



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UN PISTÓN Y UNA CÁMARA DE PRESIÓN DE BRONCE AL ALUMINIO PARA UN PROTOTIPO DE BOMBA RECIPROCANTE

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

CALDERÓN FREIRE MARÍA CRISTINA
maria.calderon@epn.edu.ec

FLORES TARIS JOSÉ ESTALIN
jose.flores01@epn.edu.ec

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

CO-DIRECTOR:
ING. OSCAR SOTOMAYOR, M.Sc.
oscar.sotomayor@epn.edu.ec

Quito, Junio 2017

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por **María Cristina Calderón Freire y José Estalin Flores Taris**, bajo mi supervisión.

Ing. Fausto Oviedo, M.Sc.

DIRECTOR DE PROYECTO

Ing. Oscar Sotomayor, M.Sc.

CO-DIRECTOR DE PROYECTO

DECLARACIÓN

Nosotros, **María Cristina Calderón Freire y José Estalin Flores Taris**, 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 he 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.

María Cristina Calderón Freire

José Estalin Flores Taris

DEDICATORIA

A Sonia mi madre que ha sido luz en la oscuridad, ha sabido guiarme para llegar a culminar mi estudios. Su sacrificio y preocupación me permitieron llegar al final.

A Manuel mi padre, por ser mi sostén emocional y económico, dedico este trabajo porque sé que no es producto solo de mi esfuerzo sino del suyo también.

María Cristina

DEDICATORIA

A mis padres Nancy y José porque siempre han sido el pilar de apoyo para seguir adelante, por apoyarme en todo momento, por aquellos consejos, su esfuerzo, su sacrificio y perseverancia ante las adversidades de la vida, todo esto para hacer de mí una persona de bien. Los amo mucho.

A mis hermanos que en los buenos y malos momentos han sabido estar ahí brindándome su cariño y apoyo incondicional. A esa personita que recién llegó al mundo que nos acompaña y forma parte de nuestras vidas, llenándonos de amor nuestros corazones.

A mis compañeros y amigos, por todas las vivencias y locuras que mantuvimos durante la carrera.

José Estalin

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mis padres por haberme ensañado a ser una persona solidaria, sincera y leal. Han sido mi respaldo en todos los sentidos, nunca me han negado su apoyo y me han ayudado a levantarme cada vez que caía. Gracias infinitas por su amor, su paciencia y su comprensión, sin ellos no sería lo que soy hoy.

A mi hermano por cuidarme desde niña y por seguirlo haciendo hasta ahora, ha sido un gran ejemplo para mí. Sus consejos me han permitido tener más seguridad y fuerza para continuar.

Al Movimiento Vientos del Pueblo que día a día lucha por la transformación de la sociedad, agradezco que hayan hecho de mi experiencia universitaria una experiencia organizativa y de lucha. Gracias a mis camaradas por continuar en este camino.

A las amistadas forjadas estos años, dentro y fuera de la Universidad. Amistades que hicieron más liviana la carga, y compartieron conmigo muchas experiencias. Gracias a Milena, Diana, Carito, Adri, Myriam, Katy y todos los chicos de la Selección.

A Estalin que ha sido un gran compañero, agradezco su perseverancia y comprensión.

A la selección de fútbol femenino de la Facultad de Ingeniería Mecánica, por los triunfos y también por las derrotas, gracias por las emociones compartidas.

María Cristina

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por todos los momentos que se puede compartir al lado de las personas que forman parte de nuestras vidas, regalándonos un día más de vida.

A mis padres Nancy y José que con mucho amor han sabido enseñarme el valor de la vida ya que con su humildad me han sabido aconsejar para que en los tropiezos, saber levantarme y seguir adelante. A mis hermanos Estefania, Jhon y Cristian que siempre estuvieron ahí brindándome su respaldo y aliento en todo momento.

A Cristina, gracias por el apoyo y paciencia brindada a lo largo de este gran paso, y las experiencias que se vivió que no fueron fáciles pero se pudo llegar y terminar.

José Estalin

AGRADECIMIENTO

Agradecemos al Ingeniero Fausto Oviedo, por el apoyo brindado, por haber resultado nuestras inquietudes y también por haber estado pendiente de otros aspectos que demuestra mucho su preocupación como profesor y como persona, sin ello no hubiese sido posible la culminación de este trabajo.

Al tecnólogo Fabián Peñalosa, por transmitirnos sus conocimientos y por estar presto ayudar en lo que requeríamos, su trabajo y experiencia fue una arista fundamental. También procuró entablar una relación de amistad que permitió tener un ambiente más ameno y confiable para transmitir nuestras dudas, por lo cual estamos muy agradecidos.

Al Ingeniero Javier Montalvo, Santiago, Erick y a todos los compañeros del Laboratorio de Fundición que colaboraron en el proceso experimental, sin importar la hora y el cansancio estuvieron siempre dispuestos.

Al Ingeniero Oscar Sotomayor que ha estado pendiente de la mejora del Laboratorio a nivel tecnológico, esto permitió que los resultados se obtengan de manera ágil y exacta.

A la Facultad de Ingeniería Mecánica que fue el lugar donde se desarrolló por completo este Estudio Técnico, en especial agradecemos al Taller de Máquinas y Herramientas, al Laboratorio de Metalografías y al Laboratorio de Mecánica Informática.

Cristina y Estalin

ÍNDICE

| | | |
|---------|--|----|
| 1. | MARCO TEÓRICO | 19 |
| 1.1. | Bombas..... | 19 |
| 1.1.1. | Bomba Horizontal de Potencia Triplex..... | 20 |
| 1.1.2. | Funcionamiento | 21 |
| 1.1.3. | Ventajas | 23 |
| 1.1.4. | Desventajas | 23 |
| 1.1.5. | Aplicaciones..... | 23 |
| 1.2. | Piezas a fabricar | 25 |
| 1.2.1. | Pistón | 25 |
| 1.2.2. | Dimensionamiento | 26 |
| 1.2.3. | Análisis estático del pistón | 27 |
| 1.2.4. | Análisis de esfuerzos en el pistón..... | 28 |
| 1.2.5. | Análisis de fatiga en el pistón | 29 |
| 1.2.6. | Parámetros de diseño del pistón..... | 30 |
| 1.2.7. | Cámara de presión | 35 |
| 1.2.8. | Dimensionamiento | 35 |
| 1.2.9. | Parámetros de diseño de la cámara de presión | 36 |
| 1.2.10. | Cálculo de espesores para cilindros hidráulicos..... | 37 |
| 1.3. | Material de estudio | 40 |
| 1.3.1. | Bronces al aluminio | 41 |
| 1.4. | Estudio de elementos para fundición | 43 |
| 1.4.1. | Análisis de hornos | 43 |
| 1.5. | Selección de la mezcla de moldeo..... | 47 |
| 1.5.1. | Clasificación de arenas para moldes | 48 |
| 1.5.2. | Acabado y control de propiedades de la mezcla | 50 |
| 1.5.3. | Aglomerantes y aglutinantes..... | 52 |
| 1.5.4. | Moldeo de fundición..... | 52 |
| 1.5.5. | Cajas de moldeado..... | 53 |
| 1.5.6. | Mezcla de arenas para noyos | 54 |
| 1.6. | Parámetros para la construcción de modelos..... | 55 |
| 1.6.1. | Espesores mínimos de las piezas..... | 55 |
| 1.6.2. | Superficie externa de la pieza | 56 |
| 1.6.3. | Sobre-medida de maquinado | 57 |
| 1.6.4. | Dimensiones de orificios fundidos..... | 57 |
| 1.6.5. | Contracción de fundición | 58 |
| 1.6.6. | Ángulos de desmoldeo | 58 |

| | | |
|--------|---|-----|
| 1.6.7. | Sistema de alimentación para moldes de fundición | 59 |
| 2. | METODOLOGÍA | 67 |
| 2.1. | Dimensionamiento de las piezas..... | 68 |
| 2.1.1. | Cálculo de esfuerzos del pistón | 68 |
| 2.1.2. | Cálculo de parámetros de diseño en el pistón..... | 70 |
| 2.1.3. | Cálculo de esfuerzo en sección crítica de la cámara de presión | 75 |
| 2.1.4. | Cálculo de parámetros de diseño en la cámara de presión | 77 |
| 2.2. | Cálculo del calor necesario para el horno..... | 78 |
| 2.3. | Análisis de arcilla en la base refractaria..... | 80 |
| 2.3.1. | Análisis granulométrico de la base refractaria | 80 |
| 2.3.2. | Cálculo de propiedades mecánicas en la mezcla de moldeo..... | 82 |
| 2.4. | Modelos y cajas de noyos de fundición | 83 |
| 2.4.1. | Construcción de modelos y cajas de machos..... | 86 |
| 2.5. | Cálculo del sistema de alimentación | 88 |
| 2.5.1. | Pistón | 88 |
| 2.5.2. | Cámara de presión | 93 |
| 2.5.3. | Verificación y ajustes del sistema de alimentación mediante paquete computacional de simulación | 97 |
| 2.6. | Preparación de los moldes | 102 |
| 2.6.1. | Preparación de la mezcla de moldeo | 102 |
| 2.6.2. | Fabricación de noyos para modelos huecos | 103 |
| 2.6.3. | Moldeo | 105 |
| 2.7. | Fusión y colado del metal..... | 107 |
| 2.7.1. | Preparación y cálculo de la carga | 107 |
| 2.7.2. | Método de carga del crisol | 110 |
| 2.8. | Operaciones post fundición | 111 |
| 2.8.1. | Desmoldeo..... | 111 |
| 2.8.2. | Mecanizado..... | 112 |
| 3. | Resultados y discusión | 113 |
| 3.1. | Resultados | 113 |
| 3.1.1. | Acabado superficial y dimensionamiento de las piezas | 113 |
| 3.1.2. | Pistón sin maquinar | 113 |
| 3.1.3. | Medidas de la pieza fundida..... | 114 |
| 3.1.4. | Cámara de presión sin maquinar | 115 |
| 3.1.5. | Medida de la Pieza fundida | 116 |
| 3.1.6. | Piezas maquinadas | 117 |
| 3.1.7. | Análisis del material..... | 118 |
| 3.1.8. | Ensayo de Dureza HRB | 118 |

