por la escoria en el crisol, o por alguna impureza no retirada del molde, como por ejemplo grafito en polvo mezclado con grasa de los rodamientos.

De los primeros cinco tubos se puede observar que la cantidad de poros superficiales va aumentando a medida que se aumenta la velocidad de rotación del molde, y la razón es la vibración producida por el motor, es decir, al aumentar la velocidad del motor, se producirá mayor vibración en la máquina y habrá más posibilidad de formación de poros. También se observa que la cantidad de superficies rugosas en los tubos va disminuyendo conforme se va aumentando la velocidad de rotación.

Del párrafo anterior se puede decir que el aumentar la velocidad de rotación, el metal fundido tendrá mayor fuerza para adherirse a la pared interna del molde, logrando con ello la mejora en la calidad de la superficie externa del tubo, no obstante, el aumento de

velocidad de rotación aumentaría la vibración producida por la máquina, generando con ello mayor porosidad superficial. La porosidad se debe a que, durante el colado, con el metal fundido, y el movimiento lineal en dirección radial generado por las vibraciones, la colada forma ondulaciones en la zona de interacción con el molde, como se puede ver en la representación de la Figura 3.20, estas ondulaciones de la colada dan lugar a los poros en el momento de la solidificación.

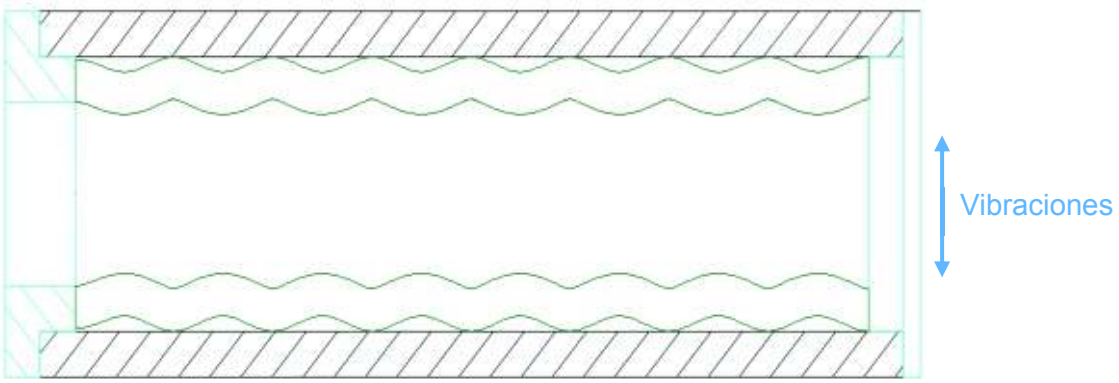


Figura 3.20. Representación del comportamiento de la colada con la vibración.
(Fuente: Propia)

Otra observación de los cinco primeros tubos es los traslapes o cicatrices superficiales, éstos tienen relación con la velocidad de vertido, ya que como ejemplo se tiene al tubo número 3, que su tiempo de vertido superó los 10 segundos, y aparentemente se completó el tubo, sin embargo, dio como resultado una sección longitudinal no uniforme y con muchos traslapes; mientras que aquellos tubos con menor tiempo de vertido tienen menos cantidad de dichos defectos.

Al analizar los siguientes cinco tubos (del 6 al 10) se puede ver que la cantidad de superficies rugosas no tiene una variación, y de manera similar los traslapes o cicatrices superficiales, por lo tanto, se puede decir que la temperatura de precalentamiento no tiene mucha influencia en la formación de los defectos nombrados.

Los poros superficiales del segundo grupo de tubos fabricados (tubos 6, 7, 8, 9 y 10) van disminuyendo conforme se aumenta la temperatura de precalentamiento del molde, ya que mientras menor sea la diferencia de temperaturas entre el molde y la colada, la solidificación del aluminio será menos brusca, lo que disminuiría los poros generados por la contracción del metal, también al tener una mayor temperatura de precalentamiento se quemara la mayoría de elementos ubicados en la superficie interna del molde que

puedan generar gases, logrando que al momento del vertido del metal, los materiales generadores de gases ya hayan sido quemados.

Del análisis de los últimos cinco tubos (tubos del 11 al 15), se obtiene que las superficies rugosas, los traslapes y cicatrices superficiales van disminuyendo conforme la temperatura de colado aumenta, y puede deberse a que el metal fundido a más temperatura de colado se mantendrá más tiempo en ese estado, aumentado el tiempo de solidificación, y logrando que el metal se adhiera mejor a la superficie del molde. De este último grupo de tubos fabricados también se puede ver que los poros no presentan una tendencia clara, y por lo tanto se puede decir que la temperatura de colado no tiene mucha influencia en la formación de estos defectos.

3.4. Características físicas de los tubos

3.4.1. Resultados

En esta sección se presentan características como el peso y las dimensiones de los tubos, como el diámetro interno, diámetro externo, el espesor y su diferencia entre la salida y entrada del molde, ver Tabla 3.6. A partir de esta tabla se obtiene la gráfica de diferencia de espesor Δe vs número de tubo, que se observa en la Figura 3.21.

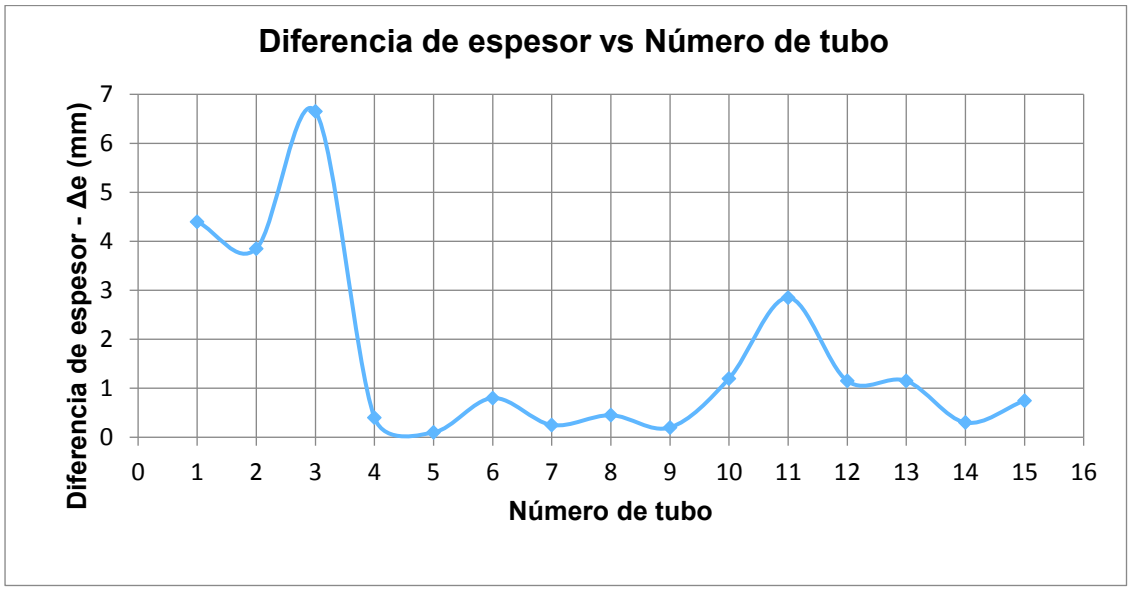


Figura 3.21 Gráfico de diferencia de espesor vs número de tubo.
(Fuente: Propia)

Tabla 3.6. Peso y dimensiones de los tubos de aluminio sin costura.

		Dimensiones Tubos de Aluminio							
Número de Tubo	Peso Tubo (Kg)	Longitud (cm)	Entrada del molde			Salida del molde			Diferencia de Espesor - Δe (mm)
			D. externo (mm)	D. Interno (mm)	Espesor – e1 (mm)	D. externo (mm)	D. interno (mm)	Espesor – e2 (mm)	
1	5,18	50	92	57,4	17,3	94	68,2	12,9	4,4
2	4,76	50	92	59,1	16,45	94,2	69	12,6	3,85
3	4,28	50	91,9	58,6	16,65	94	74	10	6,65
4	4,62	50	91,9	61,1	15,4	94,1	62,5	15,8	0,4
5	4,8	50	92	60,2	15,9	94,1	62,5	15,8	0,1
6	3,9	50	91,8	68,3	11,75	94,1	69	12,55	0,8
7	4,26	50	91,9	65,2	13,35	94	66,8	13,6	0,25
8	4,04	50	91,9	67,7	12,1	94,1	69	12,55	0,45
9	4,06	50	92	67,1	12,45	94,1	69,6	12,25	0,2
10	4,3	50	91,9	65,7	13,1	94	65,4	14,3	1,2
11	4,2	50	92	66	13	94,2	62,5	15,85	2,85
12	3,92	50	91,9	68,6	11,65	94	68,4	12,8	1,15
13	4,02	50	91,8	67,3	12,25	93,9	67,1	13,4	1,15
14	3,84	50	91,9	69,3	11,3	94	70,8	11,6	0,3
15	3,96	50	91,9	68,3	11,8	94	68,9	12,55	0,75

(Fuente: Propia)

Adicionalmente se presentan fotos y bosquejos realizados con el software AutoCAD de las secciones longitudinales de los tubos, en la Figura 3.22, donde puede observarse las variaciones o partes continuas en la sección de los tubos. Las secciones longitudinales fueron obtenidas de una parte del tubo que era destinado para maquinar y formar la probeta para los ensayos de tracción y de espectrometría.

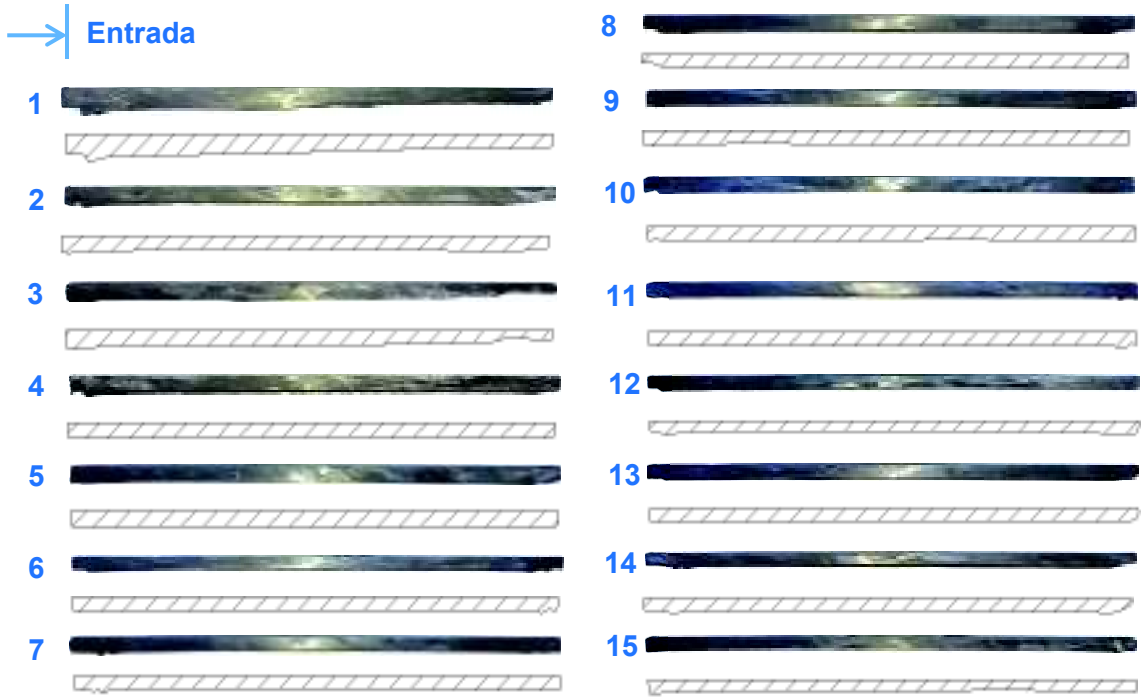


Figura 3.22. Secciones transversales longitudinales de los tubos.
(Fuente: Propia)

3.4.2. Análisis de las características físicas de los tubos de aluminio

De las mediciones de los diámetros se puede resaltar que todos tienen similar medida del diámetro externo, ya sea de la entrada o salida del molde, la única variación en las dimensiones se da en el diámetro interno del tubo de aluminio, por ende, su espesor. De estas medidas y la curva de la Figura 3.21 se observa que los primeros tres tubos tienen diferencias de espesor mayores a 1 mm, debido a la cantidad de aluminio fundido y la velocidad de vertido del metal fundido. Para los demás tubos ya se realizó con un vertido rápido y con la cantidad de aluminio más exacta.

Las dimensiones de los tubos fueron tomadas de las zonas de entrada y salida del molde, estas zonas generalmente tienen alteraciones, por lo que un mejor indicador de la

uniformidad del espesor son las secciones longitudinales. Al observar las secciones se muestra que el tubo 3 tiene una sección que va disminuyendo conforme se aleja de la entrada, debido a su alto tiempo de vertido; el tubo 1 también presenta esta disminución, sin embargo, este acumula mayor cantidad de material en la zona de entrada, en comparación al tubo 3, debido a la excesiva cantidad de aluminio vertido.

La mayoría de las secciones de los tubos son uniformes, y tienen alteraciones en la entrada y salida, estas alteraciones se notan menos a partir del tubo número seis, ya que se determinó la cantidad correcta de aluminio a fundir. La salida es alterada por que es donde choca el aluminio líquido y comienza la formación del tubo; y la entrada es alterada ya que dependiendo la cantidad de aluminio puede tener contacto con parte del embudo.

3.5. Porosidad interna

3.5.1. Resultados

El análisis de cantidad de porosidad interna se realizó empleando el método de densidad relativa; y a continuación se presenta un ejemplo de cálculo para el primer tubo.

$$Porosidad_{tubo1} = 100 - \left(\frac{\rho_{r1} * 100}{\rho_{Al}}\right)$$

$$\rho_{r1} = \frac{W_{tubo1}}{V_{tubo1}} = \frac{5{,}18Kg}{2030\ cc}$$

$$\rho_{r1} = 2{,}55\ {}^{g}/_{cc}$$

$$\rho_{Al} = 2{,}7\ {}^{g}/_{cc}$$

$$Porosidad_{tubo1} = 100\% - \left(\frac{2{,}55 * 100\%}{2{,}7}\right)$$

$$Porosidad_{tubo1} = 5{,}49\%$$

Los resultados del análisis de porosidad, realizados según el procedimiento descrito en el subcapítulo 2.4, se presentan en la Tabla 3.7, con valores del volumen, densidad relativa y porosidad de cada tubo.

Tabla 3.7. Resultados del análisis de porosidad.

Número del tubo	Volumen (cc)	Densidad relativa (g/cc)	Porosidad
1	2030	2,55	5,49%
2	1860	2,56	5,22%
3	1730	2,47	8,37%
4	1920	2,41	10,88%
5	2040	2,35	12,85%
6	1460	2,67	1,07%
7	1800	2,37	12,35%
8	1620	2,49	7,64%
9	1650	2,46	8,87%
10	1830	2,35	12,97%
11	1660	2,53	6,29%
12	1500	2,61	3,21%
13	1560	2,58	4,56%
14	1620	2,37	12,21%
15	1530	2,59	4,14%

(Fuente: Propia)

Los porcentajes de porosidad de la tabla anteriormente mostrada se emplean para obtener las gráficas de porosidad en función de la velocidad de rotación del molde, temperatura de precalentamiento del molde y temperatura de colado, que se exponen en las Figuras 3.23, 3.24, y 3.25 respectivamente. También se presenta la Figura 3.26 con una gráfica resumen de los valores de todos los tubos.

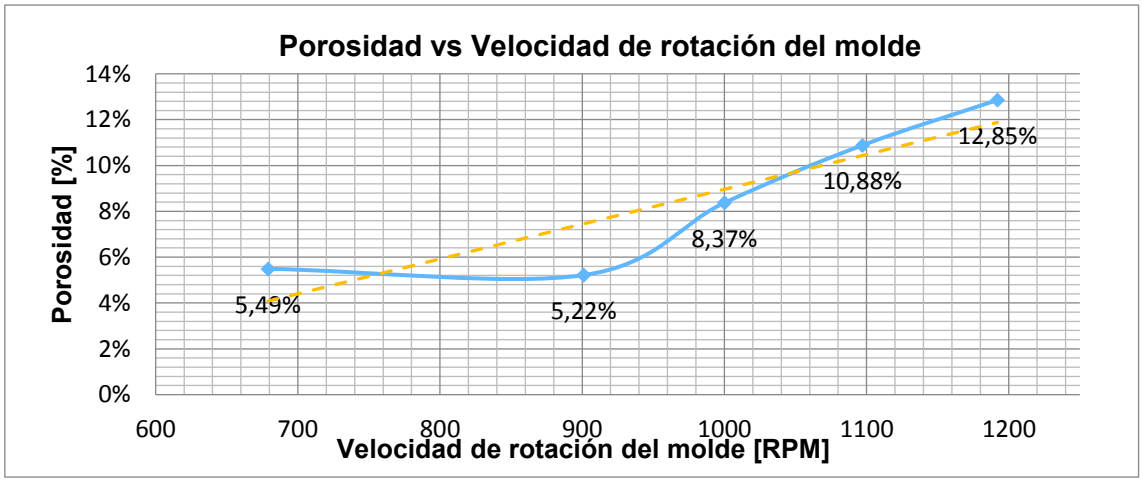


Figura 3.23. Gráfico de porosidad vs velocidad de rotación del molde.
(Fuente: Propia)

En la Figura 3.23, se tiene el máximo valor de 12,85% de porosidad con la velocidad del molde de 1198 RPM, mientras que su valor mínimo es de 5,22% con una velocidad del molde a 900 RPM.

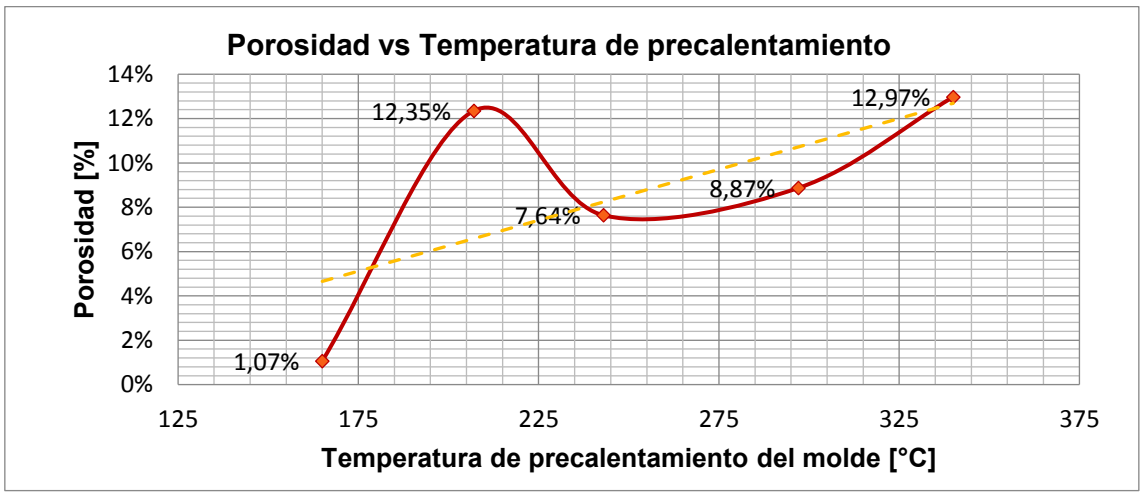


Figura 3.24. Gráfico de porosidad vs Temperatura de precalentamiento.
(Fuente: Propia)

De la Figura 3.24, se observa que el valor máximo de porosidad es de 12,97% con una temperatura del molde de 340ºC; y por el otro lado, el valor mínimo es 1,07% con una temperatura del molde de 165ºC.

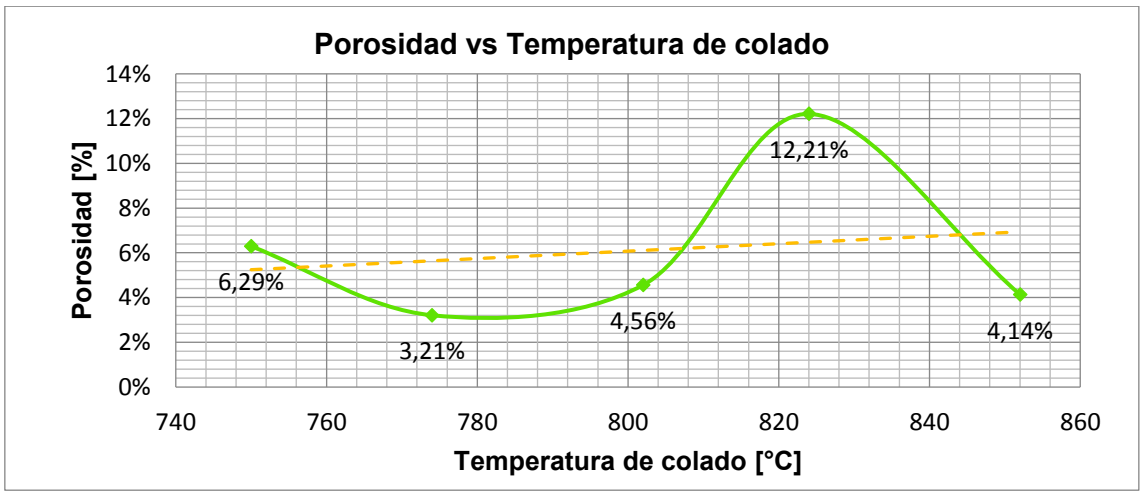


Figura 3.25. Gráfico de porosidad vs Temperatura de colado.
(Fuente: Propia)

Observando la Figura 3.25 se tiene que su valor máximo de porosidad es de 12,21% a una temperatura de colado de 824ºC; y su valor mínimo es de 3,21% a una temperatura de colado de 774ºC.

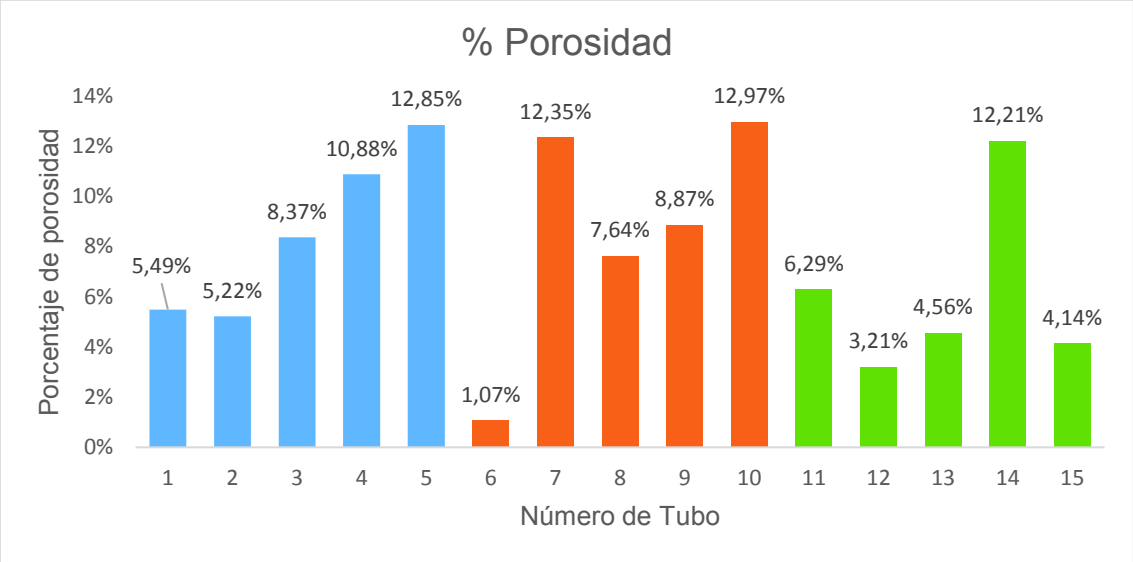


Figura 3.26. Valores de porosidades de todos los tubos.
(Fuente: Propia)

De todos los valores de porosidad de los tubos, mostrados en la Figura 3.26, el mínimo valor es el del tubo 6, con 1,07%; y su máximo se presenta en el tubo 10, con un 12,97%.

3.5.2. Análisis de la porosidad interna

Los tubos del 1 al 5 tienen valores de porosidad que aumentan al elevar la velocidad del molde, esto coincide con lo anteriormente dicho en la inspección visual de poros superficiales, que a medida que la velocidad del molde aumenta se genera mayor vibración y se generan más poros. Otros aspectos que pueden influir en la aparición de poros son elementos no metálicos que se encuentren adheridos a la pared interna del molde que al quemarse generan gases, también se puede deber al tipo de recubrimiento dado al molde.

Los valores de porosidad de los tubos del 6 al 10 (exceptuando la porosidad del tubo 7), se puede decir que tienen una tendencia a aumentar mientras la temperatura de precalentamiento se eleva.

En el análisis de los tubos 11 al 15, no se puede observar una tendencia clara, pero al omitir el valor del tubo 14, la diferencia máxima entre los valores es aproximadamente 3%, que es un valor bajo en comparación con los otros grupos de tubos, por tal razón se

puede decir que la temperatura de colado no tiene mayor influencia en la formación o aparición de poros internos en el tubo.

La aparición de la porosidad interna puede deberse a que la colada de aluminio fue excesivamente sobrecalentada sobre su temperatura de liquidus, más de 100°C de lo recomendado, esto genera que el metal fundido sea propenso a absorber los gases nocivos, especialmente el hidrogeno, que son causantes de las porosidades.

3.6. Medición de la rugosidad superficial

3.6.1. Resultados

Las mediciones de rugosidad superficial se tomaron en tres zonas diferentes del tubo, como se explica en el subcapítulo 2.5, y se indica en la Figura 2.37. Los resultados son mostrados en la Tabla 3.8, donde también se incluye la rugosidad promedio de cada tubo; también se presenta la rugosidad de la superficie interna del molde de la máquina en la Tabla 3.9.

Tabla 3.8. Medidas de la rugosidad de los tubos.

Número de Tubo	Ra entrada (µm)	Ra intermedia (µm)	Ra salida (µm)	Ra Promedio (µm)
1	8,606	6,13	5,109	6,615
2	5,927	3,395	5,801	5,041
3	4,015	2,1	6,88	4,332
4	3,949	1,783	7,254	4,329
5	5,086	1,896	8,475	5,152
6	3,838	3,154	5,427	4,140
7	2,784	10,162	5,253	6,066
8	6,348	2,784	6,294	5,142
9	2,832	5,259	4,815	4,302
10	5,209	5,703	6,789	5,900
11	9,325	9,011	8,304	8,880
12	4,132	6,87	7,503	6,168
13	3,165	2,137	4,241	3,181
14	4,574	3,729	3,945	4,083
15	7,526	7,524	5,019	6,690

(Fuente: Propia)

Tabla 3.9. Medida de rugosidad del molde

	Ra entrada (µm)	Ra salida (µm)	Ra Promedio (µm)
Molde	3,962	4,331	4,147

(Fuente: Propia)

A continuación, se presentan las gráficas de la rugosidad promedio en función de la velocidad de rotación del molde, temperatura de precalentamiento del molde y temperatura de colado, en las Figuras 3.27, 3.28 y 3.29 respectivamente. Además, en la Figura 3.30 se expone todos los valores promedios de rugosidad de todos los tubos.

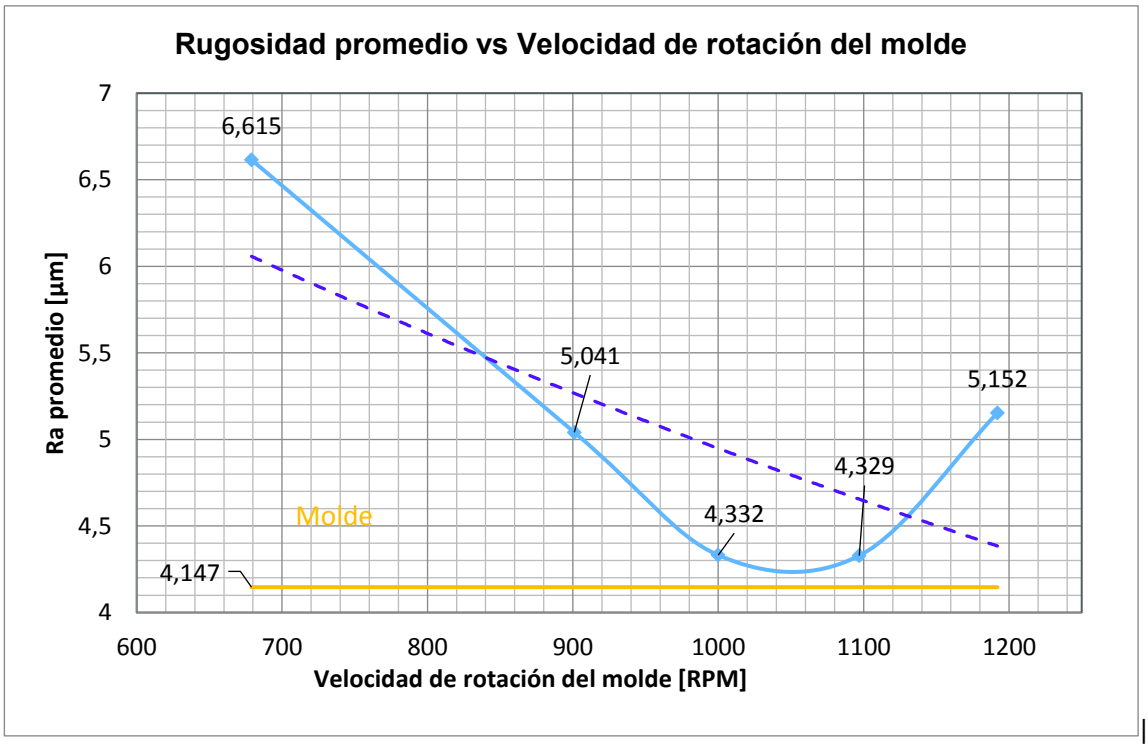


Figura 3.27. Gráfico de rugosidad promedio vs velocidad de rotación del molde.
(Fuente: Propia)

La Figura 3.27, da como resultado que el valor máximo de Ra promedio es de 6,615µm con una velocidad del molde de 680 RPM; y el valor mínimo de Ra promedio es de 4,329 µm a una velocidad del molde de 1100 RPM.

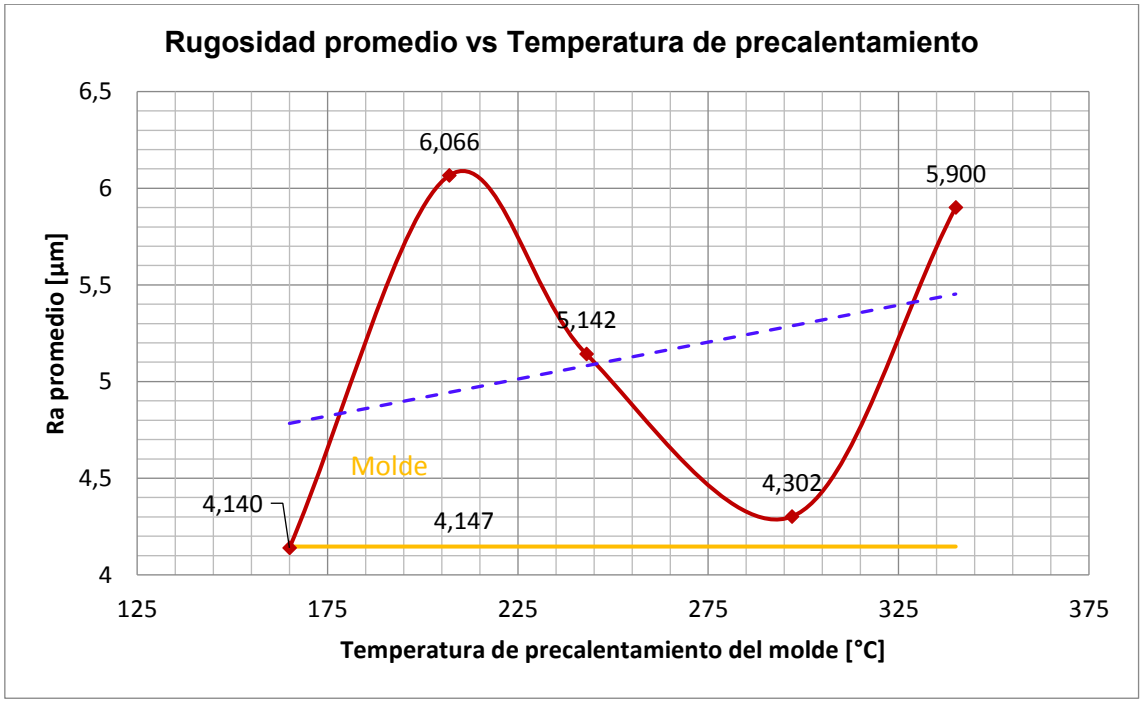


Figura 3.28. Gráfico de rugosidad promedio vs Temperatura de precalentamiento.
(Fuente: Propia)

Los resultados de la Figura 3.28 muestran el valor máximo de rugosidad de 6,066µm a una temperatura de precalentamiento de 207ºC; y un valor mínimo de 4,140µm a una temperatura del molde de 165ºC.

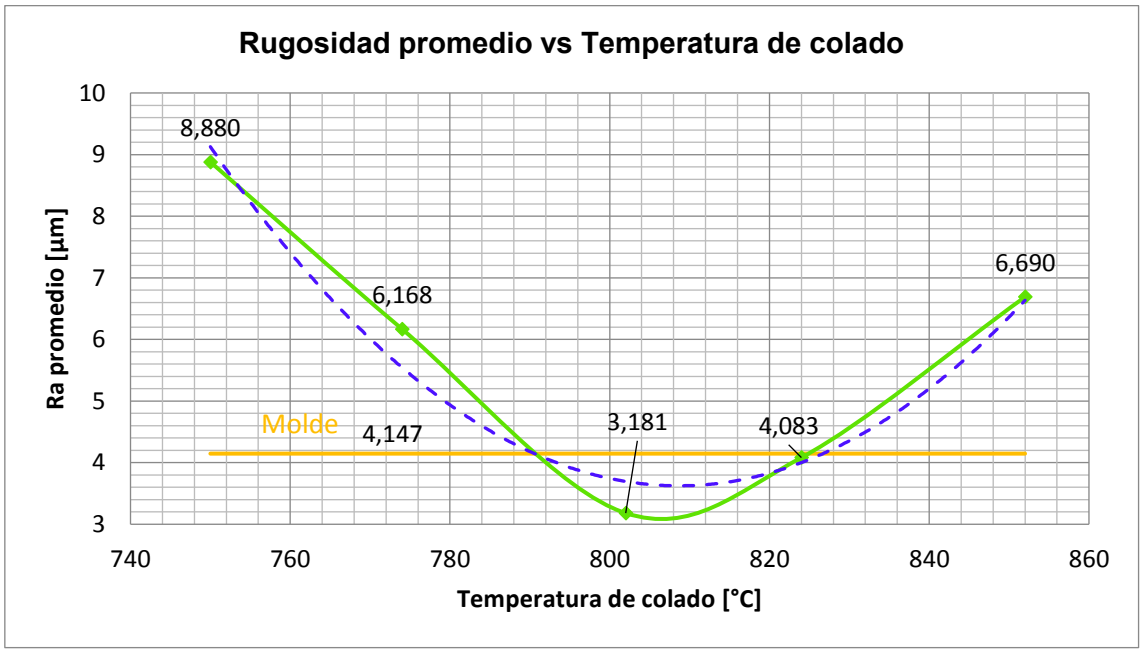


Figura 3.29. Gráfico de rugosidad promedio vs Temperatura de colado
(Fuente: Propia)

Se observa en la Figura 3.29 que el valor máximo de rugosidad es de 8,880µm y su valor mínimo es de 3,181µm a temperaturas de colado de 750ºC y 802ºC respectivamente.

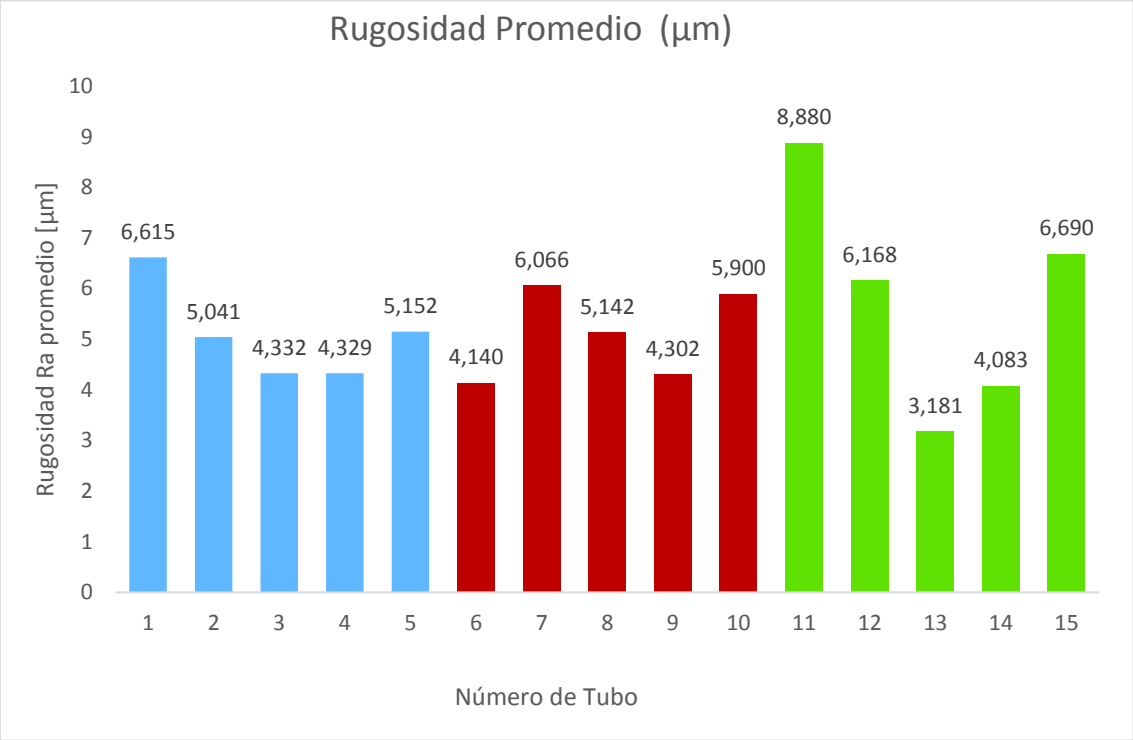


Figura 3.30. Valores de rugosidad Ra promedio de todos los tubos.
(Fuente: Propia)

De la Figura 3.30, valores de rugosidad Ra promedio de todos los tubos, se obtiene que el tubo 13 posee la menor rugosidad, con un valor de 3,181µm, mientras que el tubo 11 tiene la máxima rugosidad promedio, con un valor de 8,880 µm.

3.6.2. Análisis de la rugosidad superficial

Al analizar los valores de rugosidad Ra del primer grupo de cinco tubos se puede observar que la rugosidad en la zona intermedia es mejor que la rugosidad en los extremos, comparado con los valores de los demás tubos, y puede deberse a la uniformidad de temperatura del molde en su precalentamiento, ya que para estos tubos se utilizó una la temperatura de precalentamiento de 250ºC, a diferencia de la mayoría que tenía valores superiores, llegando hasta los 350ºC. Aquellos tubos que se requerían una alta temperatura de precalentamiento superior a los 250ºC tenían problemas para alcanzar sus respectivas temperaturas y mantenerlas, ya que como se describió anteriormente, el molde genera fugas de calor al ambiente.

También del primer grupo de tubos (del 1 al 5) se puede observar que los valores promedio Ra tienen tendencia a disminuir mientras se aumenta la velocidad de rotación del molde, y posiblemente se deba a que, a mayor velocidad, la colada tendrá mayor fuerza para adherirse a la superficie interna del molde, llegando a obtenerse una rugosidad superficial similar a la del molde y como ejemplo se tiene a los tubos 3 y 4 que tienen valores similares al valor promedio Ra del molde.

Para los tubos del 6 al 10, se puede observar que los valores promedios de rugosidad tienden a incrementarse y decrecer posteriormente, esto puede deberse a varios factores, entre ellos la vibración de la máquina y la no uniformidad de la temperatura de precalentamiento. En este segundo grupo los valores promedio Ra más cercanos al valor promedio del molde son de los tubos 6 y 9.

En el grupo de los tubos del 11 al 15 se puede observar valores promedio de Ra con tendencia a bajar a medida que la temperatura de colado aumenta, y a incrementarse a partir de la temperatura de colado cercana a 800ºC. La disminución de rugosidad puede deberse a que al tener más temperatura el metal líquido tiene más tiempo para adherirse al molde, mejorando su rugosidad (hasta una similar a la del molde).

El incremento de rugosidad puede deberse que los tubos fabricados hayan sido influenciados por factores que no se pueden controlar completamente, como, por ejemplo, la humedad en el ambiente, que es un elemento que genera gases que pueden ser atrapados en la colada mientras se vierte; mientras exista menor humedad, menos probabilidad tendrá de generarse poros y/o reducir la calidad de la rugosidad. Los tubos con mejores valores de Ra promedio son los números 13 y 14.

3.7. Ensayo de tracción

3.7.1. Resultados

Este ensayo destructivo requiere la preparación de probetas, una por cada tubo, estas fueron preparadas de acuerdo con las dimensiones especificadas en la norma ASTM E8 y empleando la metodología del subcapítulo 2.6 de este documento. Los resultados del ensayo se pueden observar en la Tabla 3.10, fueron proporcionados por el Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones de la EPN. El informe técnico y los resultados gráficos de las curvas esfuerzo vs deformación de cada probeta ensayada se encuentran en el Anexo III.

Tabla 3.10. Resultados del ensayo de tracción.

Número de Tubo	Carga máxima registrada		Resistencia a la tracción		% Elongación en 50 mm
	(lbf)	(N)	(ksi)	(MPa)	
1	15,836	3,560	10,6	73,1	6,3
2	12,855	2,890	11,2	77,2	7,2
3	12,544	2,820	9,7	66,9	6,2
4	-	-	-	-	-
5	12,588	2,830	9,3	64,2	8,9
6	17,215	3,870	17,2	118,2	10,4
7	18,638	4,190	15,8	108,7	12,2
8	16,631	3,750	14,7	101,3	9,4
9	18,104	4,070	16,3	112,4	13,8 *
10	19,750	4,440	17,0	117,4	6,5 *
11	17,882	4,020	16,2	111,7	5,7 *
12	14,234	3,200	13,1	90,6	6,3
13	14,101	3,170	13,9	95,8	5,0
14	18,816	4,230	18,3	126,4	10,6
15	16,859	3,790	16,1	110,8	9,7
Nota: * Falla fuera de las marcas					

(Fuente: Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones de la EPN)

Las Figuras 3.30, 3.31 y 3.32 muestran un ejemplo de cómo las probetas fallaron dentro de la marca, fuera de la marca y del ensayo fallido respectivamente. La probeta correspondiente al tubo 4 falló en la parte de sujeción a las mordazas de la máquina por lo que es un ensayo fallido y no se pudo obtener ningún dato con respecto a sus propiedades mecánicas.

Figura 3.31. Probeta con falla dentro de la marca.
(Fuente: Propia)

Figura 3.32. Probeta con falla fuera de la marca.
(Fuente: Propia)

Figura 3.33. Probeta de ensayo fallido del tubo número 4.
(Fuente: Propia)

A partir de la tabla de resultados de los ensayos de tracción (Tabla 3.10) se obtienen las Figuras 3.34, 3.35 y 3.36 que son gráficas de resistencia a la tracción en función de la velocidad del molde, temperatura de precalentamiento del molde y temperatura de colado

respectivamente. La gráfica resumen de los valores de resistencia a la tracción de cada uno de los tubos se indica en la Figura 3.37.

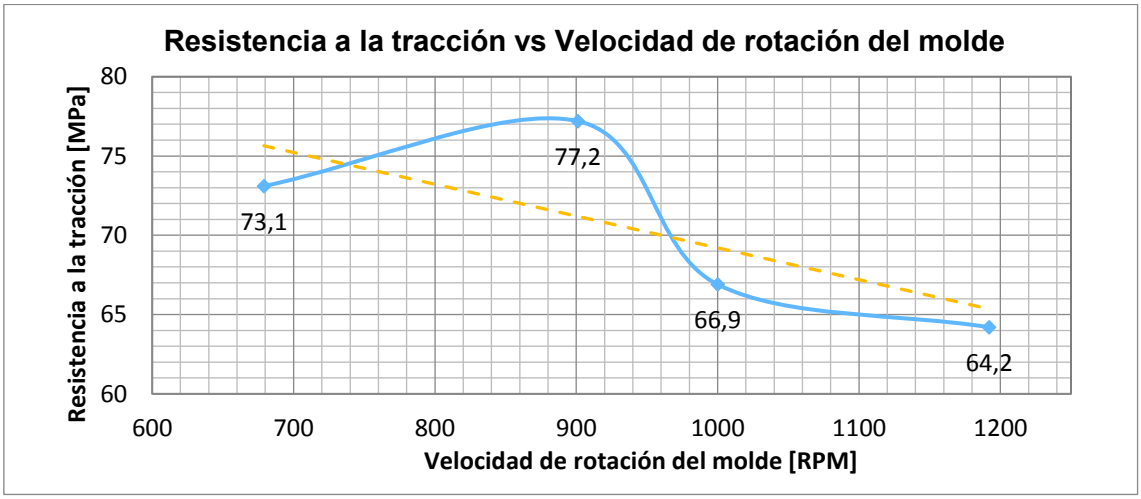


Figura 3.34. Gráfico de resistencia a la tracción vs velocidad de rotación del molde.
(Fuente: Propia)

Las observaciones que se obtienen de la Figura 3.34 son: el valor de resistencia a la tracción máximo es de 77,2 MPa a 900 RPM de velocidad del molde, y su valor mínimo es de 64,2 MPa a un valor cercano de 1200 RPM de velocidad de rotación del molde.

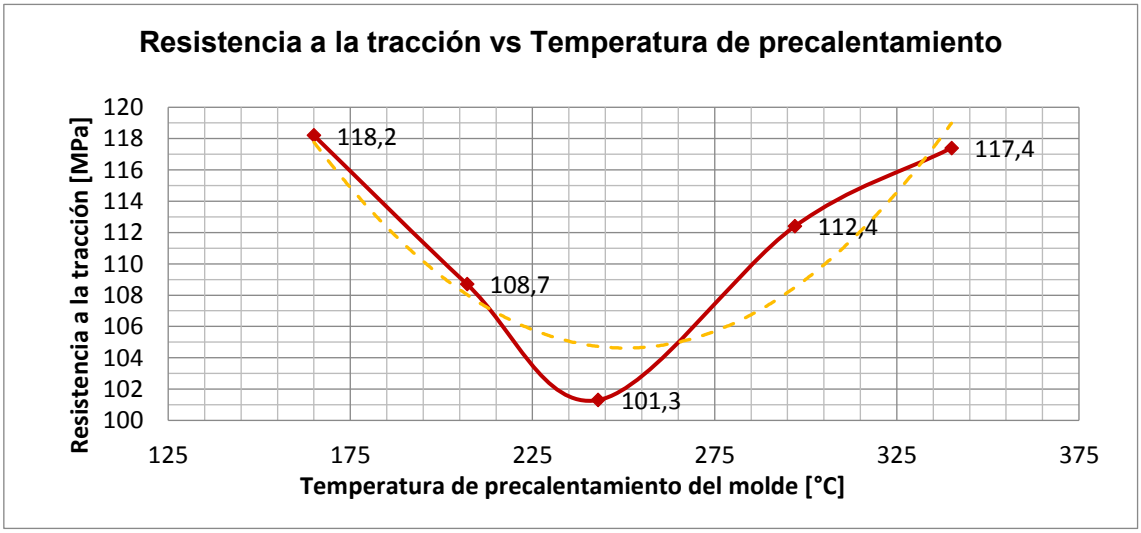


Figura 3.35. Gráfico de resistencia a la tracción vs Temperatura de precalentamiento del molde.
(Fuente: Propia)

La Figura 3.35 muestra la máxima resistencia a la tracción de 118,2 MPa a una temperatura de precalentamiento del molde de 165ºC, y un valor mínimo de 101,3 MPa a una temperatura del molde de aproximadamente 245ºC.

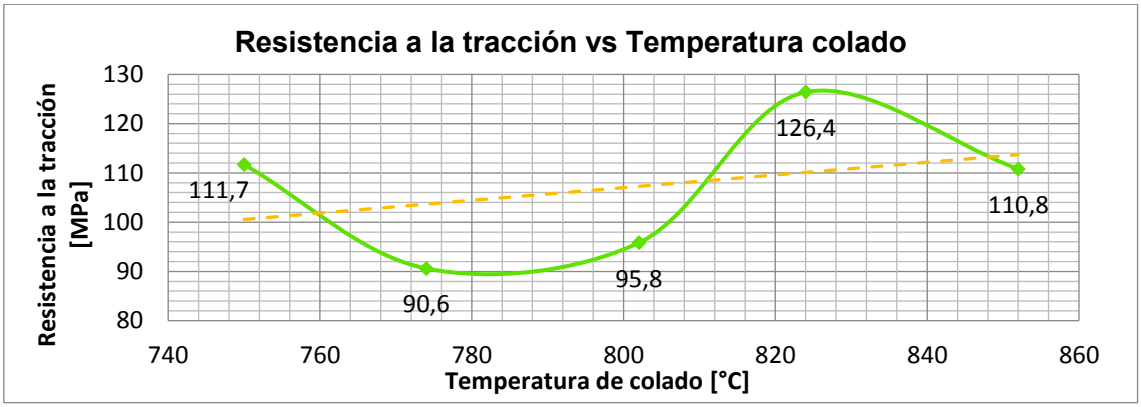


Figura 3.36. Gráfico de resistencia a la tracción vs Temperatura de colado.
(Fuente: Propia)

De acuerdo con la Figura 3.36, se tiene un valor máximo de resistencia a la tracción igual a 126,4 MPa con un valor de 825ºC de temperatura de colado, y su valor mínimo de 90,6 MPa con un valor de 774ºC de temperatura de colado.

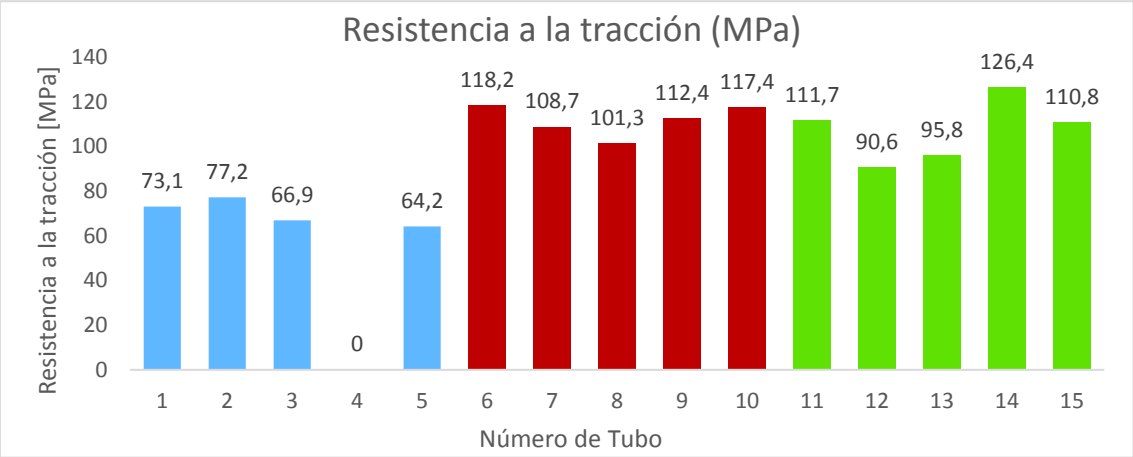


Figura 3.37. Valores de resistencia a la tracción de todos los tubos.
(Fuente: Propia)

Del gráfico de valores de resistencia a la tracción de todos los tubos, Figura 3.37, se obtiene que el tubo 5 presente la menor resistencia con un valor igual a 64,2 MPa; y que el tubo 14 tenga la máxima resistencia con un valor igual a 126,4 MPa.

3.7.2. Análisis del ensayo de tracción

En esta sección se discutirá la propiedad más significativa en el uso ingenieril, la resistencia a la tracción. Las probetas de aluminio al tener fractura frágil no presentan

una elongación notable, es decir, no tienen zona plástica, por lo que no se tomará en cuenta para su análisis.

Con respecto al ensayo fallido del tubo número cuatro, pudo deberse a que la probeta tenía algún defecto que se vio influenciado por el agarre de las mordazas de la máquina. Y para aquellas probetas que tienen fractura fuera de la marca se debió a que los radios de su geometría fueron realizados manualmente con una lima, lo que debió disminuir su ancho más de lo necesario en esa zona, y disminuyendo la resistencia más que en el resto de la probeta.

Los resultados de la resistencia a la tracción en los tubos del 1 al 5 muestran una tendencia a disminuir a medida que las revoluciones del molde aumentan, esto puede deberse a que a más velocidad de rotación más poros superficiales e internos se forman en el tubo, lo que conlleva a debilitar al material.

En el segundo grupo, tubos del 6 al 10, se puede ver que los resultados tienen una tendencia descendente hasta una temperatura aproximada de 250ºC y posteriormente un incremento. Los valores de resistencia a la tracción descienden del tubo 6 al tubo 8, y los valores ascienden del tubo 8 al tubo 10; de este comportamiento se puede decir:

- La posible causa de que los valores descienden puede ser que los gases atrapados comienzan a juntarse, incrementando los tamaños de los poros, a medida que la temperatura del molde aumenta, disminuyendo la resistencia mecánica.
- Lo posible causa de la ascendencia de los valores puede deberse a que los gases a partir de los 250ºC se concentran más en la superficie del tubo, afectando en mayor grado a su acabado superficial, y mejorando su resistencia mecánica.

Analizando los resultados de los tubos 11 al 15, se puede ver que los datos tienen valores altos y bajos, similar al gráfico de porosidad, es decir, mientras la porosidad aumenta o disminuye, la resistencia a la tracción también aumenta o disminuye, esto puede deberse a la dispersión o agrupación de los defectos que se pueden ver en las Figuras 3.15, 3.16, 3.17, 3.18 y 3.19 (tubos 11 al 15 respectivamente); de este análisis se puede destacar que el tubo 11 tiene mayor porosidad que el tubo 12, y pese a ello, el tubo 11 presenta una mejor resistencia a la tracción, esto puede ser debido a que los defectos del tubo se encuentran muy dispersos en el tubo, lo que no debilitaría de manera notable al material.

3.8. Ensayo de espectrometría

3.8.1. Resultados

Adicionalmente a los tubos obtenidos se les realizó un análisis de espectrometría, para determinar su composición química y analizar el efecto de los elementos aleantes que presenta cada tubo.

Los resultados de la espectrometría fueron proporcionados por el Laboratorio de Fundición de la EPN y se presentan en la Tabla 3.11, y contiene los porcentajes de los elementos más comunes en las aleaciones de aluminio, los cuales son: silicio (Si), hierro (Fe), cobre (Cu), manganeso (Mn), magnesio (Mg), cromo (Cr), zinc (Zn) y titanio (Ti). (Stefanescu, 1988). El informe técnico completo del ensayo se encuentra en el Anexo IV.

Tabla 3.11. Resultados del ensayo de espectrometría.

Número de Tubo	Al (%)	Si (%)	Fe (%)	Cu (%)	Mn (%)	Mg (%)	Cr (%)	Zn (%)	Ti (%)	Otros (%)
1	98,81	0,483	0,256	0,024	0,018	0,348	0,0047	0,016	0,012	0,028
2	98,88	0,465	0,236	0,021	0,018	0,321	0,0045	0,014	0,015	0,026
3	99,01	0,386	0,154	0,007	0,028	0,379	0,0022	0,007	0,015	0,011
4	98,64	0,356	0,162	0,013	0,021	0,387	0,0140	0,358	0,018	0,031
5	98,97	0,448	0,224	0,025	0,019	0,246	0,0054	0,020	0,015	0,028
6	99,00	0,393	0,186	0,013	0,020	0,338	0,0041	0,010	0,016	0,020
7	98,83	0,458	0,206	0,017	0,015	0,424	0,0039	0,014	0,013	0,019
8	98,79	0,486	0,199	0,037	0,018	0,399	0,0038	0,017	0,016	0,034
9	99,01	0,447	0,174	0,013	0,018	0,276	0,0036	0,017	0,014	0,027
10	98,15	0,354	0,307	0,014	0,021	0,377	0,0034	0,735	0,016	0,023
11	98,95	0,404	0,167	0,016	0,015	0,392	0,0033	0,016	0,014	0,023
12	98,73	0,432	0,359	0,021	0,022	0,321	0,0078	0,067	0,012	0,028
13	98,84	0,461	0,202	0,011	0,015	0,42	0,0320	0,010	0,014	0,000
14	98,60	0,455	0,197	0,015	0,015	0,399	0,0037	0,278	0,013	0,024
15	98,85	0,439	0,304	0,009	0,012	0,315	0,0022	0,047	0,010	0,012
Valor promedio	98,80	0,431	0,222	0,017	0,018	0,356	0,0066	0,108	0,014	0,022
Valor mínimo	98,15	0,354	0,154	0,007	0,012	0,246	0,002	0,007	0,010	0,000
Valor máximo	99,01	0,486	0,359	0,037	0,028	0,424	0,032	0,735	0,018	0,034
Rango	0,86	0,132	0,205	0,030	0,016	0,178	0,030	0,728	0,008	0,034

(Fuente: Laboratorio de Fundición de la EPN)

En la Tabla 3.11 se puede observar que la mayoría de los elementos tienen valores similares y no presentan mucha variación entre sí, con excepción del porcentaje de zinc, su valor máximo es de 0,735% en el tubo 10, y su valor mínimo es de 0,007% en el tubo 3.