| | |
|---|-----|
| 3.1.9. Ensayo de tracción | 118 |
| 3.1.10. Metalografía | 119 |
| 3.1.11. Espectrometría por Chispa | 121 |
| 3.2. Discusión..... | 121 |
| 3.2.1. Acabado superficial y dimensionamiento de las piezas | 121 |
| 3.2.2. Análisis de la precisión dimensional..... | 122 |
| 3.2.3. Análisis del acabado superficial | 124 |
| 3.2.4. Capacidad de reproducir detalles complejos | 125 |
| 3.2.5. Análisis del material..... | 127 |
| 4. Conclusiones | 130 |
| 5. Referencias bibliográficas | 132 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1.1. Clasificación de las bombas. | 19 |
| Figura 1.2. Clasificación de las bombas recíprocas. | 20 |
| Figura 1.3. Partes de una bomba de potencia horizontal triplex. | 20 |
| Figura 1.4. Cilindro de una bomba de desplazamiento positivo. | 21 |
| Figura 1.5. Pistón. | 25 |
| Figura 1.6. Émbolo-pistón. | 26 |
| Figura 1.7. Diagrama de la carga aplicada al pistón. | 27 |
| Figura 1.8. Diagrama de cuerpo libre del pistón. | 28 |
| Figura 1.9. Diagrama $S - nc$ | 29 |
| Figura 1.10. Diagrama $S - nc$ para materiales sin límite de fatiga. | 30 |
| Figura 1.11. Mecanismo cigüeñal-biela-pistón. | 31 |
| Figura 1.12. Dimensión del esfuerzo en el cilindro. | 36 |
| Figura 1.13. Presiones que actúan en el cilindro. | 37 |
| Figura 1.14. Esfuerzos en cilindros. | 38 |
| Figura 1.15. Distribución de esfuerzos. | 39 |
| Figura 1.16. Diagrama de equilibrio Cu-Al. | 41 |
| Figura 1.17. Formas de granos de la arena base: grano esférico, angulado y compuesto. | 49 |
| Figura 1.18. Representación del proceso de moldeo en arena. | 53 |
| Figura 1.19. Espesores mínimos de las piezas. | 56 |
| Figura 1.20. Ángulos de salida para modelos de fundición. | 59 |
| Figura 1.21. Partes del sistema de alimentación. | 60 |
| Figura 1.22. Partes del sistema de alimentación. | 62 |
| Figura 2.1. Diagrama de trabajo. | 67 |
| Figura 2.2. Esquema del mecanismo cigüeñal-biela-pistón. | 70 |
| Figura 2.3. Sección de la cámara de presión. | 76 |
| Figura 2.4. Diagrama del análisis granulométrico de la arena. | 81 |
| Figura 2.5. Superficies del pistón. | 84 |
| Figura 2.6. Superficies de la cámara de presión. | 84 |
| Figura 2.7. Modelos con ángulos de salida. | 85 |
| Figura 2.8. Cámara de presión (Bronce al aluminio). | 86 |
| Figura 2.9. Pistón (Bronce al aluminio). | 87 |
| Figura 2.10. Caja de noyos para la cámara de presión. | 88 |
| Figura 2.11. Caja de noyos para el pistón. | 88 |
| Figura 2.12. Nudos térmicos en el pistón. | 98 |
| Figura 2.13. Tiempo de solidificación en el pistón. | 98 |

| | |
|---|-----|
| Figura 2.14. Tiempo de llenado en el pistón..... | 99 |
| Figura 2.15. Formación de porosidades en el pistón. | 99 |
| Figura 2.16. Porosidades en plano xz. | 100 |
| Figura 2.17. Nudos térmicos en la cámara de presión..... | 100 |
| Figura 2.18. Tiempo de solidificación en la cámara de presión. | 101 |
| Figura 2.19. Tiempo de llenado en la cámara de presión. | 101 |
| Figura 2.20. Porosidades en la cámara de presión..... | 102 |
| Figura 2.21. Mezcla de moldeo..... | 102 |
| Figura 2.22. Noyo del pistón. | 104 |
| Figura 2.23. Noyo de la cámara de presión..... | 104 |
| Figura 2.24. Moldeo en cajas de madera. | 105 |
| Figura 2.25. Moldeo de piezas..... | 106 |
| Figura 2.26. Flameado de los moldes..... | 106 |
| Figura 2.27. Sellado de las cajas..... | 107 |
| Figura 2.28. Alambre de cobre cortado y enrollado. | 110 |
| Figura 2.29. Vertido del metal líquido. | 111 |
| Figura 3.1. Vista frontal del pistón fundido..... | 113 |
| Figura 3.2. (a)Vista superior del pistón fundido (b) Cavity y detalle interno del pistón. 114 | |
| Figura 3.3. Diámetros externos e internos del Pistón..... | 114 |
| Figura 3.4. Esquema del pistón. | 114 |
| Figura 3.5. Vista superior de la cámara de presión..... | 115 |
| Figura 3.6. Vista lateral de la cámara de presión. | 115 |
| Figura 3.7. Medidas generales de la cámara de presión. | 116 |
| Figura 3.8. Esquema de la cámara de presión..... | 116 |
| Figura 3.9. Pistón cilindrado y refrentado. | 117 |
| Figura 3.10. Cámara de presión luego del cilindrado y refrentado de las bridas. | 117 |
| Figura 3.11. Probeta normalizada ensayo de tracción. | 119 |
| Figura 3.12. Diagrama esfuerzo vs porcentaje de deformación. | 119 |
| Figura 3.13. Probeta pulida. | 120 |
| Figura 3.14. Probeta con ataque químico..... | 120 |
| Figura 3.15. Microestructura de la probeta fundida con ataque químico, amplificación 500x. 120 | |
| Figura 3.16. Microestructura de la probeta fundida con ataque químico, amplificación 500x. 121 | |
| Figura 3.17. Concepto de precisión en fundición. | 122 |
| Figura 3.18. Discontinuidades superficiales del pistón..... | 124 |
| Figura 3.19. Discontinuidades superficiales de la cámara de presión. | 125 |

| | |
|--|-----|
| Figura 3.20. Detalle interno del pistón. | 126 |
| Figura 3.21. Detalles interno de la cámara de presión..... | 126 |
| Figura 3.22. Microestructura de la probeta fundida con ataque químico, amplificación 500x. | 127 |
| Figura 3.23. Microestructura de Bronce al 10 % aluminio en las fundiciones. | 127 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|-----|
| Tabla 1.1. Listado de partes..... | 21 |
| Tabla 1.2. Presión máxima para cilindro de fundición..... | 35 |
| Tabla 1.3. Clasificación de bronce al Aluminio..... | 43 |
| Tabla 1.4. Constantes físicas de metales y aleaciones..... | 44 |
| Tabla 1.5. Composición en porcentajes de la mezcla de moldeo..... | 48 |
| Tabla 1.6. Contenido de arcilla en las arenas de fundición..... | 49 |
| Tabla 1.7. Tamaño de grano..... | 49 |
| Tabla 1.8. Factores de valorización de tamices..... | 51 |
| Tabla 1.9. Tipos de aglutinantes..... | 52 |
| Tabla 1.10. Radios de acorde de las piezas..... | 57 |
| Tabla 1.11. Contracción lineal media para aleaciones en base de bronce..... | 58 |
| Tabla 1.12. Ángulos de salida de acuerdo a la altura..... | 59 |
| Tabla 2.1. Variación del radio del cigüeñal..... | 73 |
| Tabla 2.2. Cantidad de arcilla en la arena..... | 80 |
| Tabla 2.3. Análisis granulométrico de la arena..... | 81 |
| Tabla 2.4. Resultados de las propiedades mecánicas de la arena..... | 82 |
| Tabla 2.5. Dimensiones de las piezas a construir..... | 83 |
| Tabla 2.6. Espesores mínimos de las piezas..... | 83 |
| Tabla 2.7. Magnitudes de piezas con orificios..... | 85 |
| Tabla 2.8. Porcentajes para la fabricación de resinas..... | 103 |
| Tabla 2.9. Composición química..... | 109 |
| Tabla 2.10. Pérdidas por fusión de los elementos aleantes del bronce al aluminio... .. | 109 |
| Tabla 3.1. Medidas del pistón fundido..... | 115 |
| Tabla 3.2. Dimensiones de la cámara de presión fundida..... | 116 |
| Tabla 3.3. Datos de dureza..... | 118 |
| Tabla 3.4. Datos ensayo de tracción..... | 118 |
| Tabla 3.5. Composición química..... | 121 |
| Tabla 3.6. Comparación de dimensiones del Pistón..... | 123 |
| Tabla 3.7. Comparación de dimensiones de la Cámara de presión..... | 123 |

RESUMEN

El presente documento contiene información teórica y práctica concerniente a la fabricación de un pistón y una cámara de presión en bronce al aluminio para un prototipo de bomba recíproca mediante un proceso de fundición.

El marco teórico sustentó el estudio de las bombas de desplazamiento positivo, los parámetros generales de diseño del pistón y la cámara de presión, los elementos que influyen dentro del proceso de fundición, como son la construcción de modelos, selección de mezcla de moldeo, sistemas de alimentación, moldeo, etc., y finalmente el estudio de la Aleación Bronce al Aluminio. También sintetiza la experiencia práctica del proceso de obtención de las piezas. En los resultados y la discusión se analizaron dos cosas, primero las piezas fundidas, sus dimensiones y acabado superficial y segundo, la obtención del material, esta parte recoge las memorias técnicas de los ensayos que se realizó al material para comprobar sus características. El estudio permite la producción de las piezas en el futuro. Para el país es un avance importante, dado que la fabricación de este tipo de piezas no se ha hecho anteriormente.

Palabras clave:

Aleación, contracción, ensayos, fundición, presión, solidificación.

ABSTRACT

This document contains theoretical and practical information concerning the manufacture of a piston and a pressure chamber in bronze to aluminum for a prototype of reciprocating pump by means of a casting process.

The theoretical basement supported the study of positive displacement pumps, the general design parameters of the piston and the pressure chamber, the elements that influence the casting process, such as model construction, molding mix selection, feeding systems, molding, etc., and finally the study of Bronze Aluminum Alloy. It also synthesizes the practical experience of the process to obtain the pieces. In the results and the discussion two things were analyzed; first one the castings, their dimensions and surface finish and second the obtaining of the material, this section collects the technical memories of the tests made to the material to check their characteristics. The study allows the production of the pieces in the future. It is an important advance in our country, because the manufacture of this type of pieces has not been done previously.

Keywords:

Alloy, casting, shrinkage, pressure, solidification, testing

DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UN PISTÓN Y UNA CÁMARA DE PRESIÓN DE BRONCE AL ALUMINIO PARA UN PROTOTIPO DE BOMBA RECIPROCANTE.

INTRODUCCIÓN

La industria petrolera, de alimentos, la agroindustria, las empresas mineras, las hidroeléctricas son algunos de los sectores que incluyen el manejo de líquidos en sus operaciones ya sea como actividad secundaria o primaria. El desplazamiento del agua desde fuentes naturales, permite solventar necesidades asociadas a la producción (riego, refrigeración, sistemas hidráulicos, etc.). El agua de ríos, lagunas, etc., presentan generalmente sedimentos y materiales disueltos, además no tienen flujo constante ni un volumen controlado, lo que limita la utilización de bombas centrífugas. Por ello es importante el diseño y fabricación de un prototipo de bomba recíproca, que promueva el desarrollo productivo del país y permita brindar soluciones a este tipo de demandas. El presente trabajo de titulación contribuye en la fabricación de dos componentes sustanciales de las bombas de desplazamiento positivo, el pistón y la cámara de presión. Ambos elementos trabajan a altas presiones, y en medios abrasivos, de aquí la importancia de realizar un diseño que garantice que las piezas cumplan con los requerimientos de trabajo, y justificar el uso del bronce al aluminio como material que posee una buena resistencia a la corrosión y al desgaste. En ese sentido se analiza que la producción de Bronce al Aluminio en nuestro País, no está sistematizada, se obtiene a partir de un conocimiento empírico, donde cada fundidor elige sus propios métodos, poniendo en riesgo la exactitud que requiere esta aleación. Existe la necesidad de desarrollar un procedimiento tecnológico que pueda servir como guía para futuros trabajos en la obtención de Bronce al Aluminio. La metodología investigativa comprende una parte teórica y una práctica, parte del método científico, que busca la comprobación de la teoría mediante la experiencia directa. Este Estudio Técnico fue desarrollado en su totalidad dentro Escuela Politécnica Nacional, principalmente en el Laboratorio de Fundición de la Facultad de Ingeniería Mecánica, demostrando que la universidad está en la capacidad de asumir nuevos retos en la producción de piezas y mecanismos necesarios para la industria.

Objetivo general

Obtener en bronce al aluminio un pistón y una cámara de presión con un maquinado preliminar, para una bomba recíproca de triple émbolo horizontal de 300 psi de presión de bombeo.

Objetivos específicos

- Justificar el uso de la aleación bronce al aluminio para la obtención de los elementos descritos.
- Realizar el diseño del pistón y la cámara de presión, tomando en cuenta las condiciones de trabajo de la bomba.
- Fabricar los modelos, noyos y moldes a utilizarse en el proceso de fundición, tomando en cuenta los parámetros establecidos, que son acabado superficial, dimensiones, tipo de material, etc.
- Obtener las piezas en bronce al aluminio con un acabado superficial preliminar.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Bombas

Las bombas hidráulicas son mecanismos que utilizan energía mecánica, muchas veces entregada por motores eléctricos, a diésel, etc., para impulsar un fluido, en este proceso la energía, que inicialmente es mecánica, se transforma en energía hidráulica. Son utilizadas dentro de la industria para mover una gran variedad de líquidos: agua dulce, agua salada, aceite, petróleo, lodos, líquidos alimenticios, etc. Este movimiento provoca un aumento en la presión del líquido, la presión tanto a la entrada como a la salida de la bomba es una condición que viene dada por los requerimientos o aplicación específica.

Las bombas se clasifican de acuerdo a su funcionamiento y aplicación. A continuación se muestra un esquema de la clasificación general de las bombas:

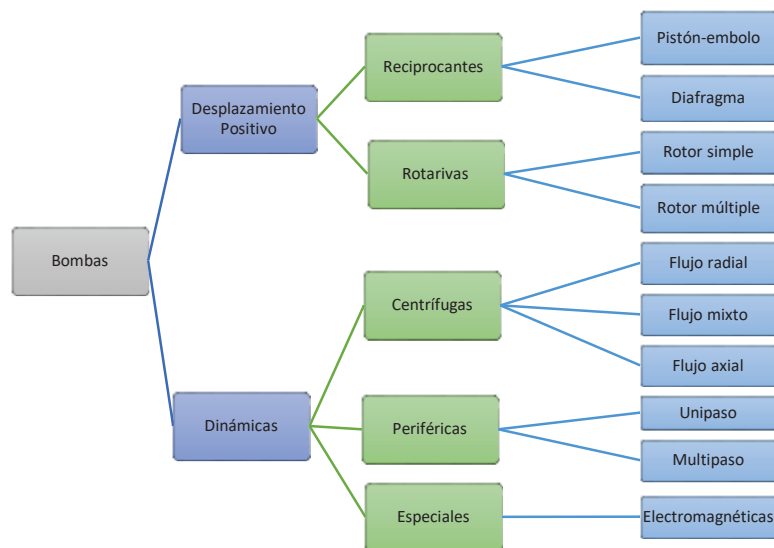


Figura 1.1. Clasificación de las bombas.
(Fuente: Viejo Zubicaray & Álvarez Fernández, 2003)

En las bombas de desplazamiento positivo el fluido de trabajo está contenido entre el elemento impulsor y la carcasa, el líquido es guiado durante toda su trayectoria dentro de la bomba antes de ser impulsado. Se clasifican en bombas reciprocantes y rotativas.

“Las bombas reciprocantes son unidades de desplazamiento positivo que descargan una cantidad definida de líquido durante el movimiento del pistón o émbolo a través de la distancia de carrera.” (Tayler & Hicks, 1988, pág. 57)

Clasificación de las bombas reciprocantes:

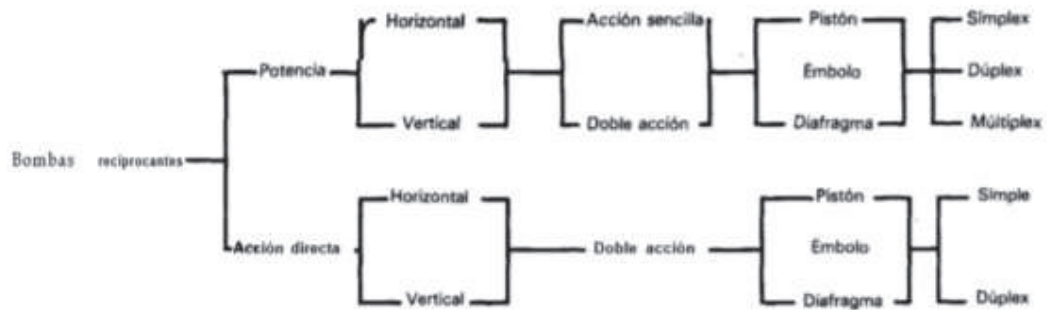


Figura 1.2. Clasificación de las bombas reciprocantes.
(Fuente: Kenneth J, 1989, pág. 154)

El objeto de estudio se centra en las bombas reciprocantes de potencia horizontal de triple embolo. En adelante se detalla su funcionamiento, las partes que las forman, sus aplicaciones, ventajas y desventajas.

1.1.1. Bomba Horizontal de Potencia Triplex

Como indica Mott (2006), la bomba recíproca emplea un pistón que mueve el fluido, el liquido atraviesa la válvula de entrada y ocupa el volumen de la cámara de presión, conforme el pistón se desplaza. Después, cuando el pistón se mueve hacia delante, la válvula de entrada se cierra y el fluido es empujado hacia la válvula de descarga.

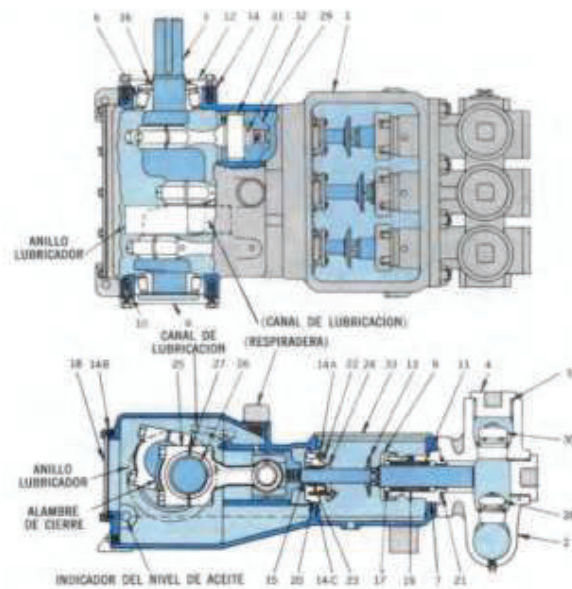


Figura 1.3. Partes de una bomba de potencia horizontal triplex.
(Fuente: Viejo Zubicaray & Álvarez Fernández, 2003, pág. 93)

Partes constituyentes de una Bomba de Potencia Horizontal Triplex:

Tabla 1.1. Listado de partes.

| PARTES | | |
|---|-----------------------------------|-----------------------------------|
| 1. Soporte del bastidor | 13. Deflector | 22. Tornillo de expulsión |
| 2. Cilindro | 14. Junta | 23. Empaque de extremo |
| 3. Cigüeñal | 14A. Junta | 24. Prensa-estopas |
| 4. Cabeza del cilindro | 14B. Junta | 25. Biela |
| 5. Anillo "o" | 14C. Junta | 26. Metal de la biela |
| 6. Balero del Cigüeñal | 15. Émbolo | 27. Lainas de la biela |
| 7. Caja de empaques | 16. Sello de aceite | 28. Válvula de succión |
| 8. Tapa de balero en el extremo cerrado | 17. Anillo de empaque del émbolo | 29. Cruceta |
| 9. Tuerca de la caja de empaques | 18. Tapa trasera del bastidor | 30. Válvula de descarga |
| 10. Laina | 19. Anillo de linterna | 31. Perno de cruceta |
| 11. Empaque del émbolo | 20. Caja de empaque del diafragma | 32. Perno del bruje de la cruceta |
| 12. Tapa del balero del extremo motriz | 21. Junta de la caja de empaques | 33. Tapa superior del bastidor |

(Fuente: Viejo Zubicaray & Álvarez Fernández, 2003, pág. 93)

1.1.2. Funcionamiento

El movimiento del fluido en esta bomba se da en dos momentos: succión y descarga. Para la succión inicialmente el cilindro o cámara de presión no contiene líquido, el pistón se desplaza provocando una caída de presión, generando vacío, mientras el líquido afuera se encuentra a presión atmosférica, la diferencia de presiones da paso a la succión del líquido hacia dentro del cilindro. La segunda parte del movimiento, descarga, el fluido está dentro del cilindro a una presión p , el émbolo se desplaza con una velocidad uniforme V , se considera que tanto el pistón como el cilindro son rígidos y que el fluido es incompresible (Viejo Zubicaray & Álvarez Fernández, 2003).

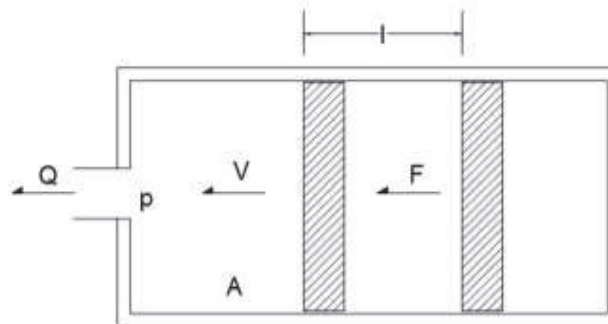


Figura 1.4. Cilindro de una bomba de desplazamiento positivo.
(Fuente: Viejo Zubicaray & Álvarez Fernández, 2003, pág. 82)

Para que el émbolo se desplace es necesario que se aplique una fuerza F . El movimiento del embolo desplaza y obliga al líquido a salir por el orificio. Si el embolo recorre una distancia l , el volumen que ocupa el líquido será $A * l$ (A , es el área transversal del émbolo). El volumen que sale a través del orificio es $A * l$ debido a que el líquido de trabajo es incompresible. El tiempo que se demora en recorrer la distancia l es:

$$t = \frac{l}{V}$$

Ec. (1.1)

El Caudal Q , será:

$$Q = \frac{A * l}{t} = A * V$$

Ec. (1.2)

Considerando la fricción despreciable, la potencia transmitida al fluido es:

$$P = F * V$$

Ec. (1.3)

Como: $F = p * A$

$$P = F * V = p * A * V = Q * p$$

Ec. (1.4)

Donde:

l : Distancia recorrida por el pistón

V : Velocidad de pistón

t : Tiempo

Q : Caudal

P : Potencia

F : Fuerza aplicada al pistón

A : Área transversal del pistón

p : Presión de fluido en el interior del cilindro

Las bombas de desplazamiento positivos trabajan bien con grandes presiones y pequeños caudales. Si se desea aumentar el caudal entregado, la potencia debe aumentar también, para esto se requiere aumentar el tamaño de la bomba porque los fenómenos de inercia impiden un aumento de caudal mediante un aumento de velocidad.