Para su comparación y posterior análisis se presenta la Tabla 3.12, con el contenido promedio de los componentes químicos de los tubos de aluminio, y composición química de las aleaciones correspondientes a la chatarra de aluminio utilizada en la fundición.

Tabla 3.12. Valor promedio de la composición de los tubos y de las aleaciones de la chatarra.

	Al (%)	Si (%)	Fe (%)	Cu (%)	Mn (%)	Mg (%)	Cr (%)	Zn (%)	Ti (%)	Otros (%)
Valor promedio	98,80	0,431	0,222	0,017	0,018	0,356	0,0066	0,108	0,014	0,022
Aleación 6063	Restante	0,20-0,60	0,35	0,10	0,10	0,45-0,90	0,10	0,10	0,10	0,15
Aleación 6005	Restante	0,60-0,90	0,35	0,10	0,10	0,40-0,60	0,10	0,10	0,10	0,15

(Fuente: Propia y CEDAL)

3.8.2. Análisis del ensayo de espectrometría

Este tipo de análisis se lo realizó con el fin de demostrar que todos los tubos tienen similares cantidades de los elementos aleantes, y por lo tanto sus resultados son completamente consecuencia de las variaciones de los parámetros del proceso de colado centrífugo y no de su composición química.

De la Tabla 3.11 de resultados se verifica que la mayoría de los elementos aleantes tienen similares porcentajes, sin embargo, el único elemento aleante que presenta una gran variación entre los tubos obtenidos es el zinc. La mayoría de los tubos tienen valores de zinc menores al 0.020%, mientras que, los tubos 12 y 14 tienen más del doble de este valor; y los tubos 4, 10 y 14 sobrepasan más de 10 veces el mismo valor. La aparición del zinc pudo deberse a:

- Parte de la chatarra utilizada tenía algunos elementos de la aleación aluminio-zinc, o también llamado Aluzinc.

- Algunos elementos de la chatarra pudieron haber sido lacado, proceso que involucra un cromatizado, lo que conlleva a sumergir al aluminio en una solución de cromato de zinc.

A pesar de que se encuentre una variación enorme con la cantidad de zinc, este no representa un inconveniente en los resultados ya que como dice (Stefanescu, 1988), la adición de zinc no tiene beneficios significativos al aluminio, salvo para su tratamiento térmico o envejecimiento.

Al comparar la composición química promedio de los tubos con las aleaciones correspondientes a la chatarra, se tienen las siguientes observaciones:

- Comparando con la aleación 6063, la mayoría de los elementos están dentro de los límites, a excepción del Zinc, el cual tiene un valor ligeramente superior al permitido.
- Comparando con la aleación 6005, los únicos elementos que no se encuentran dentro de los límites son el Silicio y el Zinc. El Silicio está por debajo de los permitido, y el Zinc con un valor superior del límite.

3.9. Evaluación de los tubos de aluminio sin costura

Todos los tubos obtenidos serán evaluados respecto a su porosidad, rugosidad superficial, resistencia a la tracción y la presencia de defectos superficiales. Como se fabricaron quince tubos, entonces cada una de estas características serán ponderadas con un valor del 1 al 15, siendo el valor de 1 la ponderación correspondiente al tubo con mejor característica y así sucesivamente en orden ascendente hasta el valor 15 que corresponde al tubo de inferior característica. Por lo tanto, al sumar la ponderación de cada característica evaluada de cada tubo se obtendrá la valoración total. La valoración total con menor valor corresponde al tubo con mejor características y el de mayor valor corresponde al tubo con deficientes características.

3.9.1. Evaluación de rugosidad y defectos superficiales

La ponderación de la rugosidad y los defectos superficiales se realizó basándose en la inspección y comparación visual de cada tubo. A continuación, se presenta la Tabla 3.13 donde se evalúa estas dos características con el objetivo de determinar el tubo con mejor apariencia y acabado superficial.

Tabla 3.13. Evaluación de rugosidad y defectos superficiales.

Número de Tubo	Rugosidad Superficial (/15)	Defectos superficiales (/15)	Valoración Total (/30)
1	13	14	27
2	7	13	20
3	6	15	21
4	5	12	17
5	9	6	15
6	3	7	10
7	11	9	20
8	8	4	12
9	4	10	14
10	10	3	13
11	15	5	20
12	12	8	20
13	1	11	12
14	2	2	4
15	14	1	15

(Fuente: Propia)

En la Tabla 3.13 se observa que el tubo número 14 tiene la menor valoración total (4/30) por lo tanto es el tubo con mejor apariencia y acabado superficial; por el contrario el tubo número 1 tiene la mayor valoración total (27/30) que corresponde al tubo con deficiente apariencia y acabado superficial.

3.9.2. Evaluación de porosidad interna y resistencia a la tracción

Los resultados del análisis de porosidad y del ensayo de tracción son utilizados como base para la ponderación de cada tubo. La porosidad interna es evaluada junto con la resistencia a la tracción, porque estos defectos internos pueden convertirse en concentradores de esfuerzos afectando la resistencia mecánica del tubo. En la Tabla 3.14 se evalúa estas dos características con el objetivo de determinar el tubo con mejor resistencia mecánica.

Tabla 3.14. Evaluación de porosidad interna y resistencia a la tracción.

Número de Tubo	Porosidad (/15)	Resistencia a la Tracción (/15)	Valoración Total (/30)
1	6	12	18
2	5	11	16
3	9	13	22
4	11	15	26
5	14	14	28
6	1	2	3
7	13	7	20
8	8	8	16
9	10	4	14
10	15	3	18
11	7	5	12
12	2	10	12
13	4	9	13
14	12	1	13
15	3	6	9

(Fuente: Propia)

La tabla anterior indica que el tubo número 6 tiene la menor valoración total (3/30), entonces es el tubo con mejor resistencia mecánica, en cambio el tubo número 5 tiene la mayor valoración total (28/30), entonces es el tubo que presenta menor resistencia mecánica de todos.

3.9.3. Evaluación total

La evaluación total incluye a las características anteriormente analizadas: porosidad, rugosidad superficial, resistencia a la tracción y defectos superficiales. La evaluación total tiene por objetivo encontrar al tubo que posee un buen acabado superficial (apariencia) y alta resistencia mecánica. Los resultados de esta evaluación se pueden ver en la Tabla 3.15.

Tabla 3.15. Evaluación de las características de los tubos de aluminio sin costura.

Número de Tubo	Porosidad (/15)	Rugosidad Superficial (/15)	Resistencia a la Tracción (/15)	Defectos superficiales (/15)	Valoración Total (/60)
1	6	13	12	14	45
2	5	7	11	13	36
3	9	6	13	15	43
4	11	5	15	12	43
5	14	9	14	6	43
6	1	3	2	7	13
7	13	11	7	9	40
8	8	8	8	4	28
9	10	4	4	10	28
10	15	10	3	3	31
11	7	15	5	5	32
12	2	12	10	8	32
13	4	1	9	11	25
14	12	2	1	2	17
15	3	14	6	1	24

(Fuente: Propia)

Al observar los resultados de la Tabla 3.15, el tubo con mejor acabado superficial y resistencia mecánica es el número 6 con una valoración total de 13/60 y el tubo número 14 con una valoración de 17/60, se mencionan estos dos tubos ya que la diferencia en su calificación es de menos de 5 puntos; y el tubo con deficiente acabado superficial y resistencia mecánica es el número 1 con una valoración total de 45/60.

3.10. Resumen de análisis

Después de realizar un análisis y comparación de los resultados obtenidos se pueden resaltar los siguientes aspectos:

- Los defectos superficiales encontrados en los tubos son: superficies rugosas, poros, traslapes y/o cicatrices superficiales e inclusiones no metálicas.

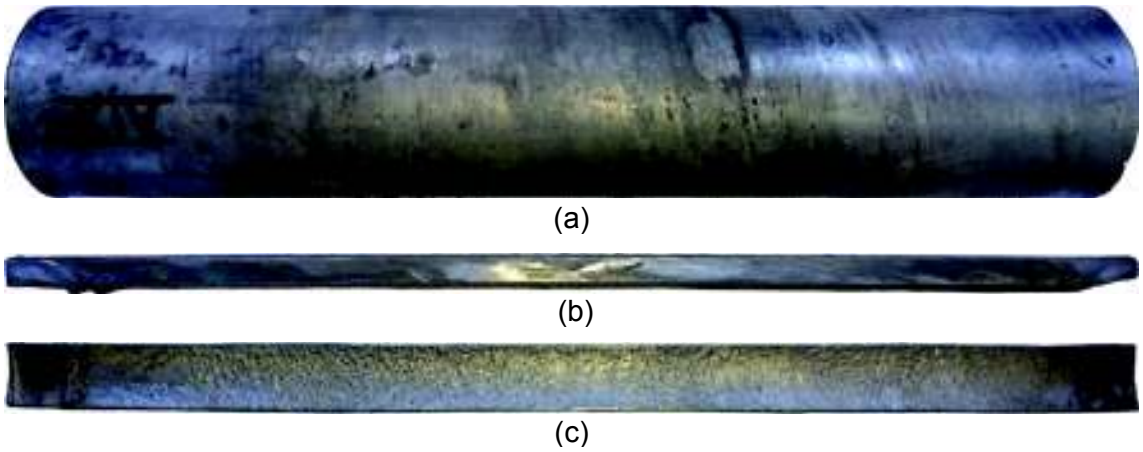
- Se requiere un vertido rápido para evitar la formación de traslapes, cicatrices superficiales y tubos de sección longitudinal no uniforme.
- El correcto vertido y cantidad apropiada de aluminio resultan en tubos de secciones longitudinales uniformes.
- A mayor velocidad de rotación del molde, mayor es la presencia de poros superficiales y poros internos.
- La rugosidad disminuye mientras la velocidad de rotación del molde aumenta.
- La resistencia a la tracción disminuye al aumentar las revoluciones del molde, debido a la presencia de porosidad.
- A mayor temperatura de precalentamiento del molde, menor es la existencia de poros superficiales, sin embargo, el porcentaje de poros internos aumenta.
- La variación de la temperatura de precalentamiento no muestra mucha influencia en la aparición de traslapes, cicatrices superficiales y superficies rugosas.
- La rugosidad no tiene una sola tendencia con la variación de temperatura de precalentamiento.
- La resistencia a la tracción no tiene una tendencia clara al variar la temperatura de precalentamiento del molde debido a la presencia de poros superficiales y su acumulación en ciertas zonas del tubo.
- A mayor temperatura de colado, menor es la presencia de traslapes, cicatrices superficiales.
- La variación de la temperatura de colado no muestra mucha influencia en la existencia de poros superficiales y el porcentaje de poros internos.
- La rugosidad no tiene una tendencia clara al variar la temperatura de colado.
- De manera similar al punto anterior, la resistencia a la tracción no tiene una tendencia definida al variar la temperatura de colado debido a la acumulación o dispersión de los poros.
- El tubo número 14 tiene la mejor apariencia y un buen acabado superficial que los demás tubos; por el contrario, el tubo número 1 corresponde al tubo con deficiente apariencia y acabado superficial.
- El tubo número 6 tiene la mejor resistencia mecánica, en cambio el tubo número 5 presenta menor resistencia mecánica de todos.
- Los tubos que combina un buen acabado superficial y alta resistencia mecánica son los números 6 y 14, mientras que, el tubo con deficiente acabado superficial y resistencia mecánica es el número 1.

Considerando todos los aspectos anteriormente descritos, se determina los parámetros óptimos para el proceso de fundición centrífuga utilizados para la máquina de colado centrífugo horizontal del Laboratorio de Fundición de la EPN, en la Tabla 3.16. Los tubos resultantes del uso de estos parámetros se presentan en la Figura 3.38 y Figura 3.39.

Tabla 3.16. Parámetros óptimos del proceso de colado centrífugo horizontal.

Características consideradas del tubo	Número de tubo de referencia	Velocidad de rotación del molde	Temperatura de precalentamiento del molde	Temp. de colado
Buen acabado superficial	14	1198 RPM	355ºC	824ºC
Alta resistencia mecánica	6	1198 RPM	165ºC	801ºC
Buen acabado superficial y alta resistencia mecánica	6	1198 RPM	165ºC	801ºC
	14	1198 RPM	355ºC	824ºC

(Fuente: Propia)

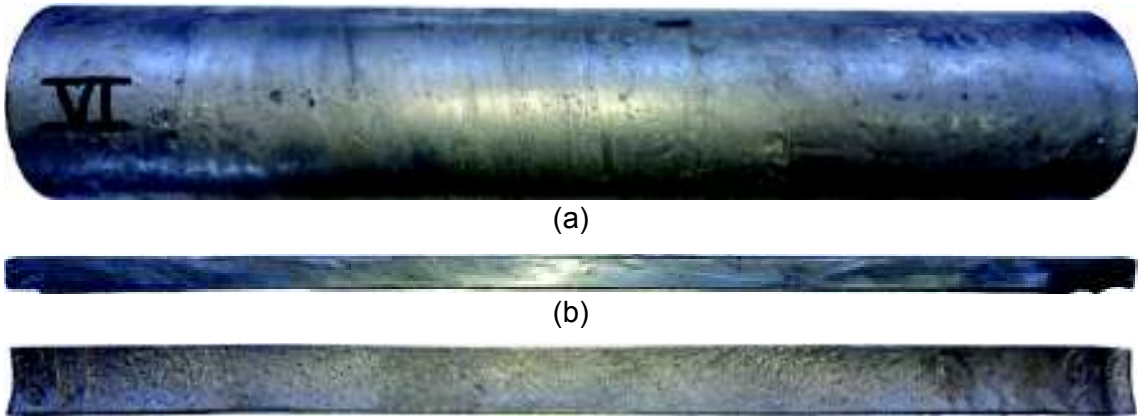


(a)

(b)

(c)

Figura 3.38. Fotos del tubo con mejor acabado superficial.
(a) Acabado superficial externo, (b) Sección longitudinal, (c) Acabado superficial interno.
(Fuente: Propia)



(a)

(b)

(c)

Figura 3.39. Fotos del tubo con alta resistencia mecánica
(a) Acabado superficial externo, (b) Sección longitudinal, (c) Acabado superficial interno.
(Fuente: Propia)

4. CONCLUSIONES

- Las modificaciones realizadas a la máquina de colado centrífugo horizontal del Laboratorio de Fundición de la EPN corrigieron los problemas de funcionamiento que presentaba, y se pudo obtener los tubos de aluminio sin costura a través de la variación de la velocidad de rotación del molde, la variación de la temperatura de precalentamiento del molde y la variación de la temperatura de colado. Sin embargo, en el transcurso de la obtención de los tubos se presentaron otros inconvenientes en la máquina, estos inconvenientes son: la producción de muchos desechos contaminantes, como es la grasa quemada, y la generación de muchos vapores tóxicos durante su utilización.

- La velocidad de vertido influye mucho en la formación del tubo, el metal fundido debe ser colado rápidamente, caso contrario se forman traslapes y se obtiene un tubo con espesor no uniforme, debido a la diferencia de temperaturas que se va presentando por la solidificación del metal que va ingresando al molde.

- La velocidad de rotación del molde influye en las características físicas y mecánicas del tubo, ya que, a mayor velocidad, la rugosidad superficial mejora; sin embargo, afecta negativamente a los defectos externos e internos y a la resistencia a la tracción, ya que a mayor velocidad los poros de gas que se quedan atrapados y pueden acumularse en zonas del tubo ocasionando una disminución de la resistencia del material en dichas zonas. En investigaciones relacionadas al colado centrífugo horizontal, Shailesh, Sundarrajan y Komaraiah (2014) mencionan, el aumentar la velocidad de rotación del molde incrementa la resistencia última a la tracción debido al efecto de la fuerza centrífuga actuando en el metal, sin embargo, en este proyecto ocurre lo contrario y se pueden deber a que las altas velocidades generan vibraciones en la máquina lo cual conlleva a la formación de porosidades en el tubo.

- La variación de la temperatura de precalentamiento desde los 165°C a 340°C no tiene mucha influencia en la aparición de traslapes y cicatrices superficiales, cuando la temperatura de precalentamiento llega alrededor de los 340°C se disminuye un poco estos defectos, pero esta disminución no es tan considerable. Con respecto a la porosidad, la rugosidad superficial y la resistencia a la tracción, es mejor que la temperatura de precalentamiento se mantenga alrededor de los 165°C, ya que

temperaturas del molde cercanas a este valor disminuyen el porcentaje de porosidad, se obtienen rugosidades superficiales menores y aumenta la resistencia a la tracción.

- La variación de la temperatura de colado desde los 750°C hasta los 850°C influye en la formación de traslapes y cicatrices superficiales; mientras se va aumentando la temperatura de colado dentro de este rango, estos defectos se van disminuyendo. La cantidad de porosidad no está influenciada por este rango de temperaturas de colado, ya que los porcentajes de porosidad de los tubos indican valores similares. La rugosidad superficial es mejor cuando la temperatura de colado esta entre los 790°C hasta los 830°C aproximadamente. La resistencia a la tracción no está muy clara en este rango de temperaturas ya que se obtienen valores que disminuyen y aumentan sin una tendencia definida.

- Con el análisis de espectrometría se pudo determinar que el elemento aleante con mayor variación entre todos los tubos es el Zinc, sin embargo, este afecta únicamente en tratamientos térmicos, por esta razón no tiene influencia en este proyecto.

- Si los tubos fabricados por este método van a tener una aplicación que requiera un buen acabado superficial y no necesite altas prestaciones mecánicas, los parámetros con los que se consiguió el tubo número 14 serán de referencia para el proceso. Pero si su aplicación requiere altas prestaciones mecánicas, independientemente de su acabado superficial externo, ya que puede ser mejorado posteriormente con un maquinado, los parámetros del tubo número 6 deben ser referentes del proceso.

- Los parámetros óptimos del proceso de obtención de tubos de aluminio sin costura, de la máquina de colado centrífugo horizontal que actualmente posee el Laboratorio de Fundición de la EPN, corresponde a los parámetros de obtención del tubo número 14 (caracterizado por su buen acabado superficial) y del tubo número 6 (caracterizado por su alta resistencia mecánica). Sin embargo, el más recomendable para su aplicación en la práctica es el uso de los parámetros del tubo 6 que son: 1198 RPM, temperatura de precalentamiento de 165ºC y temperatura de colado de 801ºC, debido a que sus bajas temperaturas de precalentamiento del molde y de colado, en comparación a la del tubo número 14, son más fáciles de alcanzar.

- Los parámetros de obtención del tubo número 14 no se recomienda en su uso práctico, debido a la complicación que representa la obtención de la elevada temperatura a las que el molde deben llegar (355ºC), además de quemarse la grasa de los rodamientos rápidamente a elevadas temperaturas, el molde requerirá una mayor cantidad de calor, es decir, necesitará más combustible (gas licuado de petróleo) ya que el área alrededor del molde que tiene una considerable interacción con el ambiente, lo que dificultará la obtención de dicha temperatura de precalentamiento del molde.

- Los parámetros del tubo número 6 resultan en la obtención de un tubo con valores bajos del porcentaje de porosidad y de rugosidad promedio, 1,07% y 4,14µm respectivamente, también presenta una alta resistencia a la tracción (118,2 MPa), en comparación con la mayoría de tubos, esto a pesar de que sus defectos superficiales no es uno de los mejores, pero se puede realizar un maquinado al tubo para eliminar estos defectos, además las temperaturas de precalentamiento y de colado se pueden alcanzar sin complicaciones.

- El diseño mecánico empleado para la rotación del molde, limita la obtención de tubos de aluminio sin costura libre de defectos superficiales, porque los rodamientos están unidos directamente al molde, y en el momento de precalentar el molde o colar el aluminio, las altas temperaturas afectan directamente a la grasa de los rodamientos, ocasionando que la grasa se derrita y queme, provocando vapores tóxicos. Además, del problema de la unión directa entre el rodamiento y el molde, existen espacios alrededor del molde que no están aislados térmicamente, causando que la temperatura de precalentamiento no sea uniforme, produciéndose defectos superficiales en las zonas donde están colocados los rodamientos.

- Otro problema ocasionado por el diseño que tiene la máquina es la vibración, esta es generada por las altas velocidades de rotación a las que debe llegar el molde, por un mal balance del molde o un acople deficiente entre los engranajes. Este problema provoca que los poros superficiales e internos aparezcan en mayor cantidad.

- Para evitar que la grasa de los rodamientos se derrita y se derrame a través de las carcasas se debe cambiar el método empleado para hacer girar el molde, ya que este no debe estar en contacto directo con los rodamientos, para lograr una temperatura

uniforme en el molde. La solución a este problema puede ser la utilización de un mecanismo similar a las mordazas de un torno, ya que tiene menor contacto con el molde, o a su vez se debe implementar un sistema de enfriamiento para que la grasa no sobrepase su temperatura de funcionamiento.

- Para lograr que la temperatura del molde sea uniforme, se debe evitar en lo mínimo su interacción con el medio ambiente, esto se lo puede realizar con el correcto aislamiento térmico en los espacios alrededor del molde. Adicionalmente, se debería incorporar un sistema que permita medir la temperatura del molde.

- El problema de las vibraciones puede mitigarse o eliminarse con la correcta alineación y balanceo del sistema de transmisión de la máquina y del molde, también se puede corregir el problema al aumentar la robustez de la máquina.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Águeda, E., Navarro, J., & Morales, T. (2012). Sistemas de transmisión de fuerzas y trenes de rodaje (Primera ed.). Madrid: Paraninfo.

Amado, M., & Daroqui, F. (2015). Revision of the solvus limir of Al-Mg2Si Pseudo Binary Phase Diagram. Procedia Materials Science, 1079-1088.

American Association of State Highway and Transportation Officials, & American Society for Testing and Materials. (2009). E8/E8M-09 Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. ASTM International.

ARIAN. (s.f.). ARIAN-Control & Instrumentation. Obtenido de ARIAN-Control & Instrumentation: http://www.arian.cl/downloads/nt-002.pdf

ASME. (2010). B46.1-2009 Surface Texture (Surface Roughness Waviness, and Lay). New York: American Society of Mechanical Engineers.

Bravo, C. (2016). Ingeniería para todos. Obtenido de Ingeniería para todos: http://www.ingenieriaparatodos.com/2016/05/temperatura.html

BRUKER. (2017). ww.bruker.com. Obtenido de ww.bruker.com: https://www.bruker.com/fileadmin/_processed_/csm_Q2_ION_picture_without_BG_-_Banner_21f84ecee5.jpg

BRUKER. (2017). www.bruker.com. Obtenido de www.bruker.com: https://www.bruker.com/es/products/x-ray-diffraction-and-elemental-analysis/optical-emission-spectrometry/q2-ion/technical-details.html

Calidad y Técnica Industrial, S.A. de C.V.-CYTI. (s.f.). www.cyti.com.mx. Obtenido de www.cyti.com.mx: http://www.cyti.com.mx/espectrometria.asp

Capello, E. (1971). Tecnología de la Fundición. Gustavo Gili.

CEDAL. (s.f.). www.cedal.com.ec. Obtenido de www.cedal.com.ec: www.cedal.com.ec/produccion.html

Chirita, G., Soares, D., & Silva, F. S. (2008). Advantajes of the centrifugal casting technique for the production of structural components with Al-Si alloys. Materials & Design, 29(1), 20-27.

Garrido, A., & Sánchez, V. (2011). Determinación de la Metodología para la Obtención de Aleaciones de Aluminio de Fundición Maquinables sin Porosidades. Tesis de grado, Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Mecánica, Quito.

Goyos, L., & Martínez, H. (1994). Tecnología de Fundición II. La Habana: Editorial ISPJAE.

Grainger, S.A. (s.f.). www.grainger.com.mx. Recuperado el 2017 de 8 de 16, de www.grainger.com.mx: www.grainger.com.mx/categoria/Tuber%C3%ADa-de-Aluminio/c/20989

Groover, M. (2007). Fundamentos de manufactura moderna: materiales, procesos y sistemas (Tercera ed.). México: McGraw-Hill.

GTM-Grupo Tecnología Mecánica. (s.f.). www3.fi.mdp.edu.ar. Obtenido de www3.fi.mdp.edu.ar: http://www3.fi.mdp.edu.ar/tecnologia/archivos/TecFab/10.pdf

Huilca, L., & Almeida, E. (2012). Obtención de Tubos sin Costura por el Proceso de Colado por Centrifugado Horizontal. Tesis de grado, Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Mecánica.

INSIZE. (s.f.). insize.com. Obtenido de insize.com: http://insize.com/products/tools/pdf/digital%20microscope/ISR-C100.pdf

INSIZE. (s.f.). insize.com. Obtenido de insize.com: http://insize.com/products/tools/pdf/digital%20microscope/ISR-S1000B.pdf

Kalpakjian, S., & Schmid, S. (2008). Manufactura, ingeniería y tecnología (Quinta ed.). México: Pearson Educación.

Kalpakjian, S., & Schmid, S. (2008). Manufactura, ingeniería y tecnología. México: Pearson Educación.

Kaufman, J., & Rooy, E. (2004). Aluminum Alloy Castings. Properties, Processes and Applications. ASM International.

Morales, C., & Villamarín, F. (2017). Estudio y Caracterización de una Varilla de Refuerzo obtenida medante un proceso desarrollado por la empresa Ideal Alambrec y su validación de acuerdo a las normativas de Aceros Estructurales. Tesis grado, Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Mecánica, Quito.

Patel, K., Patel, H., & Patel, F. (2015). Efect of mould rotation Speed on hardness and Sliding wear resistance of Hypereutectic Al-Si alloy. Indian Journal of Applied Research, 5(1), 78-81.

Rao, A. S., Tattimani, M. S., & Rao, S. S. (2015). Effect of Rotational Speeds on the Cast Tube During Vertical Centrifugal Casting Process on Appearanc, Microstructure, and Hardness Behaviour for Al-2Si Alloy. Metallurgical and Materials Transactions B, 46(2), 793-799.

Rodríguez, M., Llardent, A., González, A., & García, A. (2012). Elasticidad y resistencia de materiales I. Madrid: Universidad Nacional de Educación a Distancia.

Saha, P. (2000). Aluminum Extrusion Technology. ASM International.

Shailesh, P., Sundarrajan, S., & Komaraiah, M. (2014). Optimization of process parameters of Al-Si alloy by centrifugal casting tecnique using Taguchi design of experiments. Procedia Materials Science, 6, 812-820.

Stefanescu, D. M. (1988). Metals Handbook, Volume 15 - Casting. ASM International.

Tinius Olsen. (2010). www.e-vaccaro.com.ar. Obtenido de www.e-vaccaro.com.ar: http://www.e-vaccaro.com.ar/attachments/article/1106/Serie-Super%20L.pdf

Titov, N. D., & Stepanov, Y. A. (1981). Tecnología del Proceso de Fundición. MIR.

Top 1 Oil. (s.f.). Top 1 Oil. Recuperado el 05 de 09 de 2017, de Top 1 Oil: www.topoil.com/USA/products/others/pdf/10620_PDS.pdf

Universidad Politécnica de Cartagena. (s.f.). www.upct.es. Obtenido de www.upct.es: http://www.upct.es/sait/es/tecnicas-espectrometricas-y-afines/espectrometro-de-emision-por-chispa

Villamarín, D., & Vozmediano, B. (2010). Proyecto de Implementación, Adecuación e Instalaciones para los equipos del laboratorio de fundición de la ESPE. Tesis grado, ESPE-Facultad de Ingeniería Mecánica, Sangolqui.

Wallace, J. F. (1953). The engineering aspects of centrifugal casting. Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology. Department of Metallurgy.

Weg. (s.f.). ecatalog.weg.net. Recuperado el 05 de 09 de 2017, de ecatalog.weg.net: ecatalog.weg.net/FILES/tecnico/motor/desenho/TP-ES_12478_895065961.PDF

Weg. (s.f.). ecatalog.weg.net. Recuperado el 05 de 09 de 2017, de ecatalog.weg.net: ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-cfw300-guia-de-instalacion-rapida-10003587650-guia-rapido-espanol.pdf

Williams Metals and Welding Alloys, I. (2013). www.wmwa.net. Recuperado el 16 de 8 de 2017, de www.wmwa.net: www.wmwa.net/ESP/metal-products/aluminum/

ANEXOS

Anexo I.

ESPECIFICACIONES DE LA GRASA USADA EN LOS RODAMIENTOS

TOP 1 OIL PRODUCTS COMPANY

Revisión: febrero 2013

Hoja de Datos del Producto

TOP 1 SYNTHETIC HI-TEMP GREASE

DESCRIPCIÓN

TOP 1 SYNTHETIC HI-TEMP GREASE combina excelentes propiedades de multiuso con un punto de descenso alto para darle a la grasa aplicaciones en un rango alto de temperatura. Formulada con aceites básicos sintéticos la TOP 1 SYNTHETIC HI-TEMP GREASE provee magnífica protección, durabilidad y desempeño en condiciones extremas para lubricar una amplia variedad de equipo en la industria automotora, agraria, marina, de la construcción y de minería.

Sus usos incluyen cojinetes rodadores, cojinetes de transportador, chasis automotor, pines para bisagra de excavadoras y cojinetes sometidos a choque de cargas.

ATRIBUTOS Y BENEFICIOS

- Grasa sintética de complejo de litio de primera calidad
- EP/Aditivos contra el desgaste + corrosión/inhibidores de oxidación que proveen excelente protección y minimizan el desgate durante condiciones severas para extender la vida de la grasa
- NLGI GC-LB calificado para usarse como lubricante para el eje de transmisión, chasis y cojinetes de rodamiento
- Alta resistencia al lavado con agua e insoluble en agua
- Fórmula extremadamente estable de complejo de litio que retiene su consistencia aun bajo altas temperaturas y altas condiciones de carga

ESPECIFICACIONES TÍPICAS

GRADO, NLGI	**ASTM TEST**	**3 Y MÁS SUAVES**
Espesante		Complejo de Litio
Textura		Suave, Fibrosa
Color, Observado		Azul
Viscosidades:		
cSt @ 100°C		42.4
cSt @ 40°C		644
60 Trabajo de Penetración	D-217	245-265
Punto de Goteo, °F (°C)	D-566	500 (260) Min
Índice de Viscosidad		110
Fuga de Cojinetes Rodadores, clasificación	D-1263	Pass
Lavados de Agua, % pérdida	D-1264	9.2 @ 175°F
Prevención de óxido, clasificación	D-1743	Pass
Estabilidad de Oxidación, psi drop	D-942	5.0 @ 100 hrs
Carga OK Timken, lbs.	D-2509	80
Four-Ball EP Punto de Soldadura, kgf	D-2596	315
Rango de Temperatura Aproximada °F (°C)		0 to 325 (-18 to 163)
Número del Producto		
24x1 lb		10620
50x14 oz		10621
6x4 lb		10624
35 lb pail		10625
400 lb drum		10627

Anexo II.

NOMENCLATURA DE LOS DEFECTOS DE FUNDICIÓN

Para la inspección de los tubos e identificación de los defectos se empleó la nomenclatura estándar dado por el Comité Internacional de Asociaciones Técnicas de Fundición. A continuación, se presenta la clasificación de esta nomenclatura y ejemplos gráficos en la Figura II.1.

A: Proyecciones metálicas.

Son aletas, proyecciones o rebabas como superficies rugosas y ampollas.

B: Cavidades.

Son porosidades rugosas o redondeadas, expuestas o internas, también se considera a las puntas de alfiler, picaduras, sopladuras y cavidades por contracción.

C: Discontinuidades.

Son los puntos fríos, grietas, y desgarramientos en frio o en caliente. Los desgarres y grietas resultan al no permitir que el metal se contraiga libremente en su fase de solidificación.

D: Superficie defectuosa.

Son traslapes, pliegues y cicatrices superficiales, escamas de óxido y capas de arena adherida.

E: Fundición incompleta.

Son fallas por una solidificación prematura, fugas y volumen insuficiente del metal. Estos defectos aparecen cuando la temperatura del metal fundido es bajo y su vaciado es lento.

F: Dimensiones o formas incorrectas.

Se presentan cuando la contracción es irregular, montaje erróneo por un modelo deformado, o por una tolerancia de contracción inapropiada.

G: Inclusiones.

La mayoría son no metálicas y se forman en el moldeo, fusión o solidificación; se forman cunado en la fusión el metal liquido reacciona con el medio ambiente, crisol o molde; o por atrapamiento en el metal liquido de escorias o elementos extraños. (Kalpakjian & Schmid, Manufactura, ingeniería y tecnología, 2008)

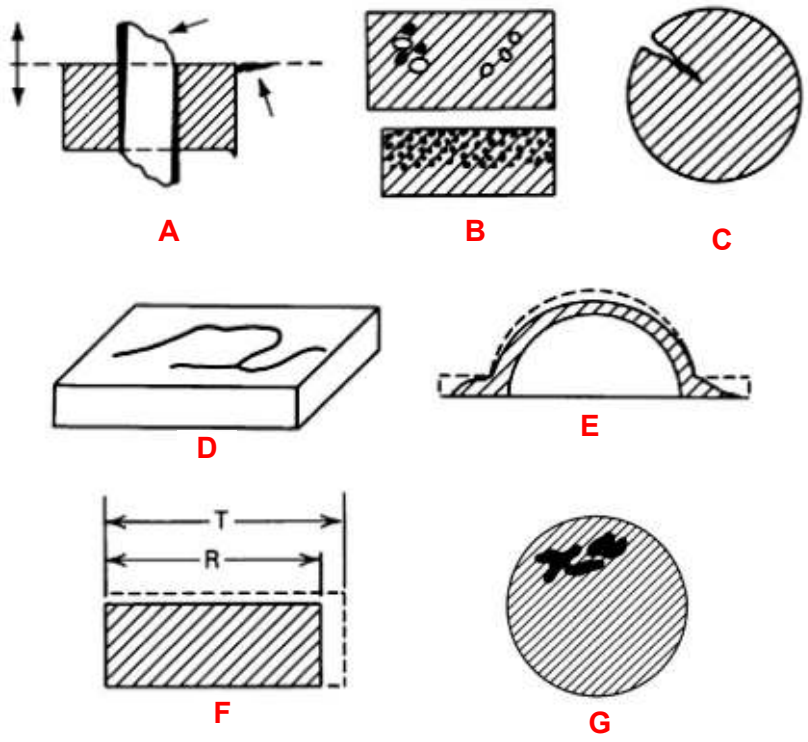


Figura II.1. Ejemplos de los defectos de fundición.
(Fuente: Stefanescu, 1988)

Anexo III.

RESULTADOS DEL ENSAYO DE TRACCIÓN

INFORME TÉCNICO

LAEV – AGO.17.12.0

Quito, 9 de agosto de 2017

TRABAJO SOLICITADO POR: **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**
M. Sc. Fausto Hernán Oviedo Fierro

Los resultados contenidos en el presente informe corresponden a ensayos realizados en probetas de aluminio pertenecientes a los señores Mario Gómez y Henry Jami para el desarrollo del proyecto de titulación "ESTUDIO PARAMÉTRICO DEL PROCESO DE COLADO CENTRÍFUGO HORIZONTAL PARA LA OBTENCIÓN DE TUBOS DE ALUMINIO SIN COSTURA". Las probetas fueron entregadas en el Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones de la Escuela Politécnica Nacional.

RESULTADOS

1. **MUESTRAS:** Catorce (14) probetas planas de aluminio para ensayo de tracción.

ENSAYO DE TRACCIÓN

En la tabla 1 se muestran los resultados del ensayo de tracción realizado a las probetas.

Tabla 1. Resultados del ensayo de tracción de las probetas.

Id.	Ancho promedio	Espesor promedio	Carga máxima registrada		Resistencia a la tracción		% Elongación en 50 mm
	mm	mm	lbf	N	ksi	Mpa	
T1	12,31	17,60	15.836	3.560	10,6	73,1	6,3
T2	11,06	15,06	12.855	2.890	11,2	77,2	7,2
T3	12,93	14,51	12.544	2.820	9,7	66,9	6,2
T5	13,04	15,04	12.588	2.830	9,3	64,2	8,9
T6	12,59	11,51	17.215	3.870	17,2	118,8	10,4
T7	13,06	13,13	18.638	4.190	15,8	108,7	12,2
T8	13,61	12,10	16.681	3.750	14,7	101,3	9,4
T9	13,28	12,13	18.104	4.070	16,3	112,4	13,8*
T10	13,07	12,87	19.750	4.440	17,0	117,4	6,3*
T11	12,58	12,73	17.882	4.020	16,2	111,7	5,7*
T12	13,65	11,51	14.234	3.200	13,1	90,6	6,3*

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

Continuación Tabla 1							
T13	11,99	12,27	14.101	3.170	13,9	95,8	5,0
T14	13,16	11,31	18.816	4.230	18,3	126,4	10,6
T15	12,87	11,82	16.859	3.790	16,1	110,8	9,7

* Falla fuera de las marcas.

	REVISADO POR:	APROBADO POR:
Firma:		
Nombre:	Ing. Jonathan Castro, M.Sc.	Ing. Mario Granja, M.Sc.
Cargo:	**PROFESOR OCASIONAL II**	**JEFE**

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA EPN QUITO-ECUADOR

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA LAEV ESCUELA POLITECNICA NACIONAL

A continuación, se presentan los resultados gráficos, desde la Figura III.1 hasta la Figura III.14.

Tubo 1:

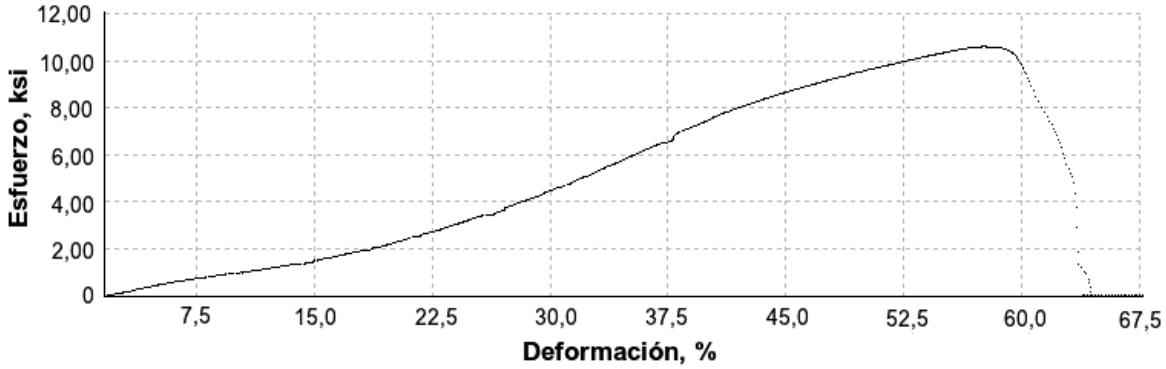


Figura III.1. Resultado gráfico del tubo 1.

Tubo 2:

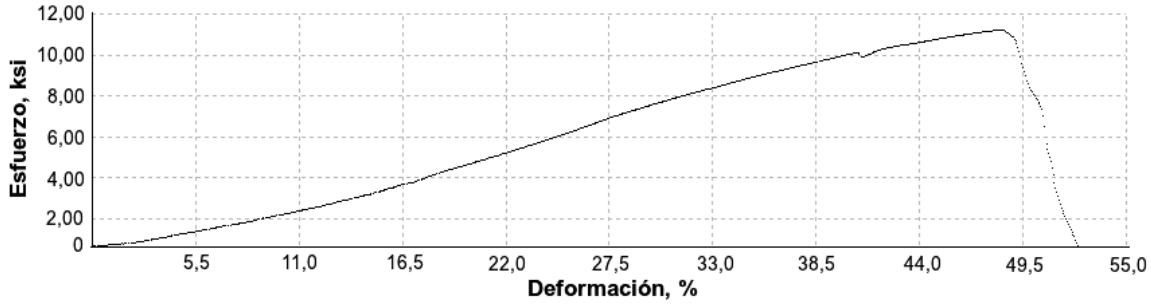


Figura III.2. Resultado gráfico del tubo 2.

Tubo 3:

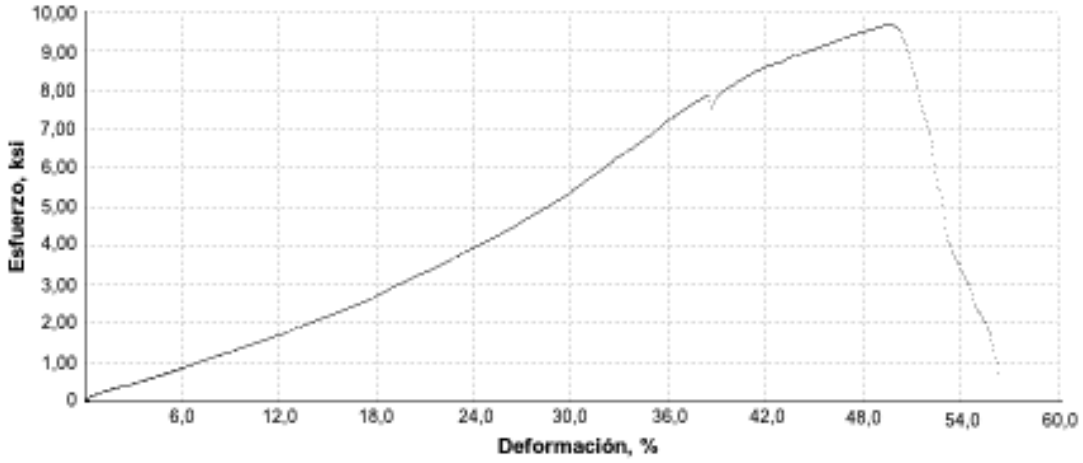


Figura III.3. Resultado gráfico del tubo 3.

Tubo 4: Ensayo fallido

Tubo 5:

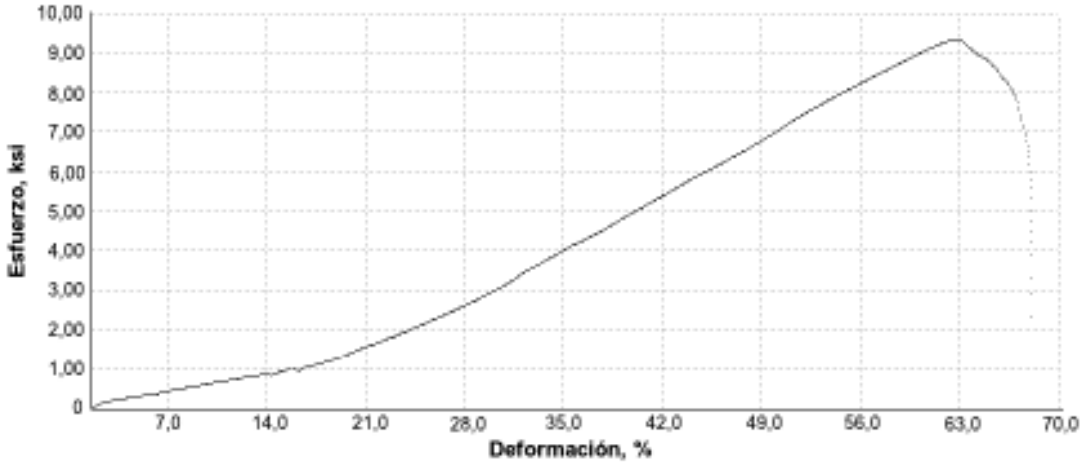


Figura III.4. Resultado gráfico del tubo 5.

Tubo 6:

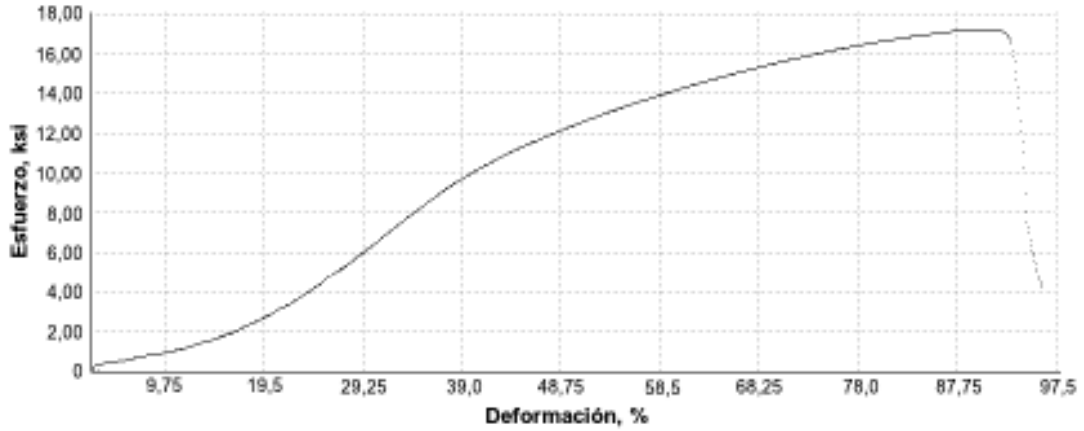


Figura III.5. Resultado gráfico del tubo 6.

Tubo 7:

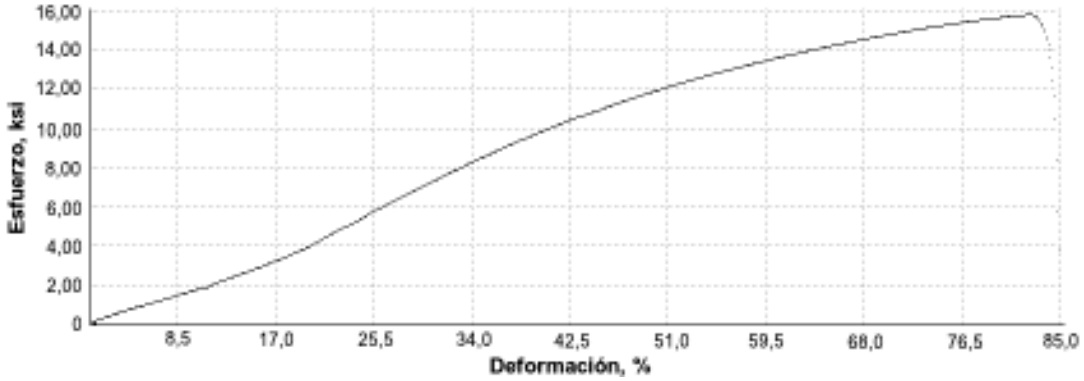


Figura III.6. Resultado gráfico del tubo 7.

Tubo 8:

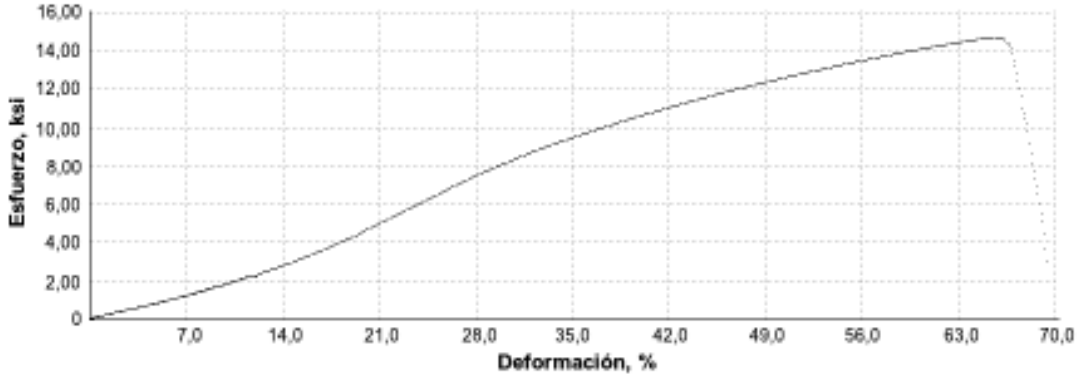


Figura III.7. Resultado gráfico del tubo 8.

Tubo 9:

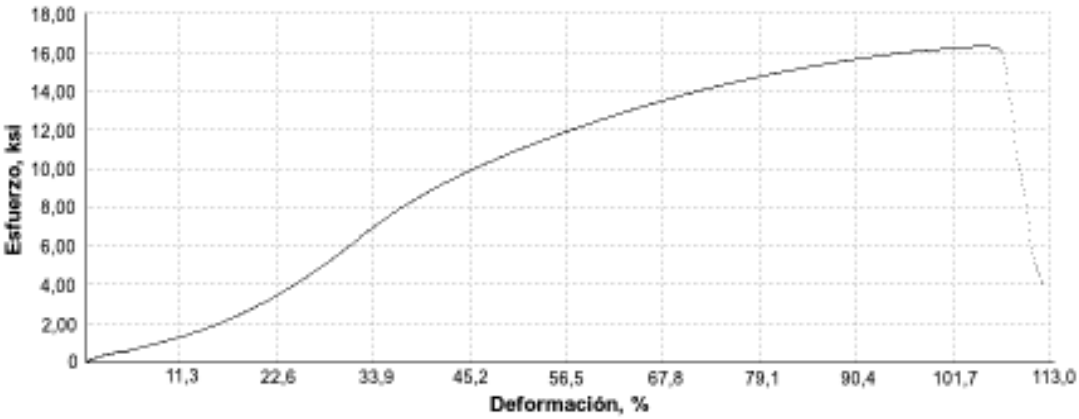


Figura III.8. Resultado gráfico del tubo 9.

Tubo 10:

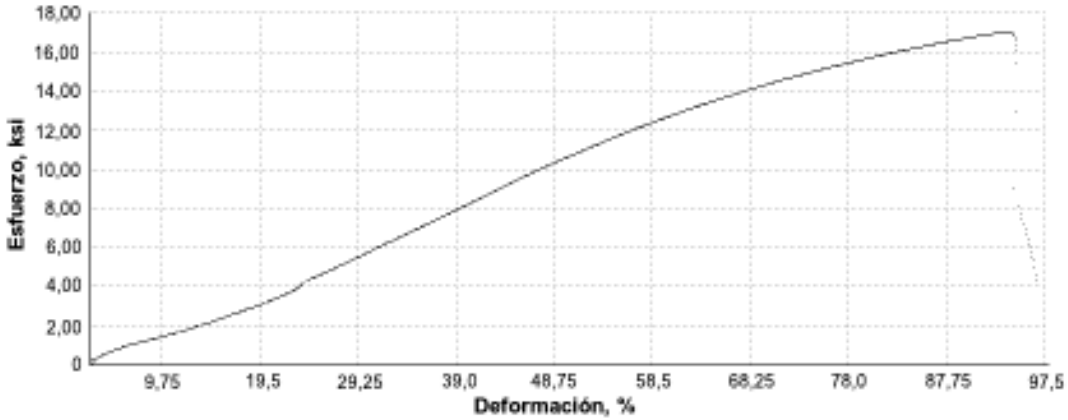


Figura III.9. Resultado gráfico del tubo 10.

Tubo 11:

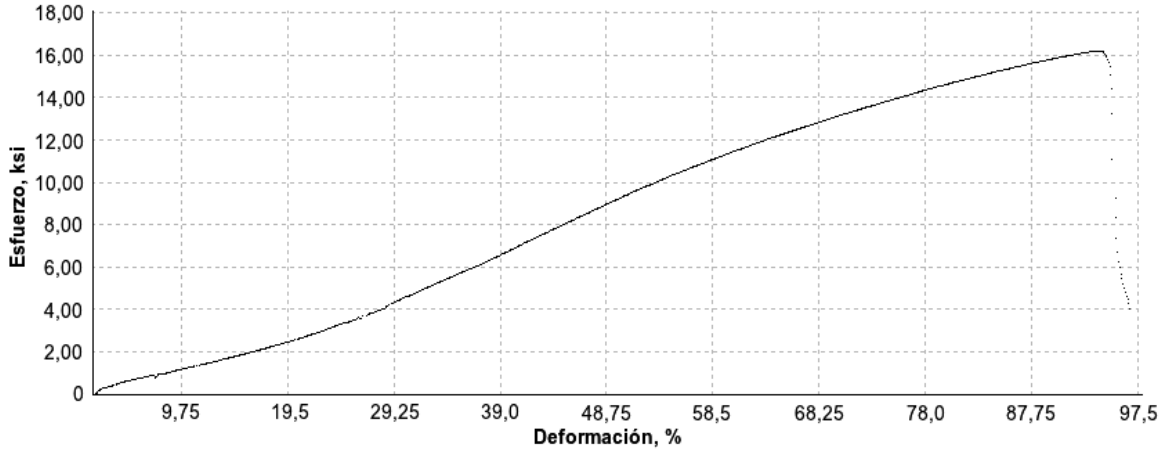


Figura III.10. Resultado gráfico del tubo 11.

Tubo 12:

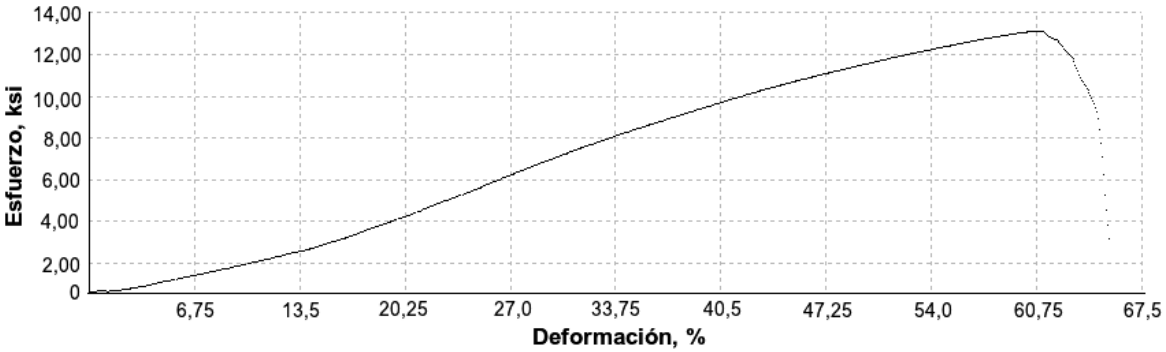


Figura III.11. Resultado gráfico del tubo 12.

Tubo 13:

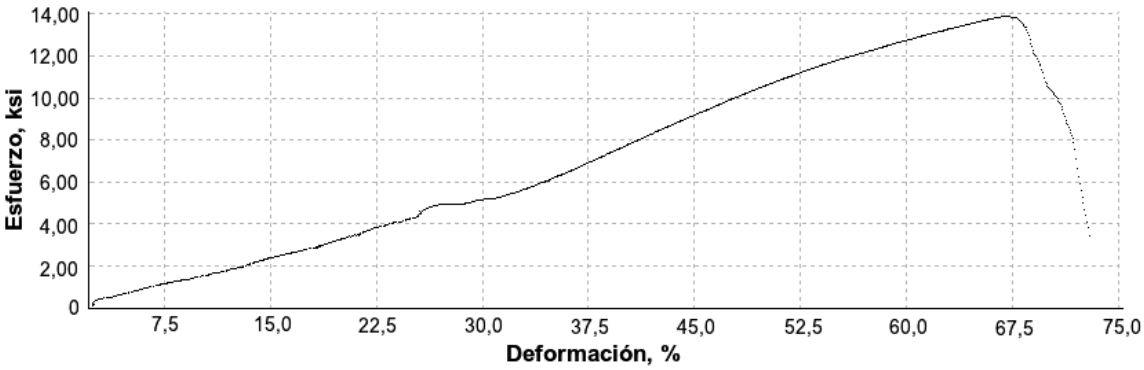


Figura III.12. Resultado gráfico del tubo 13.

Tubo 14:

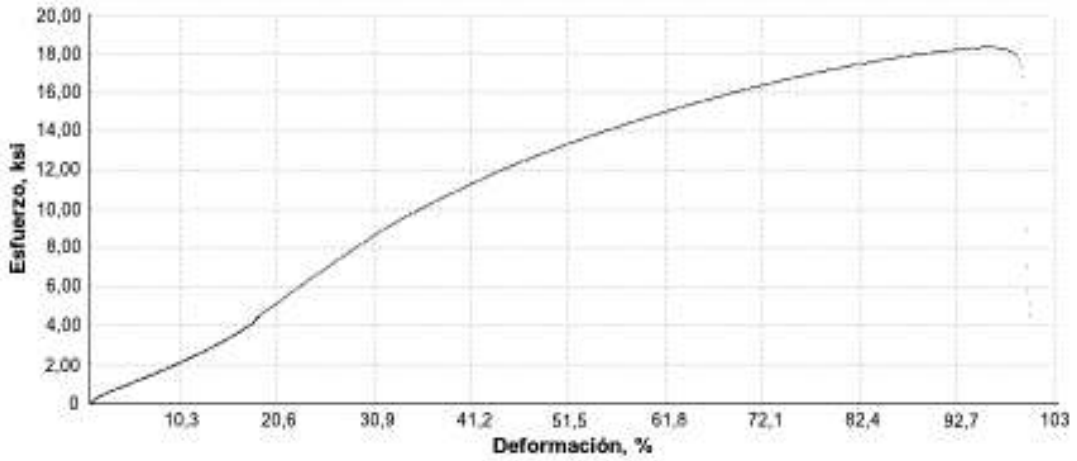


Figura III.13. Resultado gráfico del tubo 14.