"El principio de desplazamiento positivo" consiste en el movimiento de un fluido causado por la disminución del volumen de una cámara, como señala (Viejo Zubicaray & Álvarez Fernández, 2003).

1.1.3. Ventajas

Estas bombas no requieren de un caudal constante como las bombas centrifugas. Con estas bombas se pueden obtener altas presiones con un volumen controlado o dosificado. En estas bombas, la variación de presión hace que el fluido se mueva, y no por la variación de velocidad del líquido.

Se pueden mover fluidos de distintas densidades y con alta viscosidad, sin que haya problema en el desempeño de la bomba.

La capacidad de la bomba está en función de la velocidad y no en función de la presión de descarga, esto significa que con un mismo volumen de líquido, desplazándose a mayor velocidad se podrán obtener presiones de descarga mayores.

Tiene alto rendimiento, oscila entre 85 y 94% Kenneth J. (1989). Las pérdidas se dan en las empaquetaduras, en los elementos que transmiten el movimiento mecánico del motor (cigüeñal y bielas) y en las válvulas.

1.1.4. Desventajas

Los costos de instalación y de mantenimiento pueden resultar elevados en la mayoría de aplicaciones. Las empaquetaduras en una bomba de potencia duran menos tiempo que los empaques que se utilizan en una bomba rotativa. (Kenneth J, 1989)

Otra limitación de este tipo de bombas es que la descarga del líquido no se da de manera continua sino por pulsaciones. Para aplicaciones que requieren un flujo de descarga constante, no conviene seleccionar una bomba reciprocante (Tayler & Hicks, 1988).

1.1.5. Aplicaciones

Los servicios típicos incluyen limpieza con agua a alta presión (20 gpm a 10 000 psi), inyección de glicoles (5 gpm a 1 000 psi), carga con amoníaco (40 gpm a 4 000 psi). Otra

aplicación en donde es casi obligatoria la bomba reciprocante es para pastas aguadas abrasivas o materiales muy viscosos a más de unas 500 psi (Kenneth J, 1989).

En el tratamiento de alcoholes y aminos se utilizan bombas de desplazamiento positivo para bombear estos líquidos antes y después de someterse a variaciones de temperatura donde se elimina la humedad para obtener diferentes compuestos.

En el proceso de refinación del Petróleo se utilizan estas bombas en varias etapas, en la absorción de hidrocarburos como butano, propano, y etano a partir de petróleo pobre. También en campos pequeños se utilizan bombas de potencia para inyección de agua salada, que es utilizada como un método para recuperación secundaria del petróleo, se inunda los yacimientos con agua salada, obligando a los hidrocarburos a moverse hacia el pozo central. Luego para la eliminación del agua se vuelve a utilizar bombas de potencia. Durante la perforación de pozos de petróleo y gas siempre se tienen los llamados evitadores de reventones hidráulicos, que cierran el pozo si se inicia un flujo descontrolado conocido como reventón. La potencia hidráulica se aplica con bombas reciprocantes, donde la presión normal de trabajo oscila entre 1000 y 3000 psi. En los sistemas de oleoductos y gaseoductos se utilizan bombas de potencia para inyectar amoníaco o hidrocarburos (Kenneth J, 1989).

En sistemas hidráulicos utilizados dentro de la industria se requieren bombas para mover líquidos hidráulicos, como aceite soluble y agua en laminadoras de acero y de aluminio, para colocar en los cilindros que mueven el metal que se lamina y en los rodillos de las laminadoras (Kenneth J, 1989).

Otra aplicación industrial son las Aguas Pasta, se emplean bombas de potencia para manejar: mantequilla de maní, detergentes, plásticos, carbón y minerales pulverizados en procesos y tuberías (Kenneth J, 1989).

La leche y otros productos alimenticios y no alimenticios se homogeneizan para hacerlos uniformes y evitar la separación. Gran parte de la homogeneización se logra al bombear el material con una bomba de potencia de émbolo hasta una alta presión y, luego, con la estrangulación con una o más válvulas especiales (Kenneth J, 1989).

Los elementos designados para su respectivo estudio y posterior fabricación para una bomba de desplazamiento positivo son el pistón y la cámara de presión, que a continuación se explicará más a detalle cada uno de ellos.

1.2. Piezas a fabricar

1.2.1. Pistón

El pistón es un tipo de elemento mecánico, destinado a soportar presión y sometido a un movimiento constante. Tiene la forma de un cilindro hueco, con una de las caras cerradas y la otra abierta, que es por donde ingresa la biela. Está conectado a la biela, mediante un pasador. La Biela transfiere el movimiento alternativo recibido desde el cigüeñal hacia el pistón, transforma el movimiento circular del cigüeñal en un movimiento lineal de izquierda a derecha.

En el pistón por lo general se encuentra una camisa reemplazable, evitando que se produzca el desgaste de los anillos del pistón (Kenneth J, 1989).

Los pistones son usados para presiones de agua de hasta 2000 lb/in^2 (138 bar). Los materiales generalmente usados para su fabricación son hierro fundido, bronce, o acero con anillos de sellado de elastómero reforzado (Igor J. Karassik, 2001).

De acuerdo al libro de (Eulogio, Oswaldo, Jullio, & Aurelio, 2005), para llevar a cabo la construcción de un pistón se debe fundamentar en los procesos de diseño, sustentados en desarrollos científicos y tecnológicos, ciencia de los materiales, mecánica de materiales, permitidos para comprobar e implantar la nueva tendencia de los parámetros tecnológicos. En la selección de los materiales, éstos deben contar con las condiciones apropiadas para que cumpla con las necesidades de trabajo, tomando en cuenta la clasificación, selección y control de las propiedades como es la calidad en los materiales, ya que son consideraciones importantes presentes según normas técnicas.



Figura 1.5. Pistón.
(Fuente: Propia)

Para este tipo de bombas el pistón tiene forma cilíndrica, y sirve como guía a lo largo del cilindro; está acoplado por un lado a la biela que comunica el movimiento del cigüeñal, y

por el otro lado está montado al inyector (plunger) que recibe el fluido a desplazar (Kenneth J, 1989).

1.2.2. Dimensionamiento

El objetivo de construcción para dicho elemento es el poder soportar una presión de bombeo en la cámara igual a 300 lb/in^2 [PSI], que ejerce el fluido y es transmitida por el inyector al pistón, considerando al mecanismo inyector-pistón como un solo elemento. Donde la carga que actúa a lo largo del inyector es de la misma magnitud que llega al pistón.

Tomando en consideración el dimensionado del pistón, se determina:

- Estado de esfuerzo
- Propiedades de material

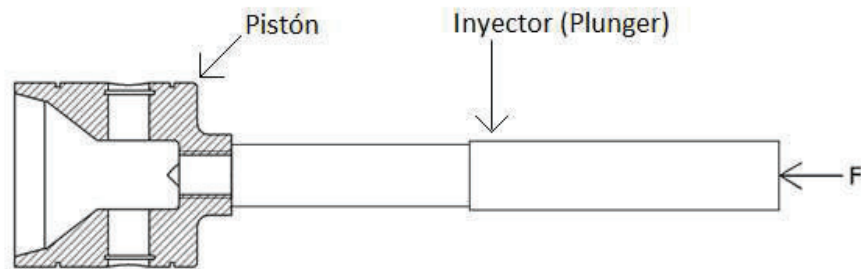


Figura 1.6. Émbolo-pistón.
(Fuente: Propia)

El área de aplicación de la presión se realiza en la superficie transversal derecha del inyector, expresada en (mm^2), como se observa en la figura 1.6, la cual está en contacto directo con el fluido, transmitiéndose a lo largo del inyector hasta interactuar sobre el pistón.

Con las propiedades mecánicas del material del pistón, que es una aleación de Bronce al aluminio, se tiene una resistencia a la compresión de 940 [Mpa] (SUMITEC, s.f.), dato usado por diversas empresas para su fabricación, el cual se la presenta en el anexo 1, que viene a ser dato comparativo con el esfuerzo a obtener de la carga de aplicación sobre el pistón. Para ello, se hace uso de la siguiente ecuación para obtener la magnitud del esfuerzo.

$$\sigma = \frac{F}{A_p}$$

Ec. (1.5)

Donde

σ : Esfuerzo que actúa sobre el pistón

F : Carga aplicada al pistón transmitido por el inyector

A_p : Área de la sección transversal del pistón

Al obtener el valor del esfuerzo aplicado, se consideran dos opciones, que este valor sea mayor o menor que el valor que se tiene como dato, con el cual se va a comparar. Si el resultado del esfuerzo sobre el pistón es menor que la resistencia a la compresión resulta que el elemento va a soportar la carga a la que está sometida; por otro lado si se tiene un esfuerzo que resulta mayor al establecido como dato, quiere decir que la pieza no soportará la carga de aplicación y empezará a generarse deformaciones en el material y posteriormente la pieza va a comenzar a fallar hasta su ruptura.

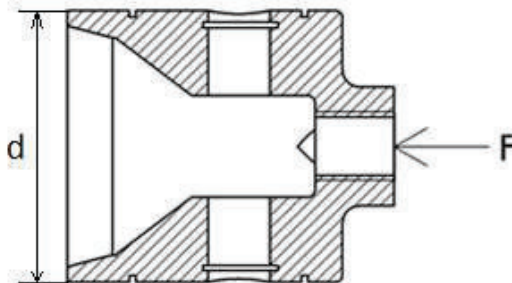


Figura 1.7. Diagrama de la carga aplicada al pistón.
(Fuente: Propia)

1.2.3. Análisis estático del pistón

Se realizan a elementos mecánicos, los cuales están interactuando con cargas estáticas, es decir que no varían con el tiempo.

Se considera que el sistema a estudiar se encuentra sin movimiento, o que presenta movimiento pero éste es constante; al tener presente estas condiciones el sistema se encuentra en equilibrio (Budynas & Nisbett, 2008).