Tubo 15:

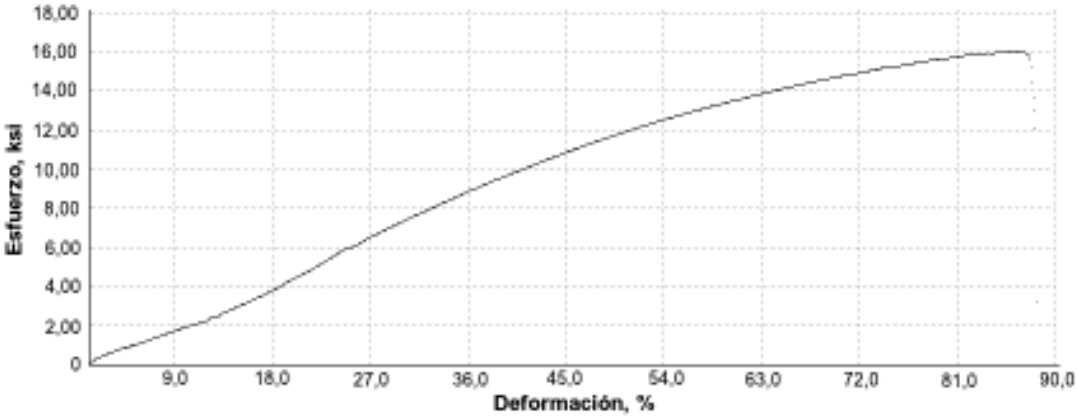


Figura III.14. Resultado gráfico del tubo 15.

Anexo IV.

RESULTADOS DEL ENSAYO DE ESPECTROMETRÍA

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

DEPARTAMENTO DE MATERIALES

LABORATORIO DE FUNDICIÓN

INFORME TÉCNICO

Solicitado por: Mario Gómez / Henry Jami

Tipo de Trabajo: Espectrometría por chispa

Fecha: 15 de agosto del 2017

Realizado por: Ing. Oscar Sotomayor, Ing. Diego Marchán

Descripción: Ensayo de espectrometría por chispa en probetas de aluminio relacionadas al proyecto de titulación "Estudio paramétrico del proceso de colado centrifugo para la obtención de tubos de aluminio sin costura".

1. ANTECEDENTES.

Se recibe en el Laboratorio de Fundición de la Escuela Politécnica Nacional quince probetas sueltas.
Se solicita realizar la prueba con la finalidad de determinar los componentes presentes en las muestras entregadas

2. IDENTIFICACIÓN DE LAS PROBETAS.

Las probetas para el análisis correspondiente son identificadas como se muestra a continuación:

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL LABORATORIO DE FUNDICION F I M

Nombre	Identificación de la probeta
Probetas Aluminio	P1: Muestra 1
	P2: Muestra 2
	P3: Muestra 3
	P4: Muestra 4
	P5: Muestra 5
	P6: Muestra 6

	P7: Muestra 7
	P8: Muestra 8
	P9: Muestra 9
	P10: Muestra 10
	P11: Muestra 11
	P12: Muestra 12
	P13: Muestra 13
	P14: Muestra 14
	P15: Muestra 15

3. VALORES OBTENIDOS

El análisis de espectrometría por chispa se realiza empleando el espectrómetro marca BRUKER modelo Q2 ION. Para el análisis se toman 3 mediciones por muestra promediando su valor.

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

DEPARTAMENTO DE MATERIALES

LABORATORIO DE FUNDICIÓN

	Muestras															
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15
Elemento	Valor [%]	Valor [%]	Valor [%]	Valor [%]	Valor [%]	Valor [%]	Valor [%]	Valor [%]	Valor [%]	Valor [%]	Valor [%]	Valor [%]	Valor [%]	Valor [%]	Valor [%]
Silicio [Si]	0,483	0,465	0,386	0,356	0,448	0,393	0,458	0,486	0,447	0,354	0,404	0,432	0,461	0,455	0,439
Hierro [Fe]	0,256	0,236	0,154	0,162	0,224	0,186	0,206	0,199	0,174	0,307	0,167	0,359	0,202	0,197	0,304
Cobre [Cu]	0,024	0,021	0,0074	0,013	0,025	0,013	0,017	0,037	0,013	0,014	0,016	0,021	0,011	0,015	0,009
Manganeso [Mn]	0,018	0,018	0,028	0,021	0,019	0,02	0,015	0,018	0,018	0,021	0,015	0,022	0,015	0,015	0,012
Magnesio [Mg]	0,348	0,321	0,379	0,387	0,246	0,338	0,424	0,399	0,276	0,377	0,392	0,321	0,42	0,399	0,315
Cromo [Cr]	0,0047	0,0045	0,0022	0,014	0,0054	0,0041	0,0039	0,0038	0,0036	0,0034	0,0033	0,0078	0,032	0,0037	0,0022
Niquel [Ni]	0,0058	0,0053	<0,005	<0,005	0,0055	<0,005	<0,005	0,0064	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
Zinc [Zn]	0,016	0,014	0,0073	0,358	0,02	0,01	0,014	0,017	0,017	0,735	0,016	0,067	0,0098	0,278	0,047
Titanio [Ti]	0,012	0,015	0,015	0,018	0,015	0,016	0,013	0,016	0,014	0,016	0,014	0,012	0,014	0,013	0,0097
Plomo [Pb]	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Estaño [Sn]	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
Vanadio [V]	0,0068	0,0078	0,0058	0,0097	0,008	0,0075	0,0076	0,0082	0,0087	0,0082	0,0078	0,0075	0,008	0,0076	0,0038
Estroncio [Sr]	0,0032	0,003	0,003	0,0032	0,0034	0,0034	0,0032	0,0031	0,0033	0,0024	0,0033	0,0029	0,0031	0,0029	0,0031
Circonio [Zr]	<0,002	<0,002	0,0032	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002
Cadmio [Cd]	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
Cobalto [Co]	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003
Boro [B]	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Plata [Ag]	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Bismuto [Bi]	<0,006	<0,006	<0,006	<0,006	<0,006	<0,006	<0,006	<0,006	<0,006	<0,006	<0,006	<0,006	<0,006	<0,006	<0,006
Calcio [Ca]	0,0019	0,0017	0,003	0,0018	0,0019	0,0013	0,0031	0,0025	0,0025	0,0023	0,002	0,0021	0,0029	0,0018	0,0017
Litio [Li]	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3
Aluminio [Al]	98,81	98,88	99,01	98,64	98,97	99	98,83	98,79	99,01	98,15	98,95	98,73	98,84	98,6	98,85

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL
LABORATORIO DE FUNDICION

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

DEPARTAMENTO DE MATERIALES

LABORATORIO DE FUNDICIÓN

Ing. Diego Marchán

Técnico Responsable

Ing. Óscar Betancourt

Jefe del Laboratorio de Fundición.

Anexo V.

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL MOTOR

		Nr.:
		Fecha: 05-SEP-2017

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:

WEG		Nr.:
		Fecha: 05-SEP-2017

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	: 220/380/440 V
Corriente nominal	: 14,0/8,12/7,01 A
Corriente de arranque	: 89,7/51,9/44,9 A
Ip/In	: 6,4
Corriente en vacío	: 6,47/3,75/3,24 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
Rodamiento	6206 ZZ	6205 ZZ
Intervalo de lubrificación	---	---
Cantidad de grasa	---	---

Carga	Factor de potencia	Rendimiento (%)
100%	0,81	85,5
75%	0,75	85,5
50%	0,63	85,0

Observaciones:

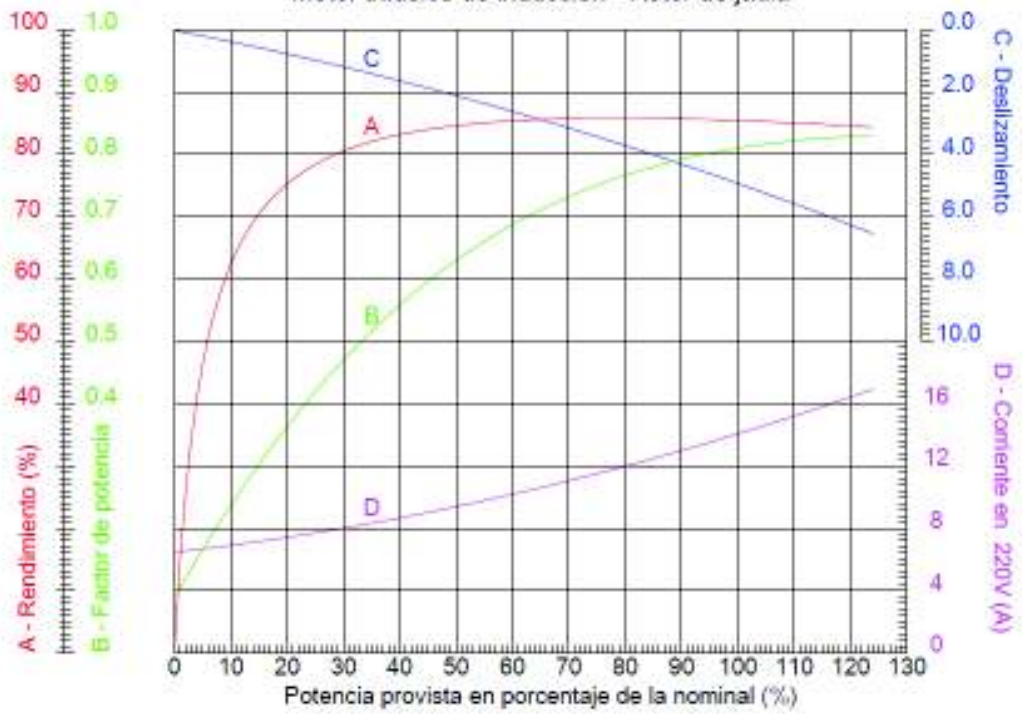
Rendimiento de acuerdo con el método indirecto de IEC 60034-1:2007 con pérdidas aleatorias de la carga determinadas de las medidas.

Ejecutante	Verificado

weg		Nr.:
		Fecha: 05-SEP-2017

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	: 220/380/440 V	Par de arranque	: 270 %
Corriente nominal	: 14,0/8,12/7,01 A	Par máxima	: 290 %
Clase de aislación	: F		

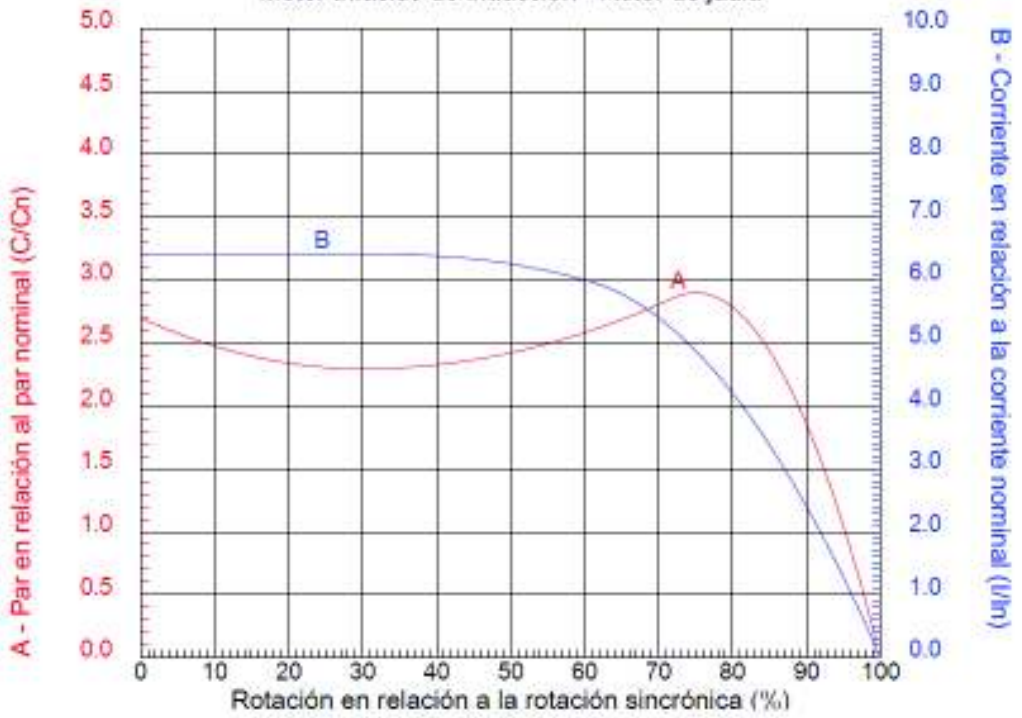
Observaciones:

Ejecutante	Verificado

		Nr.:
		Fecha: 05-SEP-2017

CURVAS CARACTERÍSTICAS EN FUNCIÓN DE LA ROTACIÓN

Motor trifásico de inducción - Rotor de jaula

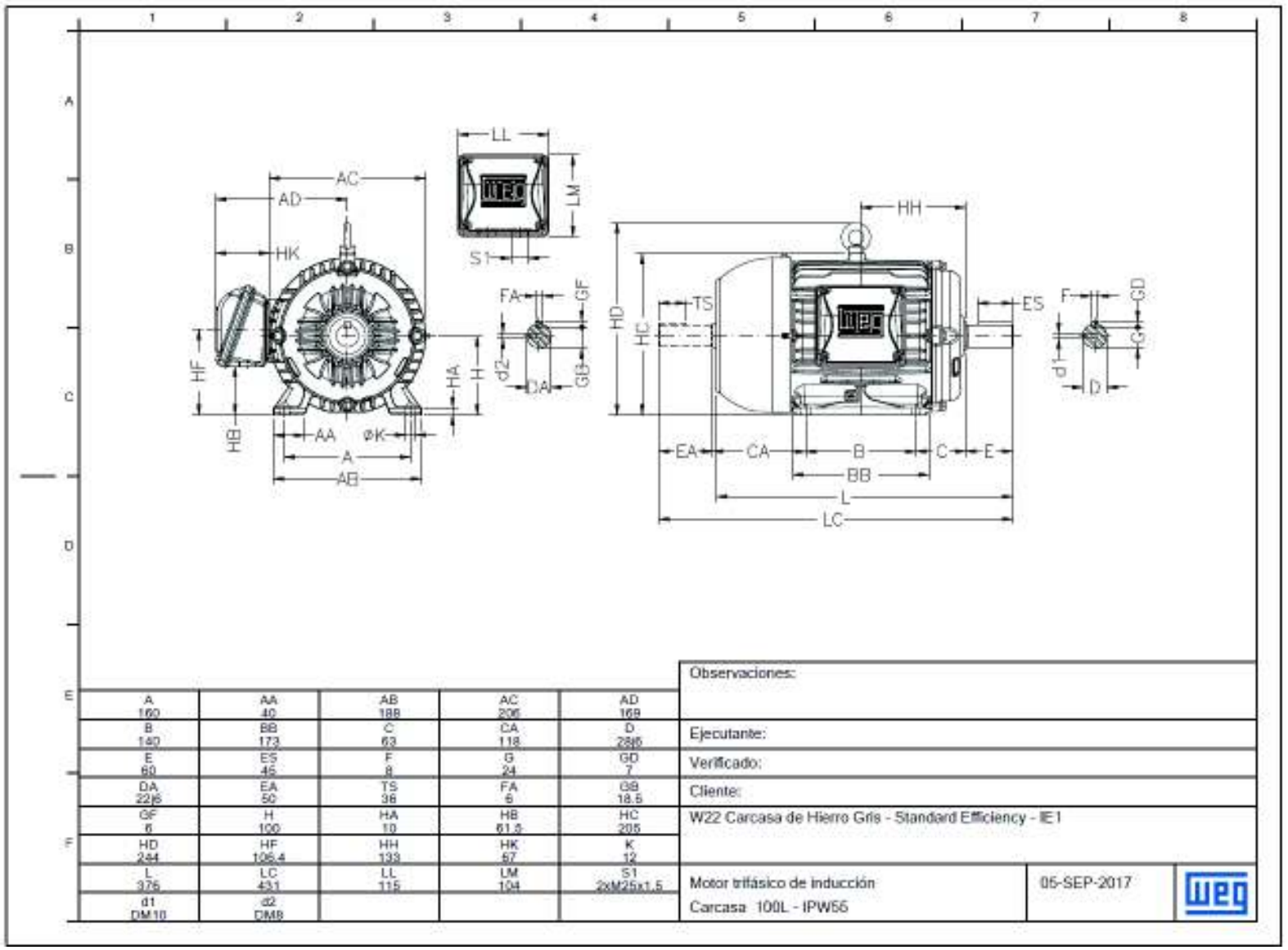


Cliente	:
Línea del producto	: W22 Carcasa de Hierro Gris - Standard Efficiency - IE1

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	: 220/380/440 V	Par de arranque	: 270 %
Corriente nominal	: 14,0/8,12/7,01 A	Par máxima	: 290 %
Clase de aislación	: F		

Observaciones:

Ejecutante	Verificado



A 160	AA 40	AB 188	AC 206	AD 169	Observaciones:
B 140	BB 173	C 63	CA 118	D 28j6	Ejecutante:
E 60	ES 45	F 8	G 24	GD 7	Verificado:
DA 22j6	EA 50	TS 36	FA 6	GB 18.5	Cliente:
GF 6	H 100	HA 10	HB 61.5	HC 205	W22 Carcasa de Hierro Gris - Standard Efficiency - IE1
HD 244	HF 106.4	HH 133	HK 57	K 12	
L 375	LC 431	LL 115	LM 104	S1 2xM25x1.5	Motor trifásico de inducción Carcasa 100L - IPW55
d1 DM10	d2 DM8				05-SEP-2017

Anexo VI.

GUÍA DE INSTALACIÓN RÁPIDA DEL VARIADOR DE FRECUENCIA

Español

Guía de Instalación Rápida

CFW300 Micro Drive

13259312

1 INSTRUCCIONES DE SEGURIDAD

Esta guía de instalación rápida contiene las informaciones básicas necesarias para la puesta en funcionamiento del CFW300. El mismo fue desarrollado para ser utilizado por personas con capacitación o calificación técnica adecuadas para operar este tipo de equipo. Estas personas deben seguir las instrucciones de seguridad definidas por las normas locales. No seguir las instrucciones de seguridad puede derivar en riesgo de muerte y/o daños en el equipo.

2 AVISOS DE SEGURIDAD EN EL MANUAL

¡NOTA!
No es la intención de este guía agotar todas las posibilidades de aplicación del CFW300, ni la WEG puede asumir ninguna responsabilidad por el uso del CFW300 que no esté basado en esta guía.
Para más informaciones sobre instalación, lista completa de parámetros y recomendaciones, consulte el sitio **www.weg.net**.

¡PELIGRO!
Los procedimientos recomendados en este aviso tienen como objetivo proteger al usuario contra muerte, heridas graves y daños materiales considerables.

¡ATENCIÓN!
Los procedimientos recomendados en este aviso tienen como objetivo evitar daños materiales.

¡NOTA!
Las informaciones mencionadas en este aviso son importantes para el correcto entendimiento y buen funcionamiento del producto.

Tensiones elevadas presentes.

Componentes sensibles a descarga electrostática. No tocarlos.

Conexión obligatoria a la tierra de protección (PE).

Conexión del blindaje a la tierra.

3 RECOMENDACIONES PRELIMINARES

¡PELIGRO!
Desconecte siempre la alimentación general antes de tocar cualquier componente eléctrico asociado al convertidor. Muchos componentes pueden permanecer cargados con altas tensiones y/o en movimiento (ventiladores), incluso después de que la entrada de alimentación CA haya sido desconectada o apagada. Aguarde por lo menos 10 minutos para garantizar la total descarga de los condensadores. Siempre conecte el punto de puesta a tierra del convertidor a tierra de protección (PE).
El conector XC10 no presenta compatibilidad USB, por lo tanto, no puede ser conectado a puertas USB.
Ese conector sirve solamente de interfaz entre el convertidor de frecuencia CFW300 y sus accesorios.

¡NOTA!
Los convertidores de frecuencia pueden interferir en otros equipos electrónicos. Siga los cuidados recomendados en el manual disponible en **www.weg.net**.

No ejecute ningún ensayo de tensión aplicada en el convertidor.
En caso de que sea necesario, consulte el fabricante.

¡ATENCIÓN!
Las tarjetas electrónicas poseen componentes sensibles a descarga electrostática.
No toque directamente los componentes o conectores. En caso de que sea necesario, toque antes el punto de puesta a tierra del convertidor, el que debe estar conectado a tierra de protección (PE) o utilice pulsera de puesta a tierra adecuada.

¡ATENCIÓN!
Cuando el convertidor sea almacenado por largos períodos de tiempo, es necesario hacer el "reforming" de los condensadores. Consulte el procedimiento recomendado en **www.weg.net**.

4 SOBRE EL CFW300

El convertidor de frecuencia CFW300 es un producto de alta performance que permite el control de velocidad y de torque de motores de inducción trifásicos. Este producto proporciona al usuario las opciones de control vectorial (VVW) o escalar (V/f), ambos programables de acuerdo a la aplicación.

5 NOMENCLATURA

Tabla 1: Nomenclatura de los convertidores CFW300

	Producto y Serie	Identificación del Modelo: Tamaño	Corriente Nominal	Nº de Fases	Tensión Nominal	Frenado	Grado de Protección	Versión de Hardware	Versión de Software
Ej.:	CFW300	A	01P6	S	2	NB	20	---	---
Opciones disponibles	CFW300	Consulte la Tabla 2							En blanco = estándar
		NB = sin frenado reostático							Sx = software especial
		DB = con frenado reostático						En blanco = estándar	
		20 = IP20						Hx = hardware especial	

Tabla 2: Opciones disponibles para cada campo de la nomenclatura según la corriente y tensión nominales del convertidor

Tamaño	Corriente Nominal de Salida	Nº de Fases	Tensión Nominal	Frenado
A	01P6 = 1,6 A	S = alimentación monofásica	1 = 110...127 Vca	NB
	02P6 = 2,6 A			
	04P2 = 4,2 A			
	05P0 = 6,0 A			
	07P3 = 7,3 A			
	01P6 = 1,6 A		2 = 200...240 Vca	
	02P6 = 2,6 A			
	04P2 = 4,2 A			
	05P0 = 6,0 A			
	07P3 = 7,3 A			
	01P6 = 1,6 A	T = alimentación trifásica		
	02P6 = 2,6 A			
	04P2 = 4,2 A			
	05P0 = 6,0 A			
	07P3 = 7,3 A			
	01P6 = 1,6 A	D = alimentación CC	8 = 280...340 Vcc	
	02P6 = 2,6 A			
	04P2 = 4,2 A			
	05P0 = 6,0 A			
	07P3 = 7,3 A			
B	10P0 = 10,0 A	S = alimentación monofásica o trifásica o CC	2 = 200...240 Vca o 280...340 Vcc	DB
	15P2 = 15,2A	T = alimentación trifásica o CC		

6 RECEPCIÓN Y ALMACENAMIENTO

El CFW300 es suministrado embalado en caja de cartón. En la parte externa del embalaje existe una etiqueta de identificación que es la misma que está fijada en la lateral del convertidor.

Verifique:
- La etiqueta de identificación del CFW300 corresponde al modelo comprado.
- Si ocurrieron daños durante el transporte.

En caso de que sea detectado algún problema, contacte inmediatamente a la transportadora.
Si el CFW300 no es instalado luego de la recepción, almacénelo en un lugar limpio y seco (temperatura entre -25 °C y 60 °C) con una cobertura para evitar la entrada de polvo en el interior del convertidor.

7 ETIQUETA DE IDENTIFICACIÓN

Figura 1: Descripción de la etiqueta de identificación en el CFW300

8 DIMENSIONES

Tamaño	A mm (in)	B mm (in)	H mm (in)	L mm (in)	P mm (in)	Peso kg (lb)	Tornillo de Fijación	Torque Recomendado N.m (lbf.in)
A	95.0 (1.37)	90.1 (1.97)	157.9 (6.22)	70.0 (2.76)	148.4 (5.84)	0.900 (1.98)	M4	2 (17.7)
B	95.0 (1.37)	90.1 (1.97)	196.9 (8.06)	70.0 (2.76)	158.4 (6.24)	1.040 (2.93)	M4	2 (17.7)

Tolerancia de las cotas: ±1,0 mm (±0,039 in)

Figura 2: Dimensiones del convertidor de frecuencia para la instalación mecánica

9 INSTALACIÓN Y CONEXIÓN

Condiciones Ambientales

Evitar:
- Exposición directa a rayos solares, lluvia, humedad excesiva o brisa marina.
- Gases o líquidos explosivos o corrosivos.
- Vibración excesiva.
- Polvo, partículas metálicas o aceite suspendidos en el aire.

Condiciones ambientales permitidas para funcionamiento:
- Temperatura alrededor del convertidor: de 0 °C a 50 °C – IP20.
- Para temperatura alrededor del convertidor mayor que lo especificado arriba, es necesario aplicar una reducción de la corriente de 2 % para cada grado Celsius limitando el incremento a 10 °C.
- Humedad relativa del aire: de 5 % a 95 % sin condensación.
- Altitud máxima: hasta 1000 m - condiciones nominales.
- De 1000 m a 4000 m - reducción de la corriente de 1 % para cada 100 m por encima de 1000 m de altitud.

- Grado de contaminación: 2 (conforme EN50178 y UL508C), con contaminación no conductiva. La condensación no debe causar conducción de los residuos acumulados.

10 INSTALACIÓN ELÉCTRICA

> **¡PELIGRO!**
> - Las informaciones a seguir tienen la intención de servir como guía para obtenerse una instalación correcta. Siga también las normas de instalaciones eléctricas aplicables.
> - Asegúrese de que la red de alimentación esté desconectada antes de iniciar las conexiones.
> - El CFW300 no debe ser utilizado como mecanismo para parada de emergencia. Prevea otros mecanismos adicionales para este fin.

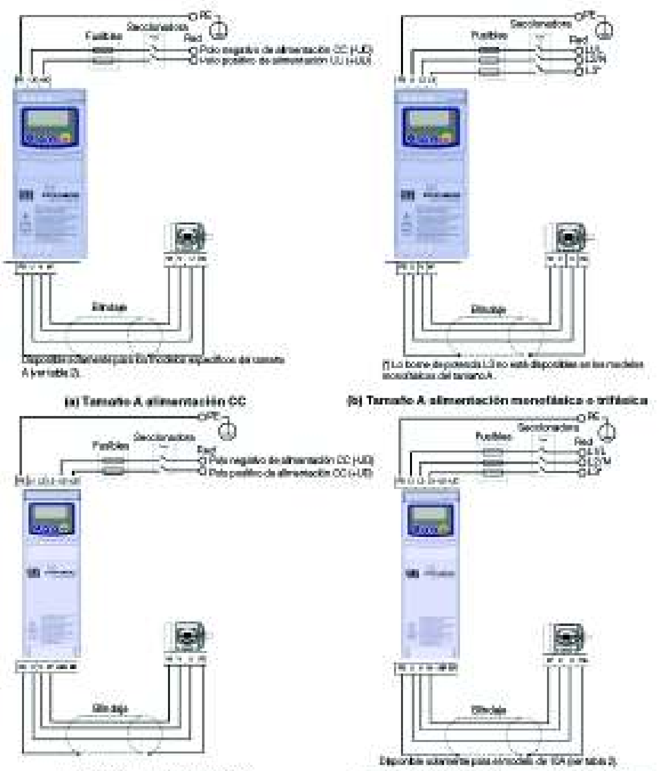
1 - bornes de potencia
2 - puntos de puesta a tierra
3 - conector del accesorio de comunicación
4 - bornes de control
5 - conector del accesorio de expansión de I/Os

Tamaño	Torque Recomendado			
	Puntos de Puesta a Tierra		Bornes de Potencia	
	N.m	Lbf.in	N.m	Lbf.in
A y B	0,8	7,2	0,8	7,2

Figura 3: Bornes de potencia, puntos de aterramiento y torques de apriete recomendado

10.1 CONEXIONES DE POTENCIA

Descripción de los bornes de potencia:
L/L1, N/L2, L3 (R,S, y T): conexión de la red de alimentación.
U, V y W: conexión para el motor.
-UD: polo negativo de la tensión para alimentación CC.
+UD: polo positivo de la tensión para alimentación CC.
+BR, BR: conexión del resistor de frenado (disponible para los modelos del tamaño B).
PE: conexión de puesta a tierra.



(a) Tamaño A alimentación CC **(b) Tamaño A alimentación monofásica o trifásica**

(c) Tamaño B alimentación CC **(d) Tamaño B alimentación monofásica o trifásica**

Figura 4: (a) a (d) Conexiones de potencia y de puesta a tierra

10.2 INSTALACIONES DE ACUERDO CON LA DIRECTIVA EUROPEA DE COMPATIBILIDAD ELECTROMAGNÉTICA

La serie de convertidores CFW300, cuando son correctamente instalados, cumplen los requisitos de la directiva de compatibilidad electromagnética.
Estos convertidores fueron desarrollados solamente para aplicaciones profesionales. Por eso no se aplican los límites de emisiones de corrientes harmónicas definidas por las normas EN 61000-3-2 y EN 61000-3-2/A 14.

10.2.1 Instalación Conforme

1. Cables de salida (cables del motor) blindados y con el blindaje conectado en ambos lados, motor y convertidor con conexión de baja impedancia para alta frecuencia. Largo máximo del cable del motor y niveles de emisión conducida y radiada conforme la Tabla 6.
2. Cables de control blindados, mantenga la separación de los demás, conforme la Tabla 3.2 del manual del usuario.
3. Puesta a tierra del convertidor conforme instrucciones del ítem 3.2.4 Conexiones de Puesta a Tierra en el manual del usuario.
4. Red de alimentación puesta a tierra.
5. Use cableado corto para puesta a tierra del filtro externo o del convertidor.
6. Ponga a tierra la chapa de montaje, utilizando un cableado lo más corto posible. Conductores planos tienen impedancia menor a altas frecuencias.
7. Use manguitos para conductos siempre que sea posible.

El CFW300 es adecuado para uso en un circuito capaz de proveer no más de 30.000 Arms amperes simétricos, máximo (127 V / 240 V) cuando es protegido por fusibles clasificados como sigue:

Tabla 3: ... de los modelos de la línea CFW300, especificaciones eléctricas principales

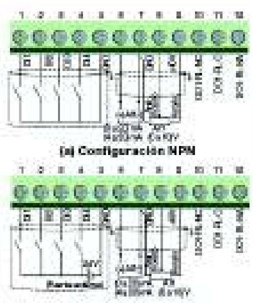
Convertidor	Nº de Fases de Alimentación	Tensión Nominal de Alimentación	Tamaño	Corriente Salida Nominal [Arms]	Corrientes de Sobrecarga 1 min [Arms]	Motor Máximo [HP/kW]	Disyuntor [A]	Disyuntor WEG	Fusible Recomendado Corriente [A]	Fusible Recomendado I²t [A²s]	Fusible WEG Recomendado	Calibre de los Cables de Potencia mm² (AWG)	Calibre del Cable de Puesta a Tierra mm² (AWG)	Frenado Reostático: Corriente Máxima (Imax) [A]	Frenado Reostático: Resistor Recomendado [Ω]	Frenado Reostático: Corriente Eficaz de Frenado [A]	Frenado Reostático: Calibre de los Cables +UD y BR mm² (AWG)
CFW300A01P6S1NB20	1	110...127 Vca	A	1,6	2,4	0,25/0,18	10,0	MPW40-3-U010	20	190	FNH00-20K-A	1,5 (16)	2,5 (14)	Frenado reostático no disponible			
CFW300A02P6S1NB20	1	110...127 Vca	A	2,6	3,9	0,5/0,37	16,0	MPW40-3-U016	25	190	FNH00-25K-A	2,5 (14)	2,5 (14)				
CFW300A04P2S1NB20	1	110...127 Vca	A	4,2	6,3	1/0,75	20,0	MPW40-3-U020	35	190	FNH00-35K-A	2,5 (14)	4,0 (12)				
CFW300A06P0S1NB20	1	110...127 Vca	A	6,0	9,0	1,5/1,10	32,0	MPW40-3-U032	40	500	FNH00-40K-A	4,0 (12)	4,0 (12)				
CFW300A01P6S2NB20	1	200...240 Vca	A	1,6	2,4	0,25/0,18	6,3	MPW40-3-D063	20	190	FNH00-20K-A	1,5 (16)	2,5 (14)				
CFW300A02P6S2NB20	1	200...240 Vca	A	2,6	3,9	0,5/0,37	10,0	MPW40-3-U010	20	190	FNH00-20K-A	1,5 (16)	2,5 (14)				
CFW300A04P2S2NB20	1	200...240 Vca	A	4,2	6,3	1/0,75	16,0	MPW40-3-U016	20	190	FNH00-20K-A	1,5 (16)	2,5 (14)				
CFW300A06P0S2NB20	1	200...240 Vca	A	6,0	9,0	1,5/1,10	16,0	MPW40-3-U016	25	500	FNH00-25K-A	2,5 (14)	4,0 (12)				
CFW300A07P3S2NB20	1	200...240 Vca	A	7,3	11,0	2/1,5	20,0	MPW40-3-U020	25	500	FNH00-25K-A	2,5 (14)	4,0 (12)				
CFW300A01P6T2NB20	3	200...240 Vca	A	1,6	2,4	0,25/0,18	2,5	MPW40-3-D025	20	190	FNH00-20K-A	1,5 (16)	2,5 (14)				
CFW300A02P6T2NB20	3	200...240 Vca	A	2,6	3,9	0,5/0,37	6,3	MPW40-3-D063	20	420	FNH00-20K-A	1,5 (16)	2,5 (14)				
CFW300A04P2T2NB20	3	200...240 Vca	A	4,2	6,3	1/0,75	10,0	MPW40-3-U010	20	420	FNH00-20K-A	1,5 (16)	2,5 (14)				
CFW300A06P0T2NB20	3	200...240 Vca	A	6,0	9,0	1,5/1,10	10,0	MPW40-3-U010	20	500	FNH00-20K-A	2,5 (14)	4,0 (12)				
CFW300A07P3T2NB20	3	200...240 Vca	A	7,3	11,0	2/1,5	16,0	MPW40-3-U016	20	420	FNH00-20K-A	2,5 (14)	4,0 (12)				
CFW300A01P6D2NB20	1	280...340 Vcc	A	1,6	2,4	0,25/0,18	2,5	MPW40-3-D025	20	-	FNH00-20K-A	1,5 (16)	2,5 (14)				
CFW300A02P6D2NB20	1	280...340 Vcc	A	2,6	3,9	0,5/0,37	6,3	MPW40-3-D063	20	-	FNH00-20K-A	1,5 (16)	2,5 (14)				
CFW300A04P2D2NB20	1	280...340 Vcc	A	4,2	6,3	1/0,75	10,0	MPW40-3-U010	20	-	FNH00-20K-A	1,5 (16)	2,5 (14)				
CFW300A06P0D2NB20	1	280...340 Vcc	A	6,0	9,0	1,5/1,10	10,0	MPW40-3-U010	20	-	FNH00-20K-A	2,5 (14)	4,0 (12)				
CFW300A07P3D2NB20	1	280...340 Vcc	A	7,3	11,0	2/1,5	16,0	MPW40-3-U016	20	-	FNH00-20K-A	2,5 (14)	4,0 (12)				
CFW300B10P0B2DB20	1/3	200...240 Vca o 280...340 Vcc	B	10,0	15,0	3/2,2	25,0	MPW40-3-U025	35	500	FNH00-35K-A	2,5 (14)	4,0 (12)	11	39	10	2,5 (14)
CFW300B15P2T2DB20	3	200...240 Vca o 280...340 Vcc	B	15,2	22,8	5/3,7	32,0	MPW40-3-U032	35	845	FNH00-35K-A	4,0 (12)	4,0 (12)	11	39	10	2,5 (14)

Para estar de acuerdo con la norma UL 508C, utilizar fusibles UL tipo J.

> **¡PELIGRO!**
> El convertidor debe ser obligatoriamente conectado a un tierra de protección (PE).
> Utilizar cableado de puesta a tierra con calibre mínimo igual al indicado en la Tabla 3.
> Conecte los puntos de puesta a tierra del convertidor a una varilla de puesta a tierra específica, o al punto de puesta a tierra específico, o inclusive, al punto de puesta a tierra general (resistencia ≤ 10 Ω).
> El conductor neutro de la red que alimenta al convertidor debe ser sólidamente puesto a tierra, no obstante, el mismo no debe ser utilizado para puesta a tierra del convertidor.
> No comparta el cableado de puesta a tierra con otros equipos que operen con altas corrientes (ej.: motores de alta potencia, máquinas de soldar, etc.).

> **¡NOTA!**
> Los valores de los calibres de la Tabla 3 son meramente ilustrativos. Para el correcto dimensionamiento del cableado, se deben tomar en cuenta las condiciones de instalación y la máxima caída de tensión permitida.

10.3 CONEXIONES DE CONTROL



(a) Configuración NPN

(b) Configuración PNP

Conector		Descripción (*)
1	DI1	Entrada digital 1
2	DI2	Entrada digital 2
3	DI3	Entrada digital 3
4	DI4	Entrada digital 4
5	GND	Referencia 0 V
6	AI1	Entrada analógica 1 (Corriente)
7	GND	Referencia 0 V
8	AI1	Entrada analógica 1 (Tensión)
9	+10 V	Referencia +10 Vcc para potenciómetro
10	DO1-RL-NC	Salida digital 1 (Contacto NC del relé 1)
11	DO1-RL-C	Salida digital 1 (Punto común del relé 1)
12	DO1-RL-NA	Salida digital 1 (Contacto NA del relé 1)

(*) Por más informaciones consulte la especificación detallada en la tabla 7.
- Los convertidores CFW300 son suministrados con las entradas digitales configuradas como activo bajo (NPN). Para alteración, verifique la utilización del parámetro P271 en el manual de programación del CFW300.
- La entrada analógica AI1 está ajustada para entrada 0 a 10 V, para alteración verifique el parámetro P233 del manual de programación del CFW300.

Figura 5: (a) y (b) Señales del conector de la tarjeta de control C300

Para una correcta instalación del cableado de control, utilice:
1. Calibre de los cables: 0,5 mm² (20 AWG) a 1,5 mm² (14 AWG).
2. Torque máximo: 0.5 N.m (4.50 lbf.in).
3. Cableados en el conector de la tarjeta de control con cable blindado y separadas de los demás cableados (potencia, comando en 110 V / 220 Vca, etc.).

10.3.1 Niveles de Emisión y Inmunidad Atendida

Tabla 4: Niveles de emisión y inmunidad atendidos

Fenómeno de EMC	Norma Básica	Nivel
Emisión:		
Emisión Conducida ("Mains Terminal Disturbance Voltage" Rango de Frecuencia: 150 kHz a 30 MHz)	IEC/EN 61800-3	Depende del modelo del convertidor y de la longitud del cable del motor. Consulte la Tabla 6
Emisión Radiada ("Electromagnetic Radiation Disturbance" Rango de Frecuencia: 30 MHz a 1000 MHz)		
Inmunidad:		
Descarga Electrostática (ESD)	IEC 61000-4-2	4 kV descarga por contacto y 8 kV descarga por el aire
Transientes Rápidos ("Fast Transient-Burst")	IEC 61000-4-4	2 kV / 5 kHz (acoplador capacitivo) cables de entrada 1 kV / 5 kHz cables de control y de la HMI remota 2 kV / 5 kHz (acoplador capacitivo) cable del motor
Inmunidad conducida ("Conducted Radio-Frequency Common Mode")	IEC 61000-4-6	0,15 a 80 MHz; 10 V; 80 % AM (1 kHz) Cables del motor, de control y de la HMI remota
Sobretensiones	IEC 61000-4-5	1,2/50 μs, 8/20 μs 1 kV acoplamiento línea-línea 2 kV acoplamiento línea-tierra
Campo Electromagnético de Radiofrecuencia	IEC 61000-4-3	80 a 1000 MHz 10 V/m 80 % AM (1 kHz)

Definiciones de la Norma IEC/EM 61800-3: "Adjustable Speed Electrical Power Drives Systems"

- **Ambientes:**

Primer Ambiente ("First Environment"): ambientes que incluyen instalaciones domésticas, como establecimientos conectados sin transformadores intermediarios a la red de baja tensión, la cual alimenta instalaciones de uso doméstico.

Segundo Ambiente ("Second Environment"): ambientes que incluyen todos los establecimientos que no están conectados directamente a la red de baja tensión, la cual alimenta instalaciones de uso doméstico.

- **Categorías:**

Categoría C1: convertidores con tensiones menores que 1000 V, para uso en el "Primer Ambiente".
Categoría C2: convertidores con tensiones menores que 1000 V, que no son provistos de plugs o instalaciones móviles y, cuando sean utilizados en el "Primer Ambiente", deberán ser instalados y puestos en funcionamiento por un profesional.
Categoría C3: convertidores con tensiones menores que 1000 V, desarrollados para uso en el "Segundo Ambiente" y no proyectados para uso en el "Primer Ambiente".

> **¡NOTA!**
> Se entiende por profesional a una persona o organización con conocimiento en instalación y/o puesta en funcionamiento de los convertidores, incluyendo sus aspectos de EMC.

10.3.2 Características del Filtro Supresor de RFI

Los convertidores CFW300 cuando son montados con filtro externo, son utilizados para reducir la perturbación conducida del convertidor hacia la red eléctrica en el rango de altas frecuencias (>150 kHz). Para alcanzar los niveles máximos de emisión conducida, se hace necesario el cumplimiento de normas de compatibilidad electromagnética como la EN 61800-3 y EN 55011.
Para informaciones sobre el modelo del filtro RFI consulte la Tabla 5.
La figura de abajo muestra la conexión de lo filtro al convertidor:

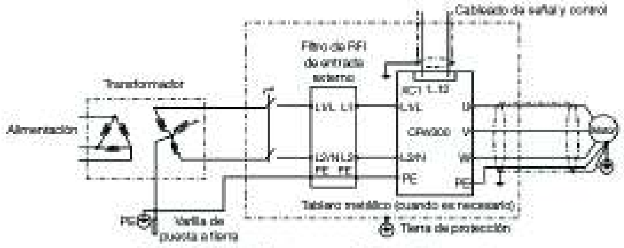


Figura 6: Conexión del filtro supresor de RFI - condición general

Tabla 5: Modelos de filtro externo RFI para el CFW300

Item WEG	Nome	Descrição
13015615	CFW300-KFA	Kit filtro RFI CFW300 tamaño A
13015616	CFW300-KFB	Kit filtro RFI CFW300 tamaño B

Tabla 6: Niveles de emisión conducida y irradiada y informaciones adicionales

Modelo del Convertidor de Frecuencia		Emisión Conducida – Longitud Máxima del Cable del Motor		Emisión Radiada
		Categoría C3	Categoría C2	Categoría
1	CFW300A0XPXS1XX20 (1)	27 m	3 m	C3
2	CFW300AXXPXS2XX20 (1)	27 m	20 m	C3
3	CFW300B10P0B2DS20 (1)	27 m	27 m	C3

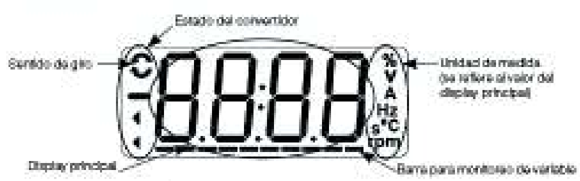
- La frecuencia de conmutación es de 5 kHz.
(1) Donde "X" se entiende por cualquier valor correspondiente de la Tabla 2.

10.4 ACCESORIOS

Los accesorios son recursos de hardware que pueden ser adicionados en la aplicación con el CFW300. Los accesorios son incorporados de forma simple y rápida a los convertidores, usando el concepto "Plug and Play". El accesorio debe ser instalado o alterado con el convertidor desenergizado. Éstos pueden ser solicitados separadamente, y serán enviados en embalaje propio, conteniendo los componentes y manuales con instrucciones detalladas para instalación, operación y programación de los mismos.

11 USO DE LA HMI PARA OPERACIÓN DEL CONVERTIDOR

11.1 INDICACIONES EN EL DISPLAY DE LA HMI



11.2 MODOS DE OPERACIÓN DE LA HMI

Modo Monitoreo		
- Es el estado inicial de la HMI tras la energización exitosa (sin fallas, alarmas o subtensión). - Presione la tecla P para ir al nivel 1 del modo parametrización – selección de parámetros. Al presionar cualquier otra tecla, también se conmuta para el modo parametrización.	rdY	Monitoreo
Modo Parametrización		
Nivel 1: - Éste es el primer nivel del modo parametrización. El número del parámetro es exhibido en el display principal. - Use las teclas ▲ y ▼ para encontrar el parámetro deseado. - Presione la tecla P para ir al nivel 2 del modo parametrización – alteración del contenido de los parámetros.	P002	Parametrización nivel 1
Nivel 2: - El contenido del parámetro es exhibido en el display principal. - Use las teclas ▲ y ▼ para ajustar el nuevo valor en el parámetro seleccionado. - Presione la tecla P para confirmar la modificación (salvar el nuevo valor). Luego de confirmada la modificación, la HMI retorna al nivel 1 del modo parametrización.	0.0	Parametrización nivel 2

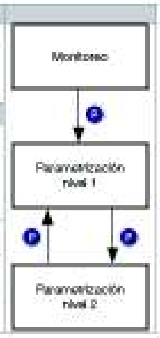
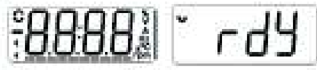


Figura 7: Modos de operación de la HMI

12 PREPARACIÓN Y ENERGIZACIÓN

> **¡PELIGRO!**
> Siempre desconecte la alimentación general, antes de efectuar cualquier conexión.

1. Verifique si las conexiones de potencia, puesta a tierra y de control están correctas y firmes.
2. Retire todos los restos de materiales del interior del convertidor o del accionamiento.
3. Verifique las conexiones del motor y si la corriente y la tensión del motor están de acuerdo con el convertidor.
4. Desacople mecánicamente el motor de la carga. Si el motor no puede ser desacoplado, tenga la certeza de que el giro en cualquier dirección (sentido horario o antihorario) no causará daños a la máquina o riesgo de accidentes.
5. Cierre las tapas del convertidor o accionamiento.
6. Realice la medición de la tensión de la red y verifique que esté dentro del rango permitido.
7. Energice la entrada: cierre la seccionadora de entrada.
8. Verifique el éxito de la energización:
   El display de la HMI indica:



12.1 APLICACIÓN BÁSICA

Seq	Indicación en el Display/Acción	Seq	Indicación en el Display/Acción
1	rdY - Modo Inicialización. - Presione la tecla P para entrar en el nivel 1 del modo parametrización. - Presione las teclas ▲ o ▼ hasta seleccionar el parámetro P100.	2	P100. - Presione la tecla P si es necesario alterar el contenido de "P100 – Tiempo de Aceleración" o presione la tecla ▲ para el próximo parámetro.
3	P101. - Si es necesario, altere el contenido de "P101 – Tiempo de Desaceleración". - Utilice la tecla ▲ hasta seleccionar el parámetro P133.	4	P133 - Si es necesario, altere el contenido de "P133 – Velocidad Mínima". - Presione la tecla ▲ para el próximo parámetro.
5	P134 - Si es necesario, altere el contenido de "P134 – Velocidad Máxima". - Presione la tecla ▲ el próximo parámetro.	6	P135 - Si es necesario, altere el contenido de "P135 – Corriente Máxima Salida". - Presione la tecla ▼ hasta seleccionar el parámetro P002.
7	P002 - Presione la tecla P para visualizar el contenido del parámetro.	8	0.0 - Presione la tecla (I/O) para que el motor acelere hasta 3,0 Hz (ajuste estándar de fábrica de P133 - Frecuencia mínima). - Presionar ▲ e mantener até atingir 60,0 Hz.
9	60.0 - Presione la tecla (I/O). El motor desacelerará hasta parar.	10	rdY - Cuando el motor pare, el display indicará "ready".

12.2 TIPO DE CONTROL V/f (P202 = 0)

Seq	Indicación en el Display/Acción	Seq	Indicación en el Display/Acción
1	rdY - Modo Inicialización. - Presione la tecla P para entrar en el nivel 1º del modo parametrización.	2	P002 - Presione las teclas ▲ o ▼ hasta seleccionar el parámetro P202.
3	P202 - Presione la tecla P si es necesario alterar el contenido de "P202 – Tipo de Control" para P202 = 0 (V/f). - Presione la tecla ▲ hasta seleccionar el parámetro P401.	4	P401 - Si es necesario, altere el contenido del parámetro "P401 – Corriente Nominal del Motor" conforme los datos de la placa. - Presione la tecla ▲ para el próximo parámetro.
5	P402 - Si es necesario, altere el contenido de "P402 – Rotación Nominal Motor". - Presione la tecla ▲ para el próximo parámetro.	6	P403 - Si es necesario, altere el contenido de "P403 – Frecuencia Nominal Motor".

13 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

DATOS DE POTENCIA
Fuente de alimentación:

- Tolerancia: -15 % a +10 %.
- Frecuencia: 50/60 Hz (48 Hz a 62 Hz).
- Desbalance de fase: ≤ 3 % de la tensión de entrada fase-fase nominal.
- Sobretensiones de acuerdo con Categoría III (EM 61010/UL 508C).
- Tensiones transientes de acuerdo con la Categoría III.
- Máximo de 10 conexiones por hora (1 a cada 6 minutos).
- Rendimiento típico: ≥ 97 %.
- Clasificación de sustancias químicamente activas: nivel 3C2.
- Clasificación de condiciones mecánicas (vibración): nivel 3M4.
- Nivel de ruido audible: < 60dB.

14 DATOS DE LA ELECTRÓNICA/GENERALES

Tabla 7: Datos de la electrónica/generales

Control	Método	- Tipos de control:
		  - V/f (Escalar)
		  - VVW: control vectorial de tensión
		- PWM SVM (Space Vector Modulation)

	Frecuencia de salida	- 0 a 400 Hz, resolución de 0,1 Hz
Desempeño	Control V/f	- Regulación de velocidad: 1 % de la velocidad nominal (con compensación de deslizamiento) - Rango de variación de velocidad: 1:20
	Control vectorial (VVW)	- Regulación de velocidad: 1 % de la velocidad nominal - Rango de variación de velocidad: 1:30
Entradas	Analógicas	- 1 entrada aislada. Niveles: (0 a 10) V o (0 a 20) mA o (4 a 20) mA - Error de linealidad 0,25 % - Impedancia: 100 kΩ para entrada en tensión, 500 Ω para entrada en corriente - Funciones programables - Tensión máxima admitida en las entradas: 30 Vcc

		■ Funciones programables: - activo alto (PNP): nivel bajo máximo de 5 Vcc / nivel alto mínimo de 20 Vcc - activo bajo (NPN): nivel bajo máximo de 5 Vcc / nivel alto mínimo de 10 Vcc ■ Tensión de entrada máxima de 30 Vcc ■ Corriente de entrada: 11 mA ■ Corriente de entrada máxima: 20 mA
Salidas	Relé	■ 1 relé con contacto NA/NC ■ Tensión máxima: 250 Vca ■ Corriente máxima: 0,5 A ■ Funciones programables
	Fuente de alimentación	■ Fuente de 10 Vcc. Capacidad máxima: 50mA
Seguridad	Protección	■ Sobrecorriente/cortocircuito fase-fase en la salida ■ Sub./sobretensión en la potencia ■ Sobrecarga en el motor ■ Sobretemperatura en el módulo de potencia (IGBTs) ■ Falla./ alarma externa ■ Error de programación
Interfaz hombre-máquina (HMI)	HMI estándar	■ 4 teclas: Gira/Para, Incremento, Decremento y Programación ■ Display LCD ■ Permite acceso/alteración de todos los parámetros ■ Exactitud de las indicaciones: - corriente: 5 % de la corriente nominal - resolución de la velocidad: 0,1 Hz
Grado de protección	IP20	■ Modelos del tamaños A y B

15 NORMAS CONSIDERADAS

Tabla 8: Normas consideradas

Normas de seguridad	■ UL 508C - power conversion equipment ■ UL 840 - insulation coordination including clearances and creepage distances for electrical equipment ■ EN 61800-5-1 - safety requirements electrical, thermal and energy ■ EN 50178 - electronic equipment for use in power installations ■ EN 60204-1 - safety of machinery. Electrical equipment of machines. Part 1: general requirements **Nota:** para tener una máquina en conformidad con esta norma, el fabricante de la misma es responsable por la instalación de un dispositivo de parada de emergencia y de un equipo para seccionamiento de la red ■ EN 60146 (IEC 146) - semiconductor converters ■ EN 61800-2 - adjustable speed electrical power drive systems - Part 2: general requirements - rating specifications for low voltage adjustable frequency AC power drive systems
Normas de construcción mecánica	■ EN 60529 - degrees of protection provided by enclosures (IP code) ■ UL 50 - enclosures for electrical equipment ■ IEC 60721-3-3 - classification of environmental conditions
Normas de compatibilidad electromagnética (*)	■ EN 61800-3 - adjustable speed electrical power drive systems - part 3: EMC product standard including specific test methods ■ EN 55011 - limits and methods of measurement of radio disturbance characteristics of industrial, scientific and medical (ISM) radio-frequency equipment ■ CISPR 11 - Industrial, scientific and medical (ISM) radio-frequency equipment - electromagnetic disturbance characteristics - limits and methods of measurement ■ EN 61000-4-2 - electromagnetic compatibility (EMC) - part 4: testing and measurement techniques - section 2: electrostatic discharge immunity test ■ EN 61000-4-3 - electromagnetic compatibility (EMC) - part 4: testing and measurement techniques - section 3: radiated, radio-frequency, electromagnetic field immunity test ■ EN 61000-4-4 - electromagnetic compatibility (EMC) - part 4: testing and measurement techniques - section 4: electrical fast transient/burst immunity test. ■ EN 61000-4-5 - electromagnetic compatibility (EMC) - part 4: testing and measurement techniques - section 5: surge immunity test. ■ EN 61000-4-6 - electromagnetic compatibility (EMC) - part 4: testing and measurement techniques - section 6: immunity to conducted disturbances, induced by radio-frequency fields.

(*) Normas cumplidas con la instalación de filtro RFI externo. Para más detalles consulte www.weg.net.

16 PRINCIPALES PARÁMETROS

En la tabla de abajo son presentados los principales parámetros del CFW300.

¡NOTA!
ro = parámetro solamente lectura.
V/f = parámetro disponible en modo V/f.
cfg = parámetro de configuración, solamente puede ser alterado con el motor parado.