Como se observa en la figura 1.8, las cargas que actúan sobre el pistón comprimen al elemento. Para realizar el estudio estático del elemento se considerará la sección de

aplicación de la carga como una barra circular, y una vez analizadas todas las cargas presentes en la pieza procedemos a realizar el diagrama de cuerpo libre del elemento.



Figura 1.8. Diagrama de cuerpo libre del pistón.
(Fuente: Propia)

1.2.4. Análisis de esfuerzos en el pistón.

Para el diseño de objetos se debe considerar ciertos aspectos como la función que va realizar, resistencia y apariencia. La prioridad en la mecánica de materiales para el diseño es la resistencia, “capacidad del objeto para soportar o transmitir cargas” (Gere, 2002, pág. 39).

- Factor de seguridad

Las cargas que debe soportar un elemento deben ser superiores a las cargas aplicadas durante el servicio. En otras palabras “la resistencia real de una estructura debe ser mayor que la resistencia requerida” (Gere, 2002, pág. 39). Esta relación se conoce como factor de seguridad.

El factor de seguridad tiene que ser desde 1 o un poco más un máximo de 10.

$$\text{Factor de seguridad } (n) = \frac{\text{Resistencia última ó resistencia de fluencia}}{\text{Resistencia requerida}}$$

Ec. (1.6)

- Esfuerzos admisibles

En muchos de los elementos la importancia de los materiales es mantenerse dentro del límite elástico, así no presentaran deformaciones permanentes al momento de retirar las cargas. El factor de seguridad está en función del esfuerzo último de tensión (Gere, 2002).

$$\sigma_{adm} = \frac{\sigma_u}{n}$$

Ec. (1.7)

$$F_{adm} = \sigma_{adm} \cdot A_p$$

Ec. (1.8)

1.2.5. Análisis de fatiga en el pistón

En muchos casos los elementos de máquinas como ejes, árboles, bielas, cigüeñales y resortes, están interactuando con cargas variables. En elementos sometidos a este tipo de esfuerzos se tienden a formar grietas debido a la repetición del esfuerzo, hasta producir la falla completa del elemento; dicho fenómeno se conoce como fatiga. (Egas, 2011)

Para el caso del pistón, se considera la presencia de cargas variables, debido a la acción de succión y descarga del fluido que se genera dentro de la cámara de presión, y la repetición del esfuerzo producto del movimiento sinusoidal transmitido del mecanismo cigüeñal-biela-pistón.

Los diferentes elementos de máquinas están contruidos con materiales que van a soportar todo tipo de esfuerzo, ya sea estático o variable, tomando en cuenta la función que va desempeñar el elemento. Para el análisis de esfuerzos variables se tiene el diagrama esfuerzo versus número de ciclos $S - n_c$, que es una representación experimental cuando el esfuerzo aplicado a cierto elemento se repite hasta que el material falle.

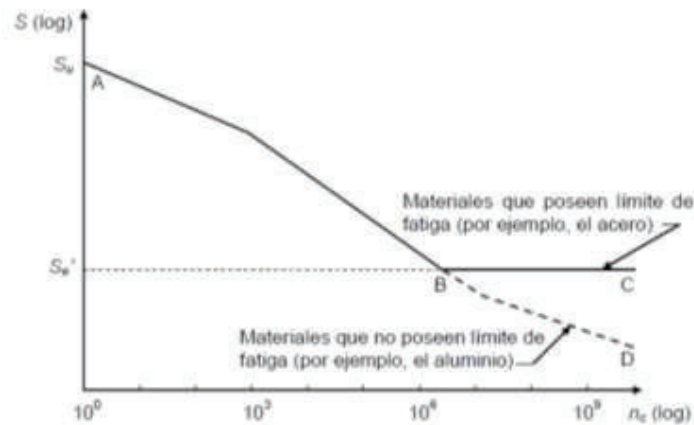


Figura 1.9. Diagrama $S - n_c$.
(Fuente: Egas, 2011, pág. 3)

De acuerdo a la figura 1.9 se observa que de acuerdo a la pendiente de la curva mientras menor es el esfuerzo, se tendrá una mayor duración.

Para materiales como el acero el diagrama de la curva es el ABC. Mientras que para materiales como el aluminio, magnesio, cobre, aleaciones de níquel y de aleaciones en general, no presentan límite de fatiga, comportándose como el diagrama de la curva ABD.

Se puede tener una curva con una pendiente menor para n_c se tendrá una mayor aproximación a 10^7 ciclos, idealmente no se generaría ningún esfuerzo, lo que no produciría una falla en la probeta. (Egas, 2011)

Los materiales como aleaciones de aluminio y cobre, que no poseen límite de fatiga están destinados a diseñarse para una vida finita, es decir que su duración esta limitada. En la figura 1.10 se tiene el diagrama $S - n_c$, para materiales sin límite de fatiga.

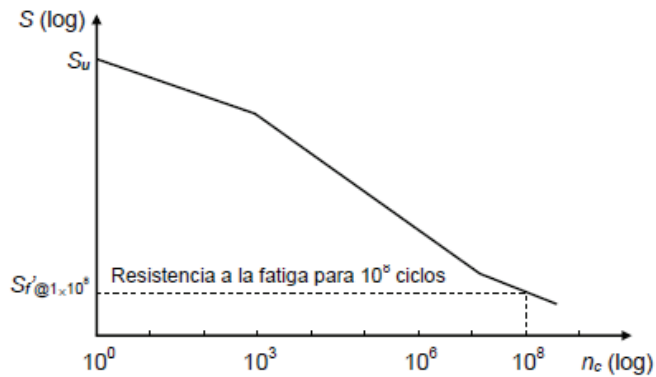


Figura 1.10. Diagrama $S - n_c$ para materiales sin límite de fatiga.
(Fuente: Egas, 2011, pág. 8)

- Límite de resistencia a la fatiga

Ecuaciones usadas para materiales fundidos y aleaciones de aluminio y de cobre, con duración de 5×10^8 ciclos. Ecuaciones de datos experimentales. (Egas, 2011, pág. 10)

Aleaciones de cobre

$$S_f'_{@5 \times 10^8} \approx 0,4 S_u \quad \text{para } S_u < 276 \text{ MPa (40 ksi)}$$

Ec. (1.9)

$$S_f'_{@5 \times 10^8} \approx 96 \text{ MPa} = 14 \text{ ksi}, \quad \text{para } S_u \geq 276 \text{ MPa}$$

Ec. (1.10)

1.2.6. Parámetros de diseño del pistón

Como parámetros importantes para el estudio del pistón, se hace un análisis dinámico del mecanismo cigüeñal-biela-pistón en función del ángulo de rotación del cigüeñal y la longitud del radio.

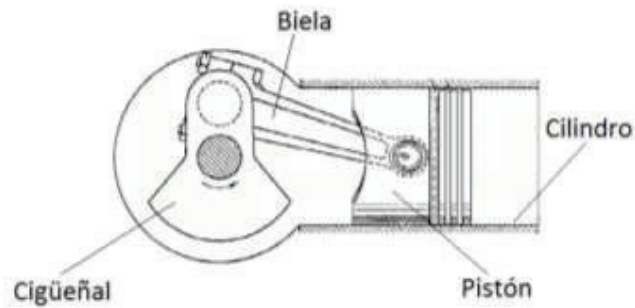


Figura 1.11. Mecanismo cigüeñal-biela-pistón.
(Fuente: <http://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn63.html>)

- Carrera del pistón

Es la longitud que puede avanzar el pistón en todo su trayecto (desplazamiento), igual al diámetro del cigüeñal.

- Velocidad lineal del pistón

La rapidez con la cual se desplaza el pistón depende del tamaño y la cantidad de aceite que circula en el interior del cilindro (Eulogio, Oswaldo, Jullio, & Aurelio, 2005). Para plasmar una relación porcentual entre el flujo y la velocidad se considera el volumen a llenarse en el cilindro para efectuar un movimiento específico, tomando en cuenta las siguientes consideraciones: ver página 68.

La fuerza generada por el actuador o como es el caso del inyector va ser directamente proporcional a la presión sin tomar en cuenta el tipo de flujo.

La velocidad se encontrará en función de la cantidad de flujo del fluido, independiente de la presión.

Según datos experimentales realizados a este tipo de bombas, la velocidad lineal máxima que puede alcanzar el pistón es de $1,5 [m/s]$, (Fernández, 2005), esto dependiendo de las rpm del eje de la bomba que está en el rango de 300 a 500 rpm, la eficiencia volumétrica que es la relación del caudal calculado y el caudal teórico de la bomba cuyo valor esta expresado en porcentaje y está alrededor de los 0,85 y 0,99%. Dándose alteraciones en el funcionamiento de las válvulas si se excede el número de revoluciones. Por éste motivo las dimensiones que presentan éste tipo de bombas son mayores que las bombas centrífugas, tomando en consideración que los dos tipos de bombas presentan las mismas condiciones tanto de caudal como de altura manométrica (Fernández, 2005).

Respecto a los dos parámetros mencionados anteriormente se hace uso de la geometría para obtener el desplazamiento del pistón que va ir variando en función del ángulo de rotación del cigüeñal (Rodrigo Cuesta, 2010). Cuyas ecuaciones se expresan a continuación:

$$x = r(1 - \cos \alpha) + \frac{1}{\lambda} \left(1 - \sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2 \alpha} \right)$$

Ec. (1.11)

Donde

x : Desplazamiento del pistón.

r : Radio del cigüeñal.

l : Longitud del largo de la biela.

λ : Relación radio del cigüeñal sobre longitud de la biela.

α : Ángulo de rotación del cigüeñal.

Al tener la ecuación del desplazamiento del pistón, lo que se hace es derivar dicha ecuación para obtener la velocidad del pistón (Rodrigo Cuesta, 2010).

$$v = \frac{\partial x}{\partial t} \rightarrow v = \frac{\partial x}{\partial \alpha} \times \frac{\partial \alpha}{\partial t}$$

$$v = r \cdot w \cdot \left(\sin \alpha + \frac{\lambda \cdot \sin \alpha \cos \alpha}{\sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2 \alpha}} \right)$$

Ec. (1.12)

Donde

v : Velocidad del pistón.

r : Radio del cigüeñal.

w : Velocidad angular del cigüeñal en rpm. $\left(w = \frac{\partial \alpha}{\partial t} \right)$

α : Ángulo de rotación del cigüeñal.

El dimensionamiento del pistón, parte del análisis de movimiento que el pistón conjuntamente con la biela y el cigüeñal tienen, que es una función sinusoidal debido a que depende del ángulo de giro del cigüeñal para obtener el movimiento lineal del pistón.