Parám.	Descripción	Rango de Valores		Ajuste de Fábrica	Prop.
P000	Acceso a los Parámetros	0 a 9999		1	
P001	Referencia Velocidad	0 a 9999			ro
P002	Velocidad de Salida (Motor)	0 a 9999			ro
P003	Corriente del Motor	0,0 a 40,0 A			ro
P004	Tensión Línea CC (Ud)	0 a 524 V			ro
P005	Frecuencia de Salida (Motor)	0,0 a 400,0 Hz			ro
P006	Estado del Convertidor	0 = Ready (Pronto) 1 = Run (Ejecución) 2 = Subtensión	3 = Falla 4 = Autoajuste 5 = Configuración		ro
P007	Tensión de Salida	0 a 240 V			ro
P011	Corriente Activa	-40,0 a 40,0 A			ro
P012	Estado DI8 a DI1	0 a FF (hex) Bit 0 = DI1 Bit 1 = DI2 Bit 2 = DI3 Bit 3 = DI4	Bit 4 = DI5 Bit 5 = DI6 Bit 6 = DI7 Bit 7 = DI8		ro
P022	Valor de Ref. Hz	1 a 3000 Hz			ro
P023	Versión de SW Princ.	0,00 a 99,99			ro
P030	Temp. Módulo	0,0 a 200,0 °C			ro
P037	Sobrecarga do Motor Int.	0,0 a 100,0 %			ro
P047	Estado CONF	0 a 999			ro
P048	Alarma Actual	0 a 999			ro
P049	Falla Actual	0 a 999			ro
P050	Última Falla	0 a 999			ro
P100	Tiempo Aceleración	0,1 a 999,9 s		5,0 s	
P101	Tiempo Desaceleración	0,1 a 999,9 s		10,0 s	
P120	Backup de la Ref. Veloc.	0 = Inactivo 1 = Activo 2 = Backup por P121		1	
P121	Referencia vía HMI	0,0 a 400,0 Hz		3,0 Hz	
P124	Ref. 1 Multispeed	-400,0 a 400,0 Hz		3,0 Hz	
P125	Ref. 2 Multispeed	-400,0 a 400,0 Hz		10,0 (5,0) Hz	
P126	Ref. 3 Multispeed	-400,0 a 400,0 Hz		20,0 (10,0) Hz	
P127	Ref. 4 Multispeed	-400,0 a 400,0 Hz		30,0 (20,0) Hz	
P128	Ref. 5 Multispeed	-400,0 a 400,0 Hz		40,0 (30,0) Hz	
P129	Ref. 6 Multispeed	-400,0 a 400,0 Hz		50,0 (40,0) Hz	
P130	Ref. 7 Multispeed	-400,0 a 400,0 Hz		60,0 (50,0) Hz	
P131	Ref. 8 Multispeed	-400,0 a 400,0 Hz		66,0 (55,0) Hz	
P133	Frecuencia Mínima	0,0 a 400,0 Hz		3,0 Hz	
P134	Frecuencia Máxima	0,0 a 400,0 Hz		66,0 (55,0) Hz	
P135	Corriente Máxima Salida	0,0 a 40,0 A		1,5 x I_{nom}	
P136	Boost de Torque Man.	0,0 a 30,0 %		0,0 %	V/f
P137	Boost de Torque Autom.	0,0 a 30,0 %		0,0 %	V/f
P138	Compensación Deslizamiento	-10,0 a 10,0 %		0,0 %	V/f
P139	Filtro Corriente Salida	0,000 a 0,999 s		0,005 s	
P142	Tensión Salida Máxima	0,0 a 100,0 %		100,0 %	cfg, V/f
P143	Tensión Salida Intermed.	0,0 a 100,0 %		50,0 %	cfg, V/f
P145	Frec. Inicio Enf. Campo	0,0 a 400,0 Hz		60,0 (50,0) Hz	cfg, V/f
P146	Frec. Salida Intermed.	0,0 a 400,0 Hz		30,0 (25,0) Hz	cfg, V/f
P156	Corr. Sobrecarga	0,1 a 2,0 x I_{nom}		1,2 x I_{nom}	
P202	Tipo de Control	0 = V/f 1 = V/f Cuadrático	2 a 4 = Sin Función 5 = VVW	0	cfg
P204	Carga/Guardar Parám.	0 a 4 = Sin Función 5 = Carga 60 Hz 6 = Carga 50 Hz 7 = Carga Usuario 8 = Sin Función	9 = Guarda Usuario 10 = Sin Función 11 = Carga Padrón SoftPLC 12 y 13 = Reservado	0	cfg
P220	Selección Fonte LOC/REM	0 = Siempre Local 1 = Siempre Remoto 2 y 3 = Sin Función 4 = Dik 5 = Serial/USB (LOC)	6 = Serial/USB (REM) 7 y 8 = Sin Función 9 = CO/DN/DP (LOC) 10 = CO/DN/DP (REM) 11 = SoftPLC	0	cfg
P221	Sel. Referencia LOC	0 = HMI 1 = AI1 2 = AI2 3 = Sin Función 4 = FI 5 = AI1 + AI2 > 0 6 = AI1 + AI2 7 = E.P. 8 = Multispeed	9 = Serial/USB 10 = Sin Función 11 = CO/DN/DP 12 = SoftPLC 13 = Sin Función 14 = AI1 - > 0 15 = AI2 - > 0 16 = Sin Función 17 = FI - > 0	0	cfg
P222	Sel. Referencia REM	Ver Opciones en P221		3	cfg
P223	Selección Giro LOC	0 = Horario 1 = Antihorario 2 y 3 = Sin Función 4 = Dik 5 = Serial/USB (H) 6 = Serial/USB (AH)	7 y 8 = Sin Función 9 = CO/DN/DP (H) 10 = CO/DN/DP (AH) 11 = Sin Función 12 = SoftPLC	0	cfg
P263	Función de la Entrada DI1	0 = Sin Función 1 = Gira/Para 2 = Habilita General 3 = Sin Función 4 = Avance 5 = Retorno 6 = Encienda 7 = Apaga 8 = Sentido Giro Horario 9 = LOC/REM 10 = JOG 11 = Acelera E.P. 12 = Desacelera E.P. 13 = Multispeed 14 = 2ª Rampa 15 a 17 = Sin Función 18 = Sin Alarma Ext. 19 = Sin Falla Ext. 20 = Reset 21 a 23 = Sin Función 24 = Dashab. Flying Start	25 = Regal. Línea CC 26 = Bloquela Prog. 27 a 31 = Sin Función 32 = Multispeed 2ª Rampa 33 = Acel. E.P. 2ª Rampa 34 = Desac. E.P. 2ª Rampa 35 = Avance 2ª Rampa 36 = Retorno 2ª Rampa 37 = Encienda / Acel. E.P. 38 = Desac. E.P. / Desl. 39 = Parar 40 = Clave de Seguridad 41 = Función 1 Aplicación 42 = Función 2 Aplicación 43 = Función 3 Aplicación 44 = Función 4 Aplicación 45 = Función 5 Aplicación 46 = Función 6 Aplicación 47 = Función 7 Aplicación 48 = Función 8 Aplicación	1	cfg
P264	Función de la Entrada DI2	Ver Opciones en P263		8	cfg
P265	Función de la Entrada DI3	Ver Opciones en P263		0	cfg
P266	Función de la Entrada DI4	Ver Opciones en P263		0	cfg
P267	Función de la Entrada DI5	Ver Opciones en P263		0	cfg
P268	Función de la Entrada DI6	Ver Opciones en P263		0	cfg
P269	Función de la Entrada DI7	Ver Opciones en P263		0	cfg
P270	Función de la Entrada DI8	Ver Opciones en P263		0	cfg
P295	Corr. Nom. Inv.	1,0 a 15,2 A		Conforme modelo del convertidor	ro
P296	Tensión Nominal Red	0 = Reservado 1 = 110 / 127 Vca	2 = 200 / 240 Vca o 220 Vcc	Conforme modelo del convertidor	ro
P297	Frec. de Conmutación	2,5 a 15,0 kHz		5,0 kHz	cfg
P401	Corriente Nom. Motor	0,0 a 40,0 A		1,4 A	cfg
P402	Rotación Nom. Motor	0 a 9999 rpm		1720 (1310) rpm	cfg
P403	Frecuencia Nom. Motor	0 a 400 Hz		60 (50) Hz	cfg

17 FALLAS Y ALARMAS

Fallas y alarmas más comunes

Falla / Alarma	Descripción	Causas Probables
A046 Carga Alta en el Motor	Alarma de sobrecarga en el motor	■ Ajuste de P156 con valor bajo para el motor utilizado ■ Carga alta en el eje del motor
A050 Temperatura Elevada en el Módulo de Potencia	Alarma de temperatura elevada medida en el sensor de temperatura (NTC) del módulo de potencia	■ Temperatura en los IGBTs alta: P030 > 90 °C (Tamaño A) o P030 > 110 °C (Tamaño B) ■ Temperatura ambiente al rededor del convertidor alta (> 50 °C) y corriente de salida elevada ■ Ventilador bloqueado o defectuoso ■ Disipador muy sucio, impidiendo o flujo de aire
A090 Alarma Externa	Alarma externa vía Dik (opción "sin alarma externa" en P263 a P270)	■ Cableado en las entradas DI1 a DI8 abierta o con mal contacto
A700 Comunicación con HMI Remota	Sin comunicación con HMI remota, no obstante, no hay conexión o referencia de velocidad para esta fuente	■ Verifique que la interfaz de comunicación con HMI esté configurada correctamente en el parámetro P312 ■ Cable de HMI desconectado
F021 Subtensión en el Link CC	Falla de subtensión en el circuito intermediario	■ Tensión de alimentación incorrecta, verifique que los datos en la etiqueta del convertidor estén de acuerdo con la red alimentación y el parámetro P296 ■ Tensión de alimentación muy baja, ocasionando tensión en el Link CC menor que el valor mínimo (en P004): Ud < 250 Vcc en 110 / 127 Vca (P296 = 1) o Ud < 200 Vcc en 200 / 240 Vca (P296 = 2) ■ Falta de fase en la entrada ■ Falla en el circuito de precarga
F022 Sobretensión en el Link CC	Falla de sobretensión en el circuito intermediario	■ Tensión de alimentación incorrecta, verifique que los datos en la etiqueta del convertidor estén de acuerdo con la red alimentación y el parámetro P296 ■ Tensión de alimentación muy alta, resultando en una tensión en el Link CC mayor que el valor máximo (en P004): Ud > 400 Vcc en 110 / 127 Vca (P296 = 1) o Ud > 410 Vcc en 200 / 240 Vca (P296 = 2) ■ Inercia de carga muy alta o rampa de desaceleración muy rápida ■ Ajuste de P151 muy alto
F031 Falla de Comunicación con el Accesorio de Expansión de IOs	El control principal no logra establecer el link de comunicación con el accesorio de expansión de IOs	■ Accesorio dañado ■ Accesorio mal conectado ■ Problema de identificación del accesorio, consulte P027
F032 Falla de Comunicación con el Accesorio Comunicación	El control principal no logra establecer el link de comunicación con el accesorio de comunicación	■ Accesorio dañado ■ Accesorio mal conectado ■ Problema de identificación del accesorio, consulte P028
F051 Sobretemperatura en los IGBTs	Falla de sobretemperatura medida en el sensor de temperatura (NTC) del módulo de potencia	■ Temperatura en los IGBTs alta: P030 > 100 °C (Tamaño A) o P030 > 120 °C (Tamaño B). Temperatura ambiente alrededor del convertidor alta (>50 °C) y corriente de salida elevada ■ Ventilador bloqueado o defectuoso ■ Disipador muy sucio, impidiendo o flujo de aire
F070 Sobrecorriente/ Cortocircuito	Sobrecorriente o cortocircuito en la salida, Link CC o resistor de frenado	■ Cortocircuito entre dos fases del motor ■ Módulo de IGBTs en corto o dañado ■ Arranque con rampa de aceleración muy corta ■ Arranque con motor girando sin la función Flying Start
F072 Sobrecarga en el Motor	Falla de sobrecarga en el motor (60 s en 1,5 x I_{nom})	■ Ajuste de P156 muy bajo en relación a la corriente de operación del motor ■ Carga en el eje del motor muy alta
F080 Falla a CPU (Watchdog)	Falla relativa al algoritmo de supervisión de CPU principal do inversor	■ Ruido eléctrico ■ Falla en el firmware del convertidor
F091 Falla en la Función Guarda Usuario	Falla en el intento de guardar tabla de parámetros del usuario	■ Intento de salvar (P204 = 9) más de que 32 parámetros (con valores diferentes del estándar de fábrica) en la tabla de parámetros del usuario
F092 Falla en la Función Copy (MMF)	Falla en la copia de parámetros	■ Intenta de copiar los parámetros del módulo de memoria flash al convertidor con versiones de software diferentes
F094 Falla de Autodiagnosis	Falla relativa al algoritmo de identificación automática del hardware del convertidor	■ Mal contacto en las conexiones entre el control principal y el módulo de potencia ■ Hardware no compatible con la versión de firmware ■ Defecto en los circuitos internos del convertidor
F099 Falla Externa	Falla externa vía Dik (opción "sin falla externa" en P263 a P270)	■ Cableado en las entradas DI1 a DI8 abierta o con mal contacto
F701 Falla en la comunicación con la HMI remota	Sin comunicación con la HMI remota, no obstante, estás conectado o referencia de frecuencia para esta fuente	■ Verifique si la interfaz de comunicación con la HMI está configurada correctamente en el parámetro P312 ■ Cable de la HMI desconectado

¡NOTA!
Para más informaciones consulte **www.weg.net**.

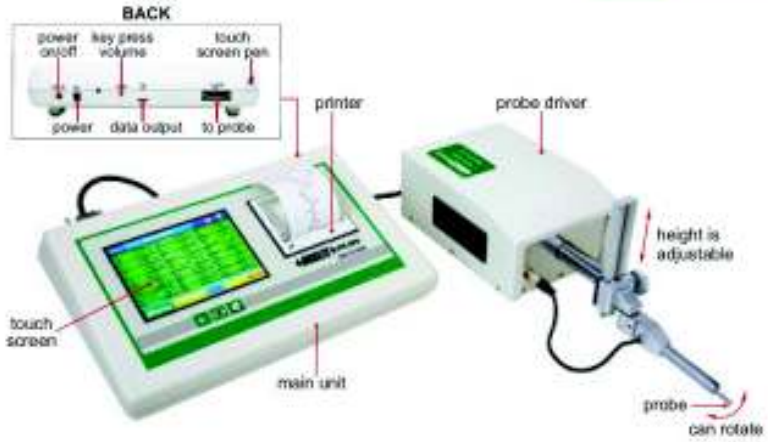
Anexo VII.
ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LOS RUGOSÍMETROS UTILIZADOS

SURFACE ROUGHNESS TESTER
CODE ISR-S1000B

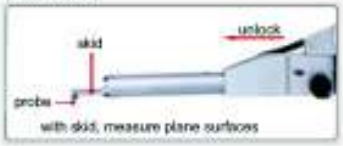
VIDEO

CAN MEASURE WAVINESS AND CURVED SURFACE WITH RADIUS5-5MM | DATA OUTPUT | CUSTOM-MADE PROBES ARE AVAILABLE

THE PROBE CAN BE WITH SKID OR WITHOUT SKID



- 48 roughness parameters according to ISO-4287, JIS-B0601, ISO-12085, JIS-B0631
- Automatic probe leveling
- Measuring range up to 1000μm, can measure grit and shot blasting
- Traverse length up to 50mm
- The probe can rotate from -90° to +90°
- Color touch screen, display roughness values, profile and curves
- Can print roughness values, profile and curves
- Memory of maximum 1000 results
- Can set tolerance

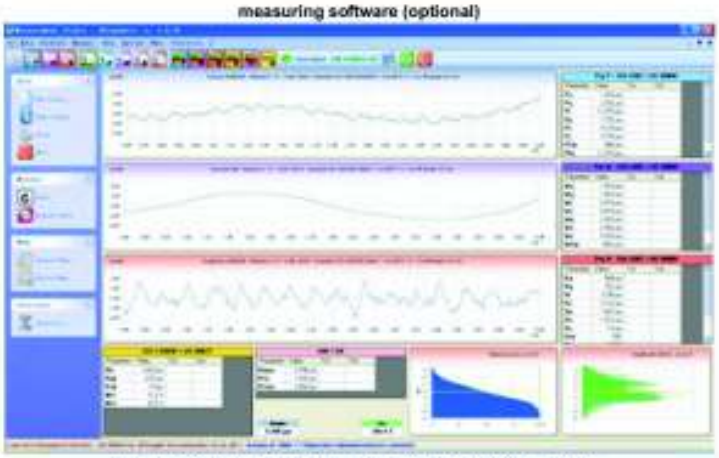


with skid, measure plane surfaces

without skid, measure narrow spaces

without skid, measure curved surfaces

measuring software (optional)



measuring software (**optional**), can control the roughness tester, display roughness values, profile and curve, data statistics

test stand (**optional**)

SPECIFICATION

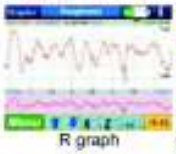
Parameters		Ra, Rq, Rt, Rz, Rp, Rv, Rc, Rsk, Rku, RSm, Rδc RPc, Pa, Pq, Pt, Pp, Pv, Pc, Psm, Pδc, PPc, Wa Wq, Wt, Wz, Wp, Wv, Wc, Wsm, Wδc, WPc, Rk Rpk, Rvk, Mr1, Mr2, Rmax, R3z, R3zm, R, AR Rx, Aw, Rke, Rpke, Rvke, Mr1e, Mr2e
Range		1000μm
Accuracy		±3%
Resolution (Ra)		0.001μm
Probe	**type**	inductive
	stylus radius/angle	5μm/90°
	stylus material	diamond
Measuring force		0.75mN
Measuring unit		μm/μin
Cut off		0.08/0.25/0.8/2.5/8mm
Number of cut-offs		1-19 (cut off 0.08/0.25/0.8/2.5mm) 1-5 (cut off 8mm)
Traverse speed		0.5mm/s or 1mm/s
Memory		1000 measurement results
Output		USB
Power		built-in rechargeable battery
Dimension (LxWxH)		320×210×80mm
Weight		2.2kg

ROUGHNESS VALUE, PROFILE AND DATA ANALYSIS

measurement result

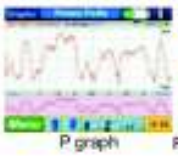
total profile graph

W graph


R graph

Rmr, Pmr, Wmr analysis

Rel. Rmr, Rel. Pmr, Rel. Wmr analysis


P graph

Rδc, Pδc, Wδc analysis

To be continued

Continued from previous page

SURFACE ROUGHNESS TESTER
CODE ISR-S1000B

STANDARD DELIVERY

Main unit	1pc
Probe driver	1pc
Standard probe	1pc
Calibration block	1pc
AC/DC adapter	1pc

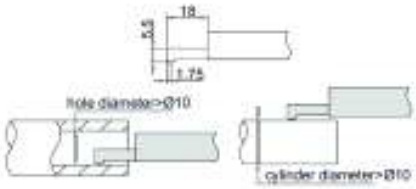
OPTIONAL ACCESSORY

Probe	see details
USB cable and software	ISR-S-SOFTWARE
Test stand	ISR-S1000B-STAND

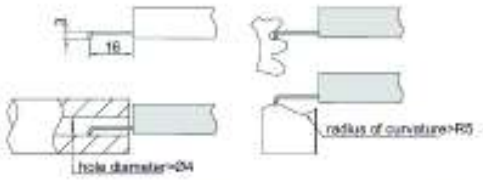
SPECIFICATION OF PROBES

Unit: mm

standard probe (included, support is removable), code ISR-SB10B



with probe support, measure plane surfaces, holes and cylinders with diameter>Ø10mm

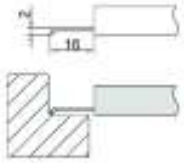


without probe support, measure holes with diameter>Ø4mm, can measure curved surfaces, narrow spaces and waviness

small hole probe (optional), code ISR-SB60B

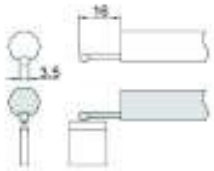
without probe support, measure holes with diameter>Ø2mm and depth<30mm, can measure curved surfaces, narrow spaces and waviness

internal angle probe (optional), code ISR-SB70B



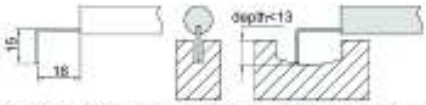
without probe support, measure internal angles, can measure curved surfaces, narrow spaces and waviness

knife edge probe (optional), code ISR-SB130B



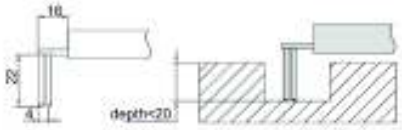
without probe support, measure knife edges and small rods

deep groove probe (optional), code ISR-SB150B



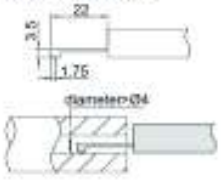
without probe support, measure curved surfaces and grooves with depth<13mm, can measure curved surfaces, narrow spaces and waviness

deep groove probe (optional), code ISR-SB120B



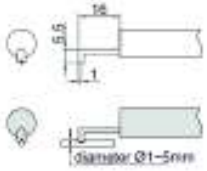
measure grooves with depth<20mm

hole probe (optional), code ISR-SB30B



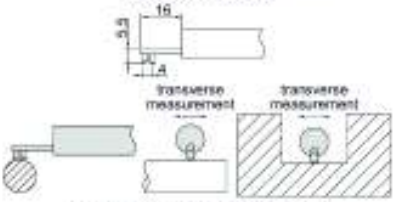
measure plane surfaces and holes with diameter>Ø4mm and depth<20mm

small rod probe (optional), code ISR-SB40B



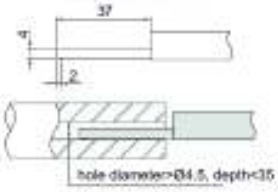
measure small rods with diameter 1~5mm

transverse probe (optional), code ISR-SB50B



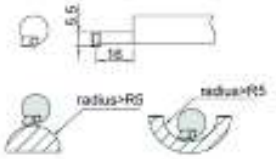
transverse measurement for plane surfaces, cylinders and grooves

deep hole probe (optional), code ISR-SB80B



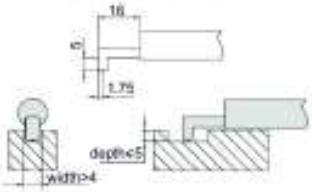
measure holes with diameter>Ø4.5mm and depth<35mm

cylinder/hole probe (optional), code ISR-SB110B



measure cylinders and holes with radius>R5mm

groove probe (optional), code ISR-SB20B



measure plane surfaces and grooves

DATA OUTPUT

ROUGHNESS TESTER
CODE ISR-C100

- 16 roughness parameters
- With probe position indicator
- Connected with printer via bluetooth
- Can display roughness values, profile and curve
- Memory of maximum 100 results
- Automatic power off

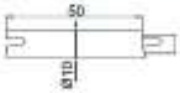
probe cover (included)

can put the small workpieces directly on the probe for measurement

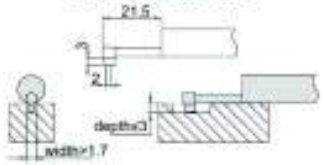
adjustable stand (included)

Unit: mm

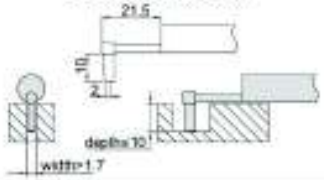
extension rod (optional), code ISR-C100-ER



groove probe (optional), code ISR-C100-130



deep groove probe (optional), code ISR-C100-131



wireless printer (optional)

test stand (optional)

the maximum workpiece height is 310mm

remote control (included)

Android APP for mobile device (included), the roughness tester can be controlled by mobile phone or tablet via bluetooth, the maximum working distance is 5m

measuring software for PC (included)

control the roughness tester, display roughness values, profile and curve

SPECIFICATION

Parameters		Ra, Rq, Rz, Rv, Rp, Rm, Rt, RS, Rsm, R3z, R3y, Rz (JIS), Rku, Rsk, Rmax, Rpc
Range		160μm
Accuracy		±10%
Resolution (Ra)		0.001μm
Probe	type	inductive
	stylus radius/angle	5μm/90°
	stylus material	diamond
Measuring force		0.4mN
Measuring unit		μm/μin
Cut off		0.25/0.8/2.5mm
Number of cut-offs		1 to 5
Traverse speed		0.5mm/s, 1mm/s
Memory		100 measurement results
Output		USB and bluetooth
Power		built-in rechargeable battery
Dimension (L×W×H)		140×52×48mm
Weight		440g

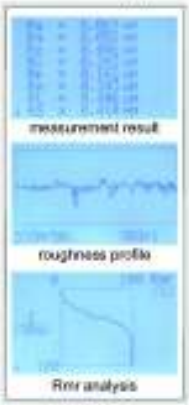
STANDARD DELIVERY

Main unit	1pc
Standard probe	1pc
Calibration block and support	1pc of each
Adjustable stand	1pc
Probe cover	1pc
USB cable and software for PC	1pc
Android APP for mobile device	1pc
AC/DC adapter	1pc

OPTIONAL ACCESSORY

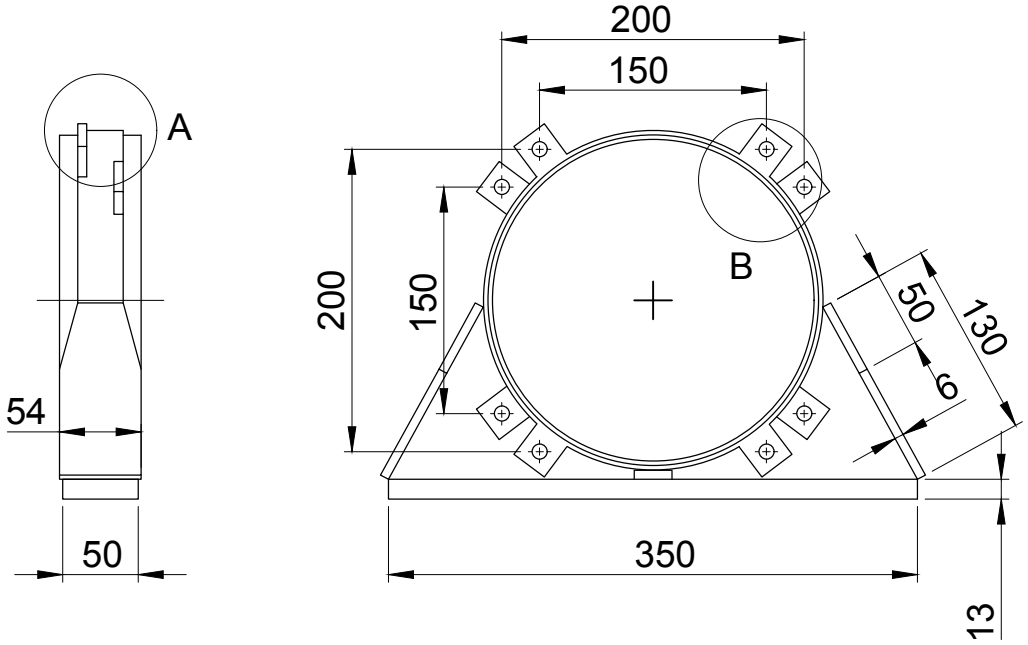
Extension rod	ISR-C100-ER
Groove probe	ISR-C100-130
Deep groove probe	ISR-C100-131
Test stand	ISR-C100-STAND
Wireless printer	ISR-C100-PRINTER

screen display

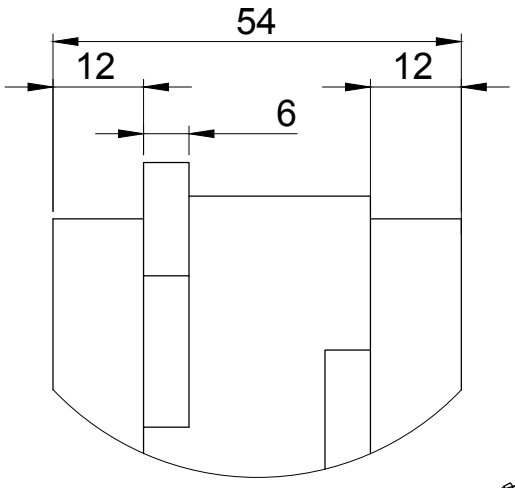


Anexo VIII.

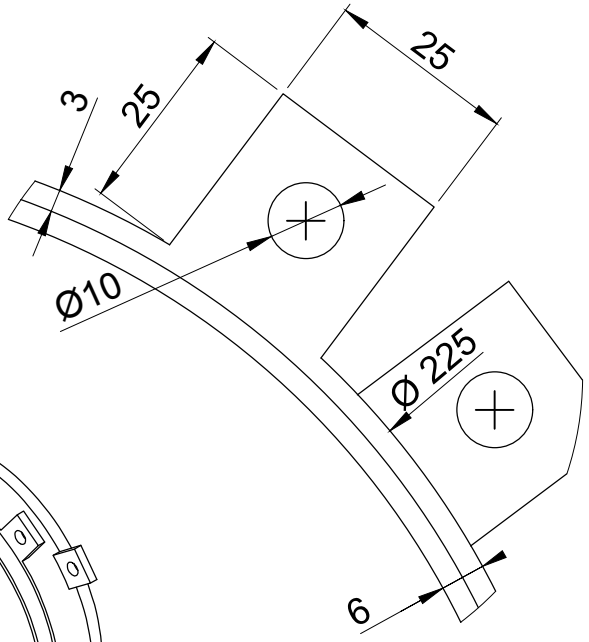
PLANOS DE LOS COMPONENTES NUEVOS DE LA MÁQUINA DE COLADO CENTRÍFUGO HORIZONTAL

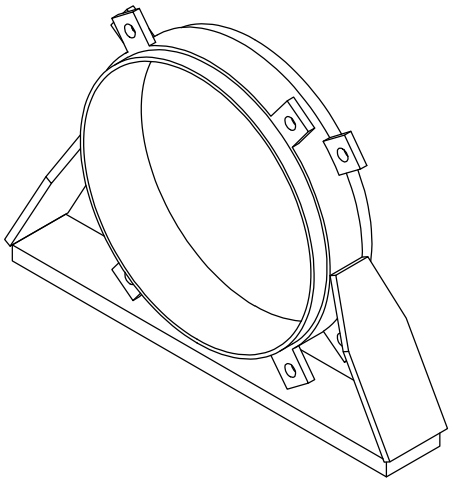


DETALLE A
ESCALA 1 : 1

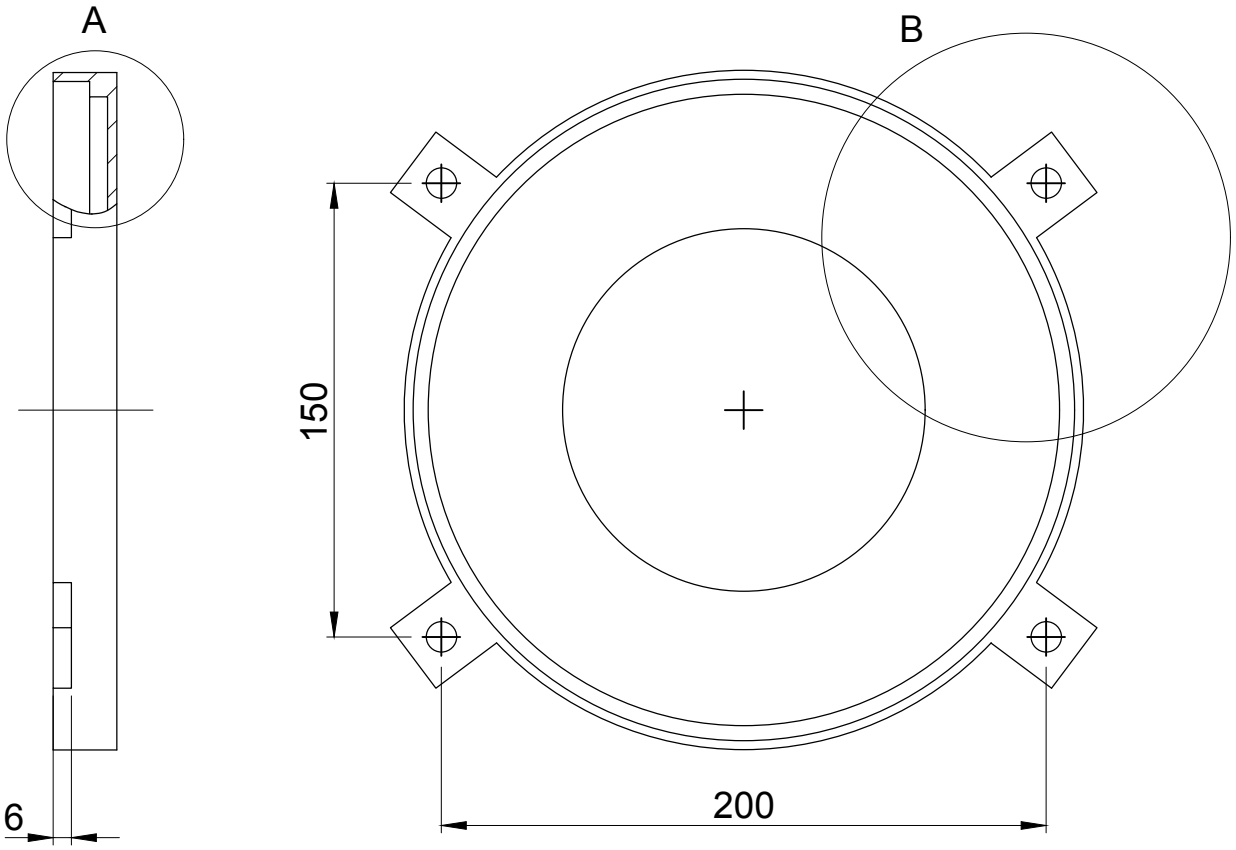


DETALLE B
ESCALA 1 : 1

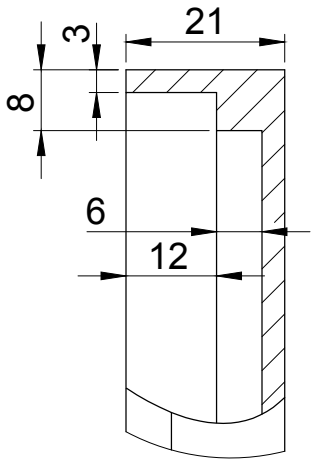




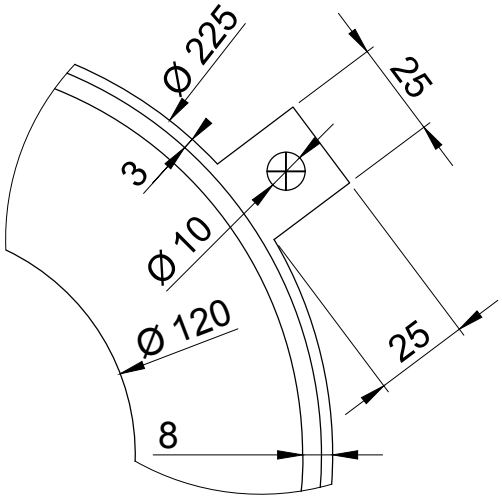
Trat. Térmico:	Ninguno		EPN	FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA	
Recubrimiento:	Ninguno				
MATERIAL: ACERO A-36		Tol. Gral. ±0.5	Escala 1:5	Dib.	Gómez, Jami
				Dis.	Gómez, Jami
				Rev.	Ing. Fausto Oviedo
CUERPO CENTRAL DE CARCASAS			COL.CENT.H.-01	Fecha: 30/10/2017	

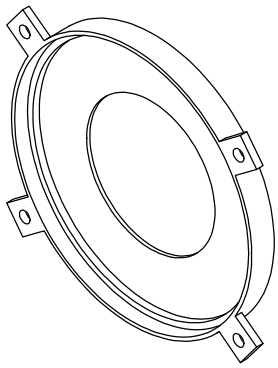


DETALLE A
ESCALA 1 : 1

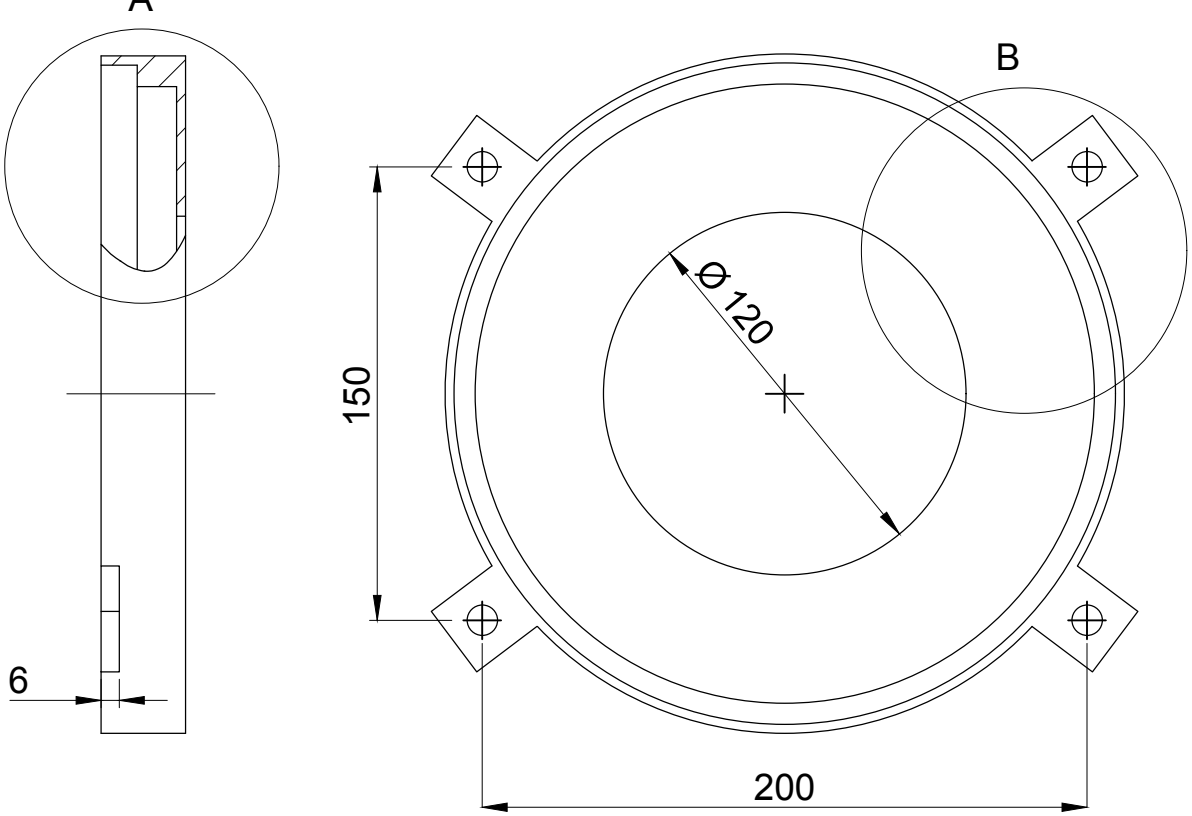


DETALLE B
ESCALA 1 : 2

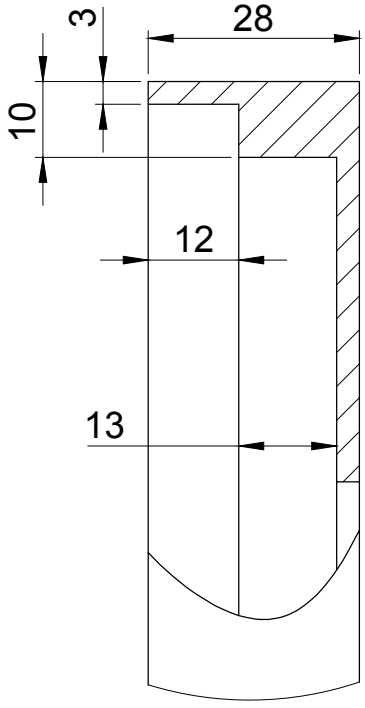




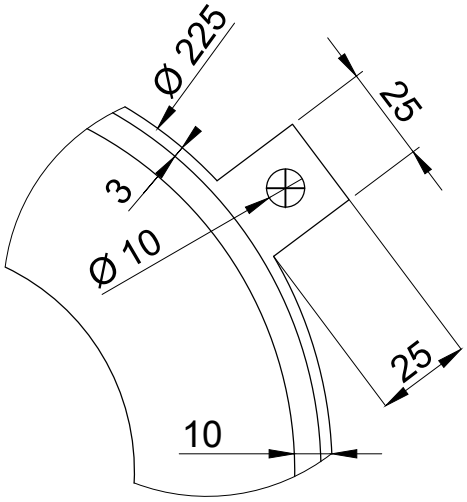
Trat. Térmico:	Ninguno		EPN	FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA	
Recubrimiento:	Ninguno				
MATERIAL: ACERO A-36		Tol. Gral. ±0.5	Escala 2:5	Dib.	Gómez, Jami
				Dis.	Gómez, Jami
				Rev.	Ing. Fausto Oviedo
TAPA EXTERNA			COL.CENT.H.-02	Fecha: 30/10/2017	

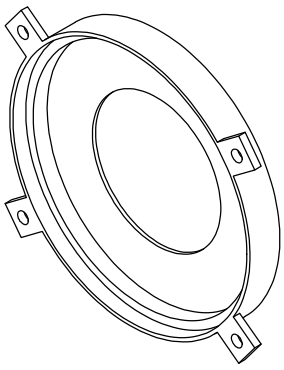


DETALLE A
ESCALA 1 : 1

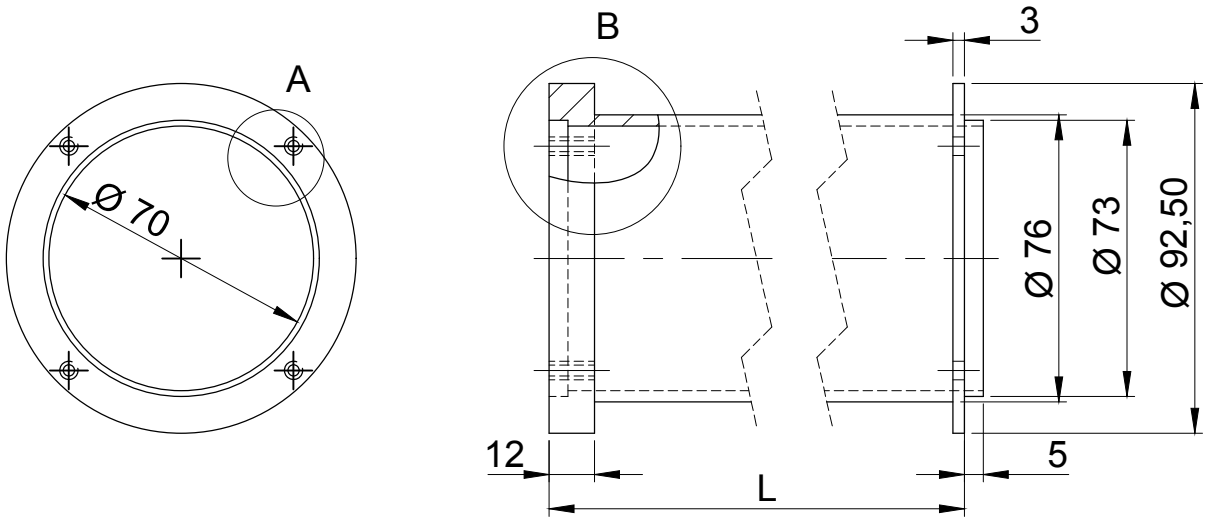


DETALLE B
ESCALA 1 : 2

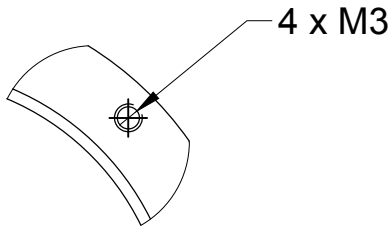




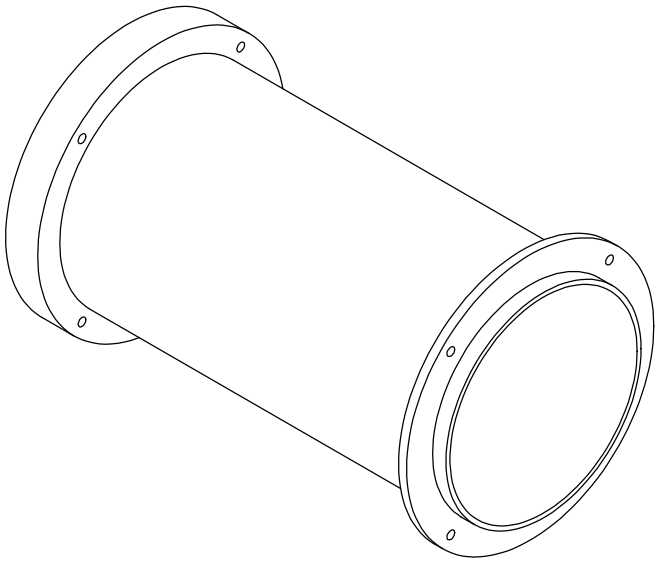
Trat. Térmico:	Ninguno		EPN	FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA	
Recubrimiento:	Ninguno				
MATERIAL: ACERO A-36		Tol. Gral. ±0.5	Escala 2:5	Dib.	Gómez, Jami
				Dis.	Gómez, Jami
				Rev.	Ing. Fausto Oviedo
TAPA INTERNA			COL.CENT.H.-03	Fecha: 30/10/2017	



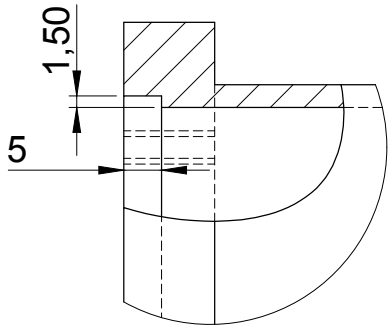
DETALLE A
ESCALA 1 : 1



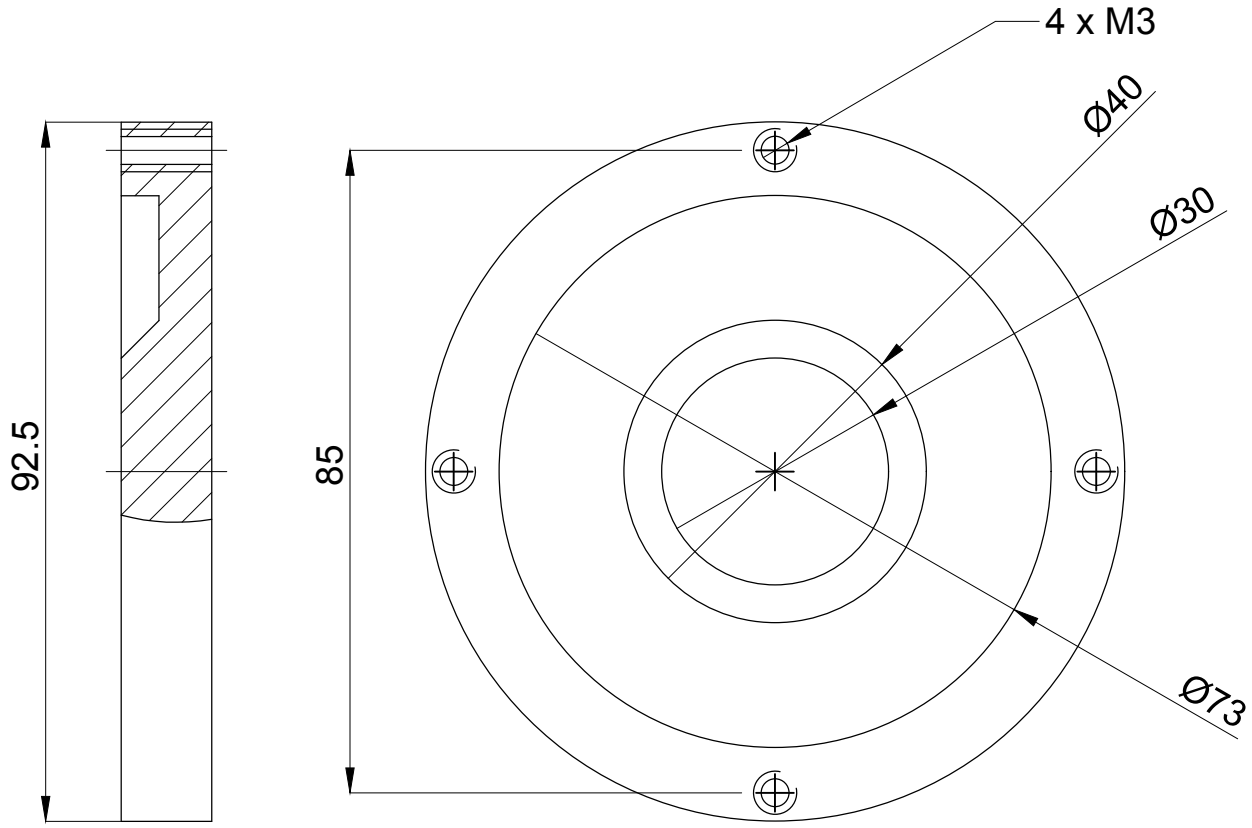
Longitud - L (mm)
50
100
150

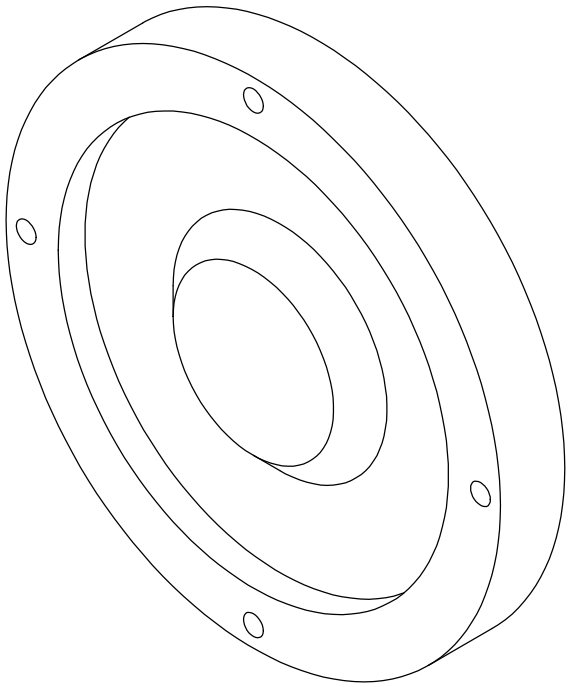


DETALLE B
ESCALA 1 : 1

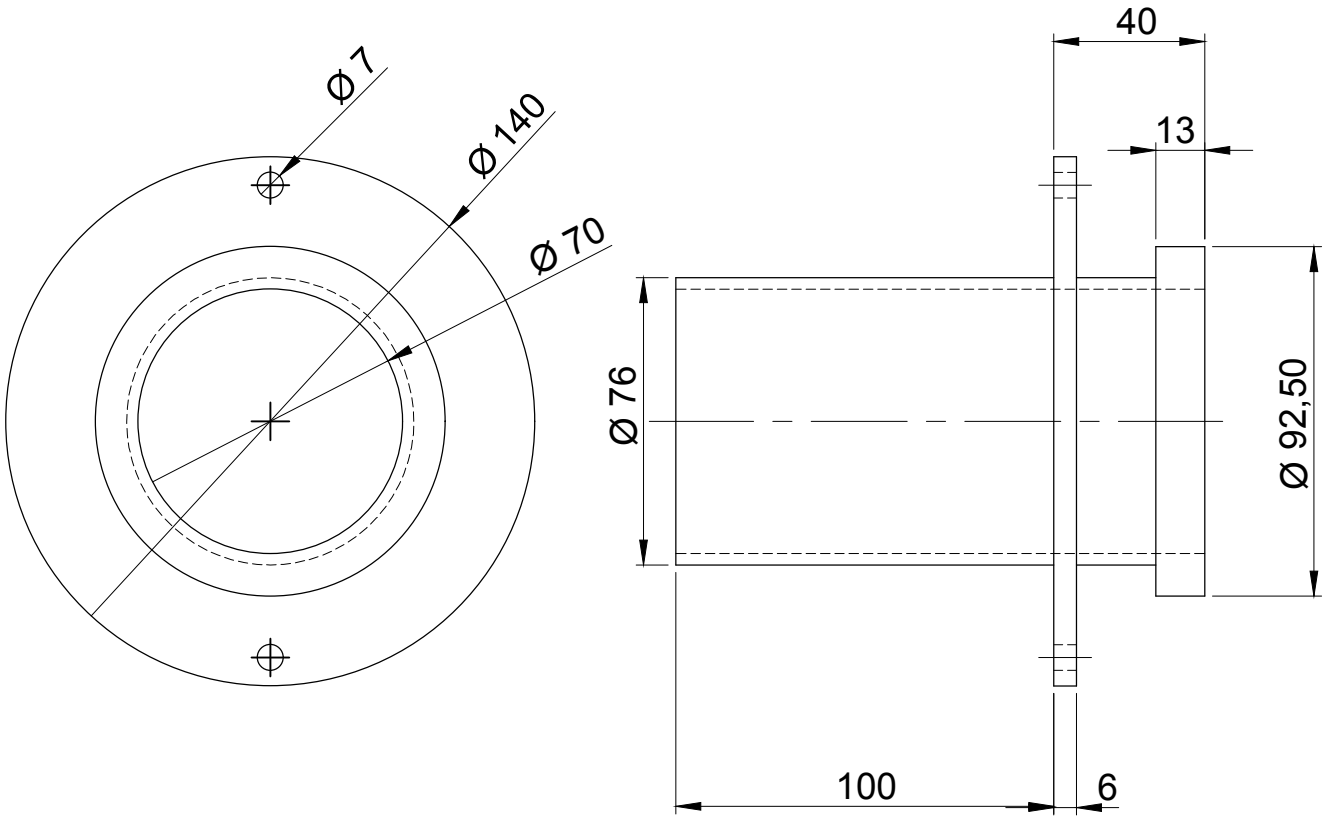


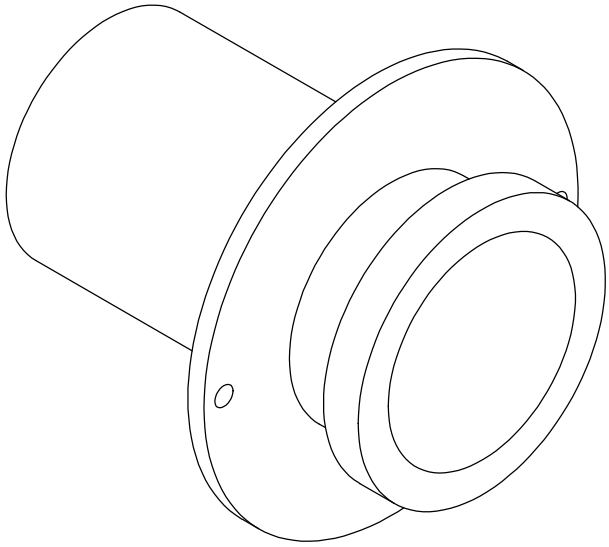
Trat. Térmico:	Ninguno		EPN	FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA	
Recubrimiento:	Ninguno				
MATERIAL: ACERO A-36		Tol. Gral. ±0.5	Escala 1:2	Dib.	Gómez, Jami
				Dis.	Gómez, Jami
				Rev.	Ing. Fausto Oviedo
EXTENSIÓN DEL TOPE DE SALIDA			COL.CENT.H.-04	Fecha: 30/10/2017	



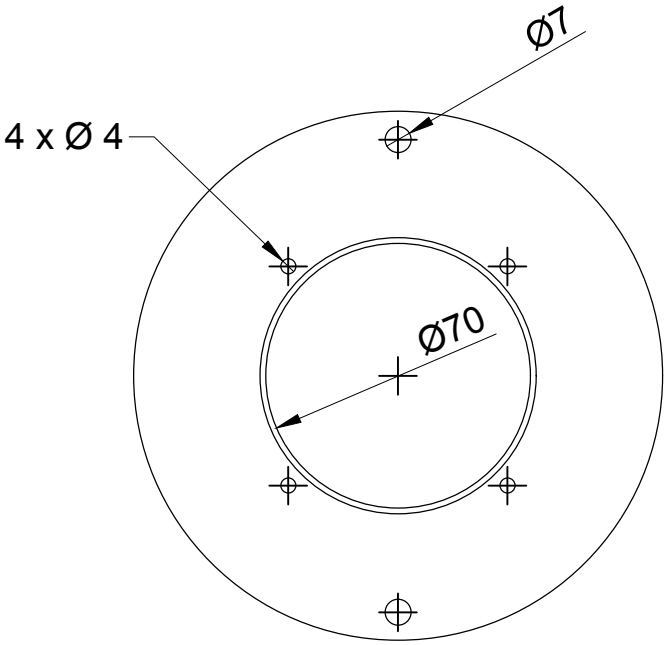


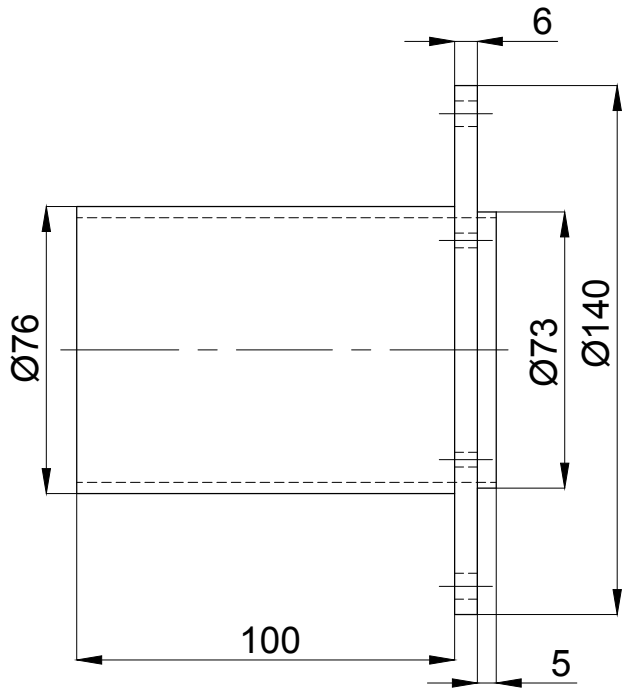
Trat. Térmico:	Ninguno		EPN	FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA	
Recubrimiento:	Ninguno				
MATERIAL: ACERO A-36		Tol. Gral. ±0.5	Escala 1:1	Dib.	Gómez, Jami
				Dis.	Gómez, Jami
				Rev.	Ing. Fausto Oviedo
FINAL DEL TOPE DE SALIDA			COL.CENT.H.-05	Fecha: 30/10/2017	

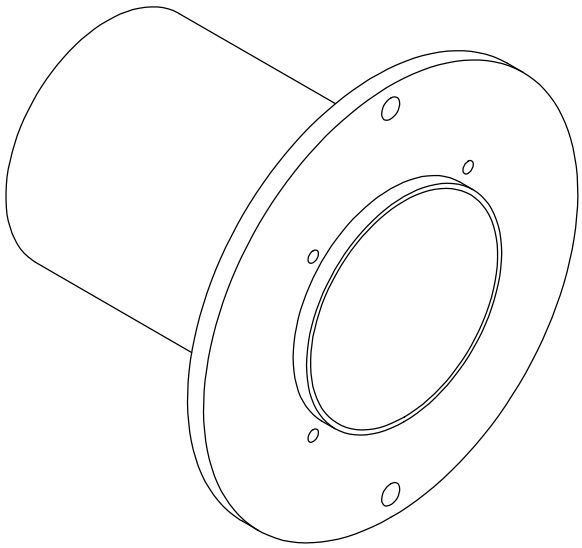




Trat. Térmico:	Ninguno		EPN	FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA	
Recubrimiento:	Ninguno				
MATERIAL: ACERO A-36		Tol. Gral. ±0.5	Escala 1:2	Dib.	Gómez, Jami
				Dis.	Gómez, Jami
				Rev.	Ing. Fausto Oviedo
TOPE DE ENTRADA			COL.CENT.H.-06	Fecha: 30/10/2017	







Trat. Térmico:	Ninguno		EPN	FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA	
Recubrimiento:	Ninguno				
MATERIAL: ACERO A-36		Tol. Gral. ±0.5	Escala 1:2	Dib.	Gómez, Jami
				Dis.	Gómez, Jami
				Rev.	Ing. Fausto Oviedo
TOPE DE SALIDA			COL.CENT.H.-07	Fecha: 30/10/2017	