Las ecuaciones utilizadas para hallar las dimensiones del pistón, se las obtuvo de (Sonar & Chattopadhyay, 2015)

Espesor de la cabeza del pistón

$$e_p = D \sqrt{\frac{3 \cdot p}{16 \cdot \sigma_{adm}}}$$

Ec. (1.13)

Donde:

D : Diámetro [mm]

p : Presión de la cámara [N/mm^2]

σ_{adm} : Esfuerzo admisible del material [MPa]

Espesor radial del anillo

$$t_1 = D \sqrt{\frac{3 \cdot p_w}{\sigma_t}}$$

Ec. (1.14)

Donde:

D : Diámetro [mm]

p_w : Presión del gas en la pared del cilindro ($0,042 N/mm^2$)

σ_t : Esfuerzo de tensión [MPa]

Espesor axial del anillo

$$t_2 = 0,7 \cdot t_1$$

Ec. (1.15)

Donde:

t_1 : Espesor radial del anillo [mm]

Ancho de la ranura del anillo

$$m_2 = 0,75 \cdot t_2$$

Ec. (1.16)

Donde:

t_2 : Espesor axial del anillo

Espesor del barril del pistón

$$t_3 = (0,03 \cdot D) + b + 4,5$$

Ec. (1.17)

Donde:

b : Profundidad radial de las ranuras del anillo

$$b = 0,4 + t_1$$

Ec. (1.18)

Donde:

t_1 : Espesor radial del anillo

Espesor del cilindro en el extremo abierto

$$t_4 = 0,25 \cdot t_1$$

Ec. (1.19)

Donde:

t_1 : Espesor radial del anillo

Diámetro del pasador del pistón

$$d_o = 0,03 \cdot D$$

Ec. (1.20)

Adicionalmente, como elementos indispensables y necesarios que acompañan al pistón son los anillos que cumplen una función importante, la cual se detalla a continuación.

- Anillos para pistón

Los anillos son elementos circulares generalmente hechos de acero, que van incrustados en las ranuras del pistones, cuya principal función es sellar la cámara de presión, evitando el paso del fluido utilizado como lubricante que actúa en las paredes del cilindro. Podemos encontrar diferentes tipos de anillos redondos, cuadrados, planos, inclinados, afilados, lo más importante en tomar en cuenta es que deben ser de las mismas dimensiones del pistón (CTP Quality Products, 2016).

Los anillos del pistón presentan desgaste debido a la fricción que éstos generan al contacto con el cilindro.

1.2.7. Cámara de presión

Es el cuerpo donde se concentra la presión de la bomba, este elemento está sometido a esfuerzos variables. En el proceso de succión dentro de la cámara la presión decae, al instante, para impulsar el fluido, la presión se eleva. Si la presión varía, los esfuerzos en cada punto de la cámara varían también. Para el análisis dimensional, se considera a la cámara como un cilindro hueco, donde lo fundamental es determinar el espesor de pared capaz de soportar la variación de presión. Los cilindros fundidos se limitan para las presiones desarrolladas, mostradas en la siguiente tabla.

Tabla 1.2. Presión máxima para cilindro de fundición.

| Material | lb/in^2 (bar) |
|--------------------|-------------------------|
| Hierro fundido | 2000 (137) |
| Bronce al aluminio | 2500 a 3000 (172 a 207) |
| Acero | 3000 (207) |
| Hierro dúctil | 3000 (207) |

(Fuente: Igor J. Karassik, 2001)

1.2.8. Dimensionamiento

Los esfuerzos más altos se generan en la intersección de las perforaciones internas horizontal y vertical. A diferencia de un cilindro simple donde las tensiones internas son analizadas como una sola tensión en una circunferencia, la tensión en la intersección de los orificios cilíndricos de una bomba de potencia se basa en el esfuerzo de doble tensión circunferencial. Como se puede observar en la figura 1.12, se tiene las distancias b y d que son los diámetros internos, mientras que a y c son los diámetros a la obstrucción más cercana del material sólido del cilindro, P es la presión desarrollada, y S es el esfuerzo resultante (Igor J. Karassik, 2001).

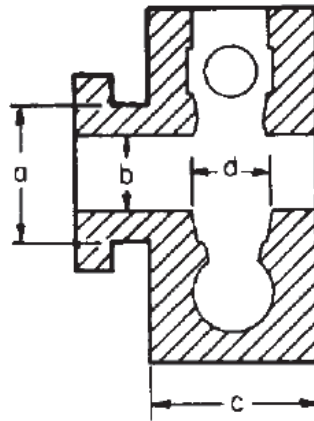


Figura 1.12. Dimensión del esfuerzo en el cilindro.
(Fuente: Igor J. Karassik, 2001)

Teniendo la siguiente ecuación para el cálculo del esfuerzo.

$$S = P \left[\left(\frac{a^2 + b^2}{a^2 - b^2} \right) + \left(\frac{c^2 + d^2}{c^2 - d^2} \right) \right]$$

Ec. (1.21)

El factor de concentración de esfuerzos ubicado en la intersección de las perforaciones pueden ser omitidos si el radio no es menor que los 0.25 in (1.5 mm). En cada ciclo que realiza el émbolo, la presión desarrollada va desde la presión de succión hasta la presión de descarga y regresa a la de succión.

La presión instantánea en el cilindro puede ser mayor a la presión de diseño ya que se debe a las diferentes causas como un inadecuado sistema de aspiración, alteraciones en los procesos y malas aplicaciones en el funcionamiento.

Se tiene la presencia de cavitación cuando el líquido entrante contiene gas el cual se libera debido a la presión de succión, incrementándose la presión instantánea de cuatro a cinco veces la presión de diseño. Este fenómeno reduce la vida útil del cilindro y otros componentes que están en contacto con el fluido (Igor J. Karassik, 2001).

1.2.9. Parámetros de diseño de la cámara de presión

Para realizar el dimensionado del cilindro se debe considerar los siguientes parámetros, como se puede observar en la siguiente gráfica a continuación:

- Presión interna
- Presión externa

-Carga axial

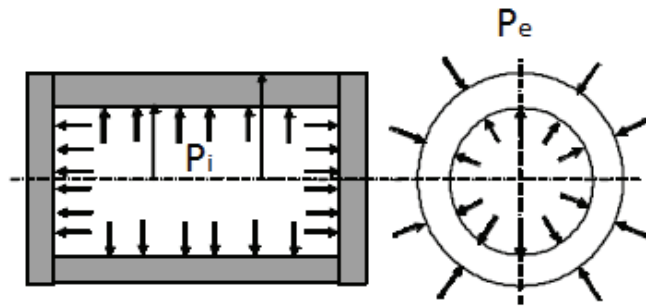


Figura 1.13. Presiones que actúan en el cilindro.
(Fuente: Eulogio, Oswaldo, Jullio, & Aurelio, 2005)

La presencia de los esfuerzos y deformaciones se producen debido a la presión que ejerce el fluido sobre la pared interna de la cámara. Se toma en consideración la presión interna y las propiedades del material a utilizarse para obtener el valor del diámetro del cilindro para su construcción. El espesor de la cámara del cilindro estará en función de la presión de trabajo (Eulogio, Oswaldo, Jullio, & Aurelio, 2005).

1.2.10. Cálculo de espesores para cilindros hidráulicos

Se asume a la cámara de presión como un tramo de tubería cilíndrica, la cual va depender de la presión interna de trabajo para el dimensionamiento del espesor de la pared de la tubería donde se tienen paredes gruesas y delgadas. Se hace una relación entre el radio interno y el espesor de la pared de la tubería, considerando dos casos: 1) de pared delgada si la relación es mayor o igual a 10 y 2) si dicha relación es menor a 10 entonces se tiene una pared gruesa. Teniendo la siguiente expresión (Hernández Avendaño, 2008, pág. 22).

$$\frac{r}{e} \geq 10$$

Ec. (1.22)

Donde

r : Radio interno de la tubería

e : Espesor de la pared

- Caso 1

Para el caso de cilindros con pared delgada sometidos a una presión interna, se producen esfuerzos normales a tracción, que están perpendiculares entre sí, ubicadas transversal y longitudinalmente.

El esfuerzo transversal o principal, es el que tratará de romper el elemento de manera longitudinal. Mientras que el valor del esfuerzo longitudinal será la mitad del transversal, tendiendo a separar el elemento por la mitad de forma anular (Hernández Avendaño, 2008).

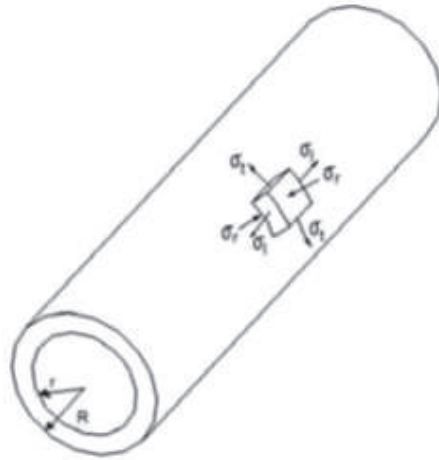


Figura 1.14. Esfuerzos en cilindros.
(Fuente: Hernández Avendaño, 2008)

Con lo expuesto anteriormente, se iguala el valor del esfuerzo transversal con la tensión admisible del material del elemento, teniendo:

$$\sigma_t = \frac{P \cdot d}{2e} \leq \sigma_{adm}$$

Ec. (1.23)

Donde

P : Presión interna de la tubería.

d : Diámetro interno.

e : Espesor de la pared de la tubería.

σ_{adm} : Esfuerzo admisible del material del elemento.

- Caso 2

En cilindros de pared gruesa las tensiones se encuentran de forma tridimensional (esfuerzo transversal, longitudinal y a compresión), y se encuentran simultáneas, asumiendo un cilindro con sus extremos cerrados. El esfuerzo transversal, va estar sometida como se explicó en el caso anterior, obteniendo un máximo valor en el interior de la tubería; el valor del esfuerzo longitudinal es la mitad, distribuido a lo largo de toda la pared. El esfuerzo a compresión en sentido radial, debido a la presión que actúa en la pared con un máximo valor en la parte interna de la pared del cilindro (Hernández Avendaño, 2008).

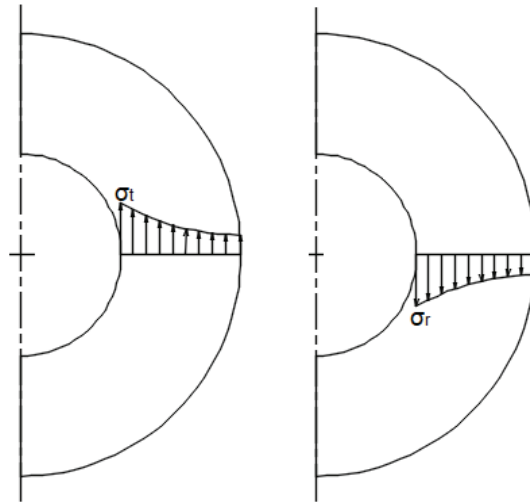


Figura 1.15. Distribución de esfuerzos.
(Fuente: Hernández Avendaño, 2008)

Para el cálculo de las tensiones, se tienen las diferentes expresiones:

Tensión transversal

$$\sigma_t = P \frac{r_2^2 + r_1^2}{r_2^2 - r_1^2}$$

Ec. (1.24)

Tensión radial

$$\sigma_r = -P$$

Ec. (1.25)

Donde

P : Presión interna de la tubería. (Hernández Avendaño, 2008)

r_2 : Radio externo.

r_1 : Radio interno.

Según el material a utilizar para la obtención de la pieza se usa el criterio de falla. Para materiales dúctiles se recomienda la teoría del esfuerzo cortante máximo, con la siguiente expresión:

$$\sigma_{adm} = \sigma_t + \sigma_r$$

Ec. (1.26)

Donde

σ_t : Esfuerzo transversal.

σ_r : Esfuerzo radial.

σ_{adm} : Esfuerzo admisible del material del elemento.

Para el estudio de los esfuerzos de la pieza, nos referimos como valor comparativo al valor obtenido y al valor de la resistencia límite de fluencia del material; cuyo coeficiente de seguridad para elementos cilíndricos es de 1.5 a 3 (Hernández Avendaño, 2008, pág. 26).

1.3. Material de estudio

De acuerdo al libro de Tayler & Hicks (1988), establece que hay cuatro clasificaciones de los materiales para las bombas de potencia. Bombas con complementos de bronce (BF) que están conformadas de una varilla de pistón en bronce, para el caso de líquidos, se tiene un émbolo de hierro, válvulas de bronce o hule, asientos de válvulas de bronce, protectores o resortes de bronce, cilindros de hierro o acero. Bombas con complementos totalmente de bronce (FBF) incorporan una varilla de pistón en bronce, al usar líquido se tiene, pistones de bronce, válvulas de bronce o hule, asientos de válvulas, protectores y resortes de bronce, cilindros de hierro o acero. Bombas resistentes al ácido (AR) todas las partes que están en contacto con el líquido, requieren de materiales con resistencia a la corrosión. Bombas en su totalidad de bronce (AB) las partes en contacto directo con el líquido serán de bronce.

1.3.1. Bronces al aluminio

Son aleaciones cuyos elementos base son el cobre y el aluminio, también aparecen otros aleantes como el Hierro, Manganeso y Niquel. Para aplicaciones mecánicas, las aleaciones con el contenido de aluminio menor al 12 % son las que se utilizan, cuando el aluminio excede este porcentaje, en lugar de mejorar las propiedades mecánicas, produce cristalización, endurecimiento excesivo y fragilización del material y por lo tanto un deterioro de las propiedades. Para el análisis de la aleación se hace uso del diagrama de equilibrio de Cu-Al (Konečná & Fintová, 2014).

A continuación se muestra en la figura 1.16 una parte del sistema Cu-Al, para aleaciones hasta un contenido del 14% de Al.

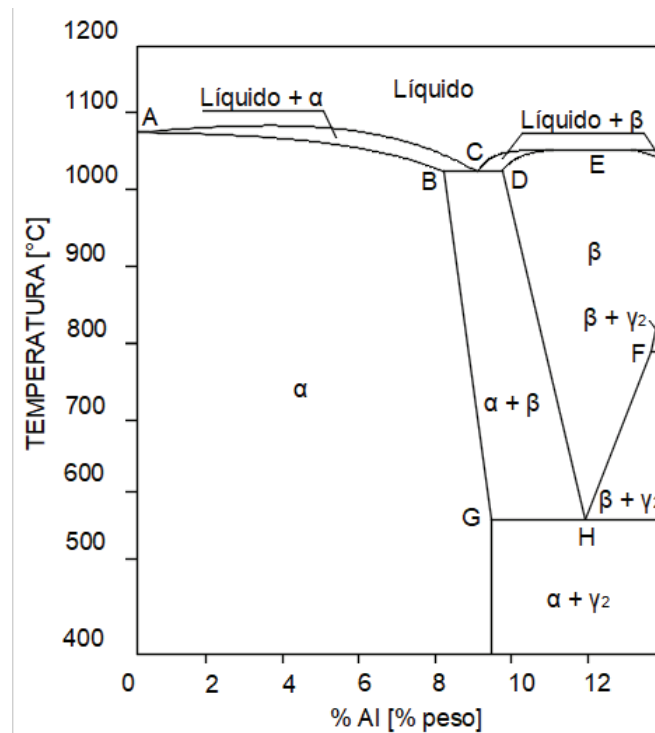


Figura 1.16. Diagrama de equilibrio Cu-Al.
(Fuente: Konečná & Fintová, 2014, pág. 26)

Como se evidencia en el diagrama las aleaciones de bronce al aluminio constan de tres diferentes fases, una denominada la fase α , la fase $\alpha + \beta$ y la fase $\alpha + \gamma_2$, donde cada una de ellas constan de diferentes propiedades. Teniendo una solubilidad máxima del aluminio en la fase α , que esta entre el 9.5% de aluminio a una temperatura de 565 °C [1050 F]. Por otro lado en la fase β , se tiene una reacción eutectoide a los 565 °C así teniendo la mezcla $\alpha + \gamma_2$ (Anup R., 2014, pág. 10).

Los bronce de aluminio en su mayoría contienen del 4 al 11 % de aluminio. Los bronce hasta un 7.5% de aluminio se denominan aleaciones monofásicas, y los bronce entre el 7.5 y 11 % de aluminio son aleaciones bifásicas. A menudo se adicionan otros elementos a estas aleaciones como es el hierro, manganeso, níquel y silicio. El porcentaje de hierro que se añade esta entre el 0.5 y 5 %, para elevar la dureza de la aleación y además sirve para refinar el grano. El níquel hasta el 5 %, cumple con las mismas acciones del hierro pero con una menor eficacia. El porcentaje de silicio es hasta un 2 %, ayudando a una buena maquinabilidad. El manganeso ayuda a mantener una buena solidez de la fundición (Anup R., 2014).

La fase β se mantiene constante a altas temperaturas, dándose un cambio de fase $\alpha + \gamma_2$ a los 565 °C. En condiciones normales las propiedades mecánicas y la dureza son relativamente altas, debido a la gravedad del enfriamiento se genera una estructura martensítica con una menor elongación. Se debe evitar el enfriamiento lento o que exista un recalentamiento entre los 550 °C y 350 °C, para que no se de la transformación de fases de de β a $\alpha + \gamma_2$. La velocidad de enfriamiento de una transformación eutectoide a una martensítica debe ser muy limitada a partir de las temperaturas de las fases β o $\alpha + \beta$ (Anup R., 2014).

Este tipo de aleaciones conformadas con el 5% y 11% de aluminio adquieren una mayor resistencia y dureza en relación a los bronce al estaño. Al aumentar el porcentaje de aluminio disminuye la tenacidad de la aleación. Al estar con el 14% de aluminio, las aleaciones se vuelven frágiles, y esto se da en ocasiones especiales para la obtención de matrices de embutición profunda (Anup R., 2014, pág. 12).

El bronce al aluminio es utilizado para fabricar herrajes de plomería, partes de bombas, válvulas, rodamientos, bujes, y engranes, también por su color y acabado superficial puede ser utilizado para fabricar partes arquitectónicas y El bronce al aluminio es utilizado para fabricar herrajes de plomería, partes de bombas, válvulas, rodamientos, bujes, y engranes, también por su color y acabado superficial puede ser utilizado para fabricar partes arquitectónicas y ornamentales. (ASM International, 1998)

El equipo para el manejo de fluidos más corrosivos, como el petróleo crudo y el agua salada que se encuentran en la industria del campo petrolero, es diferente del de la industria de agua. Los requisitos son resistencia a la corrosión, estanqueidad a la presión y propiedades mecánicas. Los bronce de aluminio son ampliamente utilizados en la industria del campo de petróleo para cumplir con estos requisitos. Especificaciones

similares se aplican a las válvulas utilizadas en las centrales hidroeléctricas. (ASM International, 1998, pág. 1730)

En adelante se muestra la clasificación de los bronce al Aluminio, dados en la Norma ASTM B148 – 14

Tabla 1.3. Clasificación de bronce al Aluminio.

| Clasificación Denominación | Bronce al Aluminio | | | |
|-------------------------------|--------------------|--------------|---------------|---------------|
| | C95200 | C95300 | C95400 | C95410 |
| Aleantes | (%) | | | |
| Cobre | 86.0 min | 86.0 min | 83.0 min | 83.0 min |
| Aluminio | 8.5-9.5 | 9.0- 11.0 | 10.0- 11.5 | 10.0- 11.5 |
| Hierro | 2.5-4.0 | 0.8-1.5 | 3.0-5.0 | 3.0-5.0 |
| Manganeso | ... | ... | 0.5 máx. | 0.5 máx. |
| Níquel | ... | ... | 1.5max | 1.5-2.5 |

Fuente: (ASTM International, 2014)

1.4. Estudio de elementos para fundición

1.4.1. Análisis de hornos

- Calor necesario para la fundición

Se debe hacer que los metales se fusionen, pasando de estado sólido a líquido, esto se lleva a cabo al aplicar la cantidad requerida de calor, de acuerdo al metal o aleación utilizada.

Una vez que se alcanza la temperatura de fusión, se añade más calor para lograr que cambien de estado el metal o aleación. Una vez obtenida una sola masa líquida se sigue aportando calor, para alcanzar la temperatura de colado.

En la tabla 1.4 se presentan algunos de los datos usados para la fundición como son temperatura de fusión, calores específicos medios y el calor latente de fusión (Capelo Edoardo, 1989).

Tabla 1.4. Constantes físicas de metales y aleaciones.

| Metal o aleación | Temperatura de fusión °C | Calor específico del sólido C1 kcal/kg.°C | Calor específico del líquido C3 kcal/kg.°C | Calor latente de fusión C2 kcal/kg |
|-------------------------|---------------------------------|--|---|---|
| Estaño | 232 | 0,056 | 0,061 | 14 |
| Aluminio | 657 | 0,23 | 0,39 | 85 |
| Bronce | 900 - 960 | 0,09 | -- | -- |
| Cobre | 1083 | 0,094 | 0,156 | 43 |

(Fuente: Capelo Edoardo, 1989)

- Principios físicos de los hornos de fundición.

Como objetivo principal es otorgar el calor necesario para fundir el metal o aleación alcanzando la fluidez adecuada con la que va llegar al molde adquiriendo la forma correspondiente. Para el análisis del calor que se requiere, se toma en consideración los principios termodinámicos y de transferencia de calor.

Mediante el estudio de los principios termodinámicos, se determina el calor necesario al que llega el metal después del proceso de fundición y como va actuando durante el transcurso del proceso.

Mientras tanto que con la transferencia de calor se puede conocer la cantidad de energía y el tiempo que actúa sobre el metal para llegar a la fusión.

El calor necesario a emplearse se aplica directamente a la masa del metal a fundir, por lo que se debe conocer la masa respectiva de cada pieza a construir.

A la masa de cada una de las piezas se debe sumar la masa encontrada para los sistemas de alimentación respectivamente. Para el cálculo de la masa partimos de los volúmenes obtenidos con la ayuda de los programas CAD, usados para la creación de los modelos, y densidad del material cuyo valor es $\rho = 8,89 \text{ g/cm}^3$.

Con las constantes físicas como el punto de fusión y calores específico y latente de los diferentes metales expuestos anteriormente en la tabla 1.4, podemos realizar los cálculos correspondientes para determinar el calor necesario que se va utilizar en el proceso de fundición hasta llegar al punto de fusión de los metales. El calor específico es la cantidad de energía que se requiere para elevar un grado la temperatura por unidad de masa (Cengel Yunus & Boles Michael, 2009).

Obteniendo el calor de calentamiento con la siguiente expresión:

$$Q_1 = m c_1 \Delta T \quad ; \quad \Delta T = T_1 - T$$

Ec. (1.27)

Donde:

Q_1 : Calor de calentamiento al punto de fusión

m : Masa del elemento

c_1 : Calor específico en estado sólido

T_1 : Temperatura de fusión

T : Temperatura ambiente

El aplicar cierta cantidad de calor a un material va producir que éste cambie de fase, dándose dicho fenómeno por el calor de fusión o energía absorbida que se da durante la fusión del material. Conocido el calor latente como la cantidad de energía que absorbe o libera un material para lograr el cambio de fase (Cengel Yunus & Boles Michael, 2009).

Se tiene la siguiente expresión para determinar el calor de fusión.

$$Q_2 = m c_2$$

Ec. (1.28)

Donde:

Q_2 : Calor latente de fusión

m : Masa del elemento

c_2 : Calor latente de fusión

También se considera el cálculo del calor de recalentamiento que se obtiene haciendo recalentar el material hasta cierta temperatura inferior a la de fusión, en este caso se da un aumento de la temperatura del metal. A continuación se presenta la expresión del cálculo del calor de recalentamiento.

$$Q_3 = m c_3 \Delta T \quad ; \quad \Delta T = T_2 - T_1$$

Ec. (1.29)

Donde:

Q_3 : Calor de recalentamiento

m : Masa del elemento

c_3 : Calor específico en estado líquido

T_2 : Temperatura de recalentamiento

Tomando en cuenta las constantes físicas de los materiales presentes en la aleación del bronce al aluminio, y sabiendo que la base del material es el cobre se procede a seleccionar los valores señalados en la tabla 1.4, debido a que el cobre presenta un valor mayor en cuanto al punto de fusión, en comparación con los demás materiales que conforman la aleación.

Para este caso, se hace referencia al punto de fusión ya que el material va estar sometido directamente con el calor, produciéndose el incremento de la temperatura para conseguir el cambio de estado y así fusionar el metal.

- Cálculo del calor total necesario utilizado en la fundición para el pistón y cámara de presión.

Tomando en consideración las temperaturas tanto inicial (temperatura ambiente), de fusión y de recalentamiento, cantidad de material a utilizar y los calores específico y latente del material, con lo que se tiene:

Temperatura inicial: $t = 20\text{ }^\circ\text{C}$

Temperatura de fusión: $t_1 = 925\text{ }^\circ\text{C}$

Temperatura de recalentamiento: $t_2 = 1200\text{ }^\circ\text{C}$

Cantidad de material: $m = 30,4\text{ kg}$

Los calores específico y latente se obtienen de la tabla 2-2.

Por lo tanto el calor total empleado para la fundición es igual a la suma de los calores mencionados anteriormente, teniendo la siguiente expresión:

$$Q_T = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

Ec. (1.30)

- Rendimiento para el horno

Con el calor necesario y el calor total empleado se determina el rendimiento del horno.

$$\eta = \frac{Q}{Q_t}$$

Ec. (1.31)

Donde:

Q : Calor necesario

Q_t : Calor total

η : Eficiencia del horno

1.5. Selección de la mezcla de moldeo

En la industria de la fundición se emplean materiales de vital importancia unos llamados primarios en los que se encuentran las arenas sílices y las arcillas de tipo bentoníticas, entre los materiales secundarios tenemos el hollín, aceites, resinas, melaza y demás aditivos los cuales ayudan a la obtención de las propiedades tecnológicas en cuanto a la mezcla para el molde.

Para la mezcla de moldeo se utilizan materiales con base refractaria (arena cuarzosa) y aglutinantes arcillosos como la bentonita. Para la obtención de moldes con buena calidad, se toma en cuenta las propiedades tecnológicas que deben cumplir en el moldeo.

Al preparar la mezcla de moldeo se debe tener en cuenta las exigencias presentes en el proceso tecnológico como son permeabilidad, resistencia verde y en seco, plasticidad entre otros, estos como los más importantes y relevantes para tomar en consideración (Goyos & Martínez, 1978).

Al referirnos a la compactación de la mezcla de moldeo, en el libro (Titov & Stepánov, 1981) se describe que la plasticidad es la característica cuya función es soportar la aplicación de esfuerzos exteriores, esto ayuda a mantener la huella que se forma en la mezcla. La plasticidad depende de las propiedades de los componentes de la arena y aglutinantes utilizados.

La resistencia a soportar el molde, debe ser capaz de resistir al daño que puede darse en el molde al estar sometido a la acción de cargas; la resistencia que presenta la mezcla de moldeo está en función de la granulosis de la arena base, humedad, densidad

dependiendo de la cantidad de arcilla y aglutinante (bentonita) en la mezcla; con el aumento de la densidad los granos de la arena base disminuyen, y al aumentar el porcentaje de arcilla su resistencia también aumenta.

Como consideraciones relevantes a tomar en cuenta es la friabilidad presente en la mezcla de moldeo, ya que presentara obstrucciones en las tolvas, al llenarse y una distribución uniforme al verter en los moldes. “El aumento de la densidad inicial (de llenado) de la mezcla eleva la uniformidad de compactación del molde, por consiguiente, la mezcla debe tener una buena friabilidad y la mínima capacidad de formar terrones” (Titov & Stepánov, 1981, pág. 49).

Los porcentajes de la composición de la mezcla del molde se tienen a continuación en la tabla 1.5 (Calderón F. Edison, 2012, pág. 56).

Tabla 1.5. Composición en porcentajes de la mezcla de moldeo.

| Componentes | Porcentaje % |
|-------------------------|--------------|
| Arena base (nueva) | 20 |
| Arena reciclada (usada) | 65 |
| Bentonita (aglomerante) | 7 |
| Agua (aglutinante) | 5 |
| Carbonáceos (aditivo) | 3 |

(Fuente: Calderón F. Edison, 2012)

1.5.1. Clasificación de arenas para moldes

La arena sílice utilizada para la fundición se originan de una roca llamada roca madre, de donde provienen el granito (feldespato, cuarzo y mica), como sustancia aglutinante el feldespato (silicato doble de aluminio y potasio o sodio) actúa sobre la mica y el cuarzo, y por efecto de agentes atmosféricos éste tiende a descomponerse.

Hay que tener en cuenta que la arena base a ser empleada no siempre deben usarse tal como llegan de los depósitos, ya que no se conoce las características técnicas de la base refractaria por lo que se realiza un estudio previo a ser utilizadas (Capelo Edoardo, 1989).

Como principal componente se tiene el cuarzo (sílice), cuya densidad está entre 2,5 a 2,8 g/cm^3 y temperatura de fusión 1713 °C (Titov & Stepánov, 1981).

Las arenas se clasifican en tres grandes grupos como son el contenido de arcilla, forma del grano y dimensión del grano (Capelo Edoardo, 1989, pág. 37).

En esta primera clasificación de las arenas encontramos cuatro clases de arenas que dependen del contenido de arcilla, como se puede observar en la tabla 1.6.

Tabla 1.6. Contenido de arcilla en las arenas de fundición.

| Clase de arena | Contenido de arcilla % |
|-------------------|------------------------|
| Arenas grasas | > 18 |
| Arenas semigrasas | 8 - 18 |
| Arenas magras | 5 - 8 |
| Arenas silíceas | < 5 |

(Fuente: Capelo Edoardo, 1989)

Como segunda clasificación están las que dependen de su forma de grano, tal como se evidencia en la figura 1.17.



Figura 1.17. Formas de granos de la arena base: grano esferoidal, angulado y compuesto.

(Fuente: Capelo Edoardo, 1989, pág. 37)

Y la última clasificación encontramos a los granos de acuerdo a las dimensiones que éstos presentan en base al método A.F.S. (Sociedad Americana de Fundición) se tiene los diferentes tamaños de arena: (Calderón F. Edison, 2012)

Tabla 1.7. Tamaño de grano.

| Arena base | Índice A.F.S. | Tamaño de grano (mm) |
|--------------|---------------|----------------------|
| Grano grueso | 18 – 35 | 0,5 – 1 |
| Grano medio | 35 – 60 | 0,25 – 0,5 |
| Grano fino | 60 – 150 | 0,10 – 0,25 |

(Fuente: Calderón F. Edison, 2012)

1.5.2. Acabado y control de propiedades de la mezcla

Al obtener la mezcla del molde, se realiza un control de las propiedades de los materiales y composiciones adicionales presentes en el molde. Se tienen dos tipos de control el acelerado y el completo. Con el control acelerado se determina humedad, resistencia a la compresión y penetrabilidad al gas. Por otro lado el control completo está determinado por las instrucciones tecnológicas establecidas en la empresa.

Para nuestro caso se va desarrollar el método de control acelerado, y para llevarlo a cabo, se tienen que realizar diferentes métodos de ensayos, que se los describe a continuación:

- Análisis del contenido de arcilla en la base refractaria.

El método utilizado para conocer la concentración de arcilla en base refractaria es mediante levigación (Titov & Stepánov, 1981). El procedimiento a seguir es el siguiente: Pesar una muestra de 50 gramos de arena gruesa de sílice, una vez en el recipiente normalizado se agrega 450 cm³ de agua destilada y 25 cm³ de solución de sosa caustica (hidróxido de sodio), se agita por 5 minutos con un agitador, se agrega agua a un nivel de 150 mm y se espera por 10 minutos para que la arena base se sedimente. Una vez hecha la sedimentación, se tendrá una capa de agua de 125 mm la cual se evacúa por medio de un sifón. En el recipiente vamos a presenciar parte del agua que queda después de evacuar la misma con el sifón, una vez hecho esto, se añade nuevamente agua obteniendo el mismo nivel anterior. Éste proceso se realiza por 4 ocasiones más como mínimo, y así evidenciar la transformación que se va dando en el agua, volviéndose más clara y transparente. Por último se saca la arena base del recipiente y se deja secar, para después pesarla, obteniendo una disminución en la masa de la base refractaria.

- Análisis granulométrico de la base refractaria.

Para identificar la composición de los granos en la arena base, se realiza mediante el método internacional A.F.S. (Sociedad Americana de Fundición), y así obtener el tamaño del grano respecto al índice de finura de la A.F.S.

Se procede a pesar 50 gramos de base refractaria, ya con el peso destinado a trabajar, éste se coloca en un juego de 10 tamices con su respectiva numeración del más grueso al más fino y en la parte inferior se tiene un recolector donde cae la arena base más fina. A continuación se detalla en la tabla 1.8 los factores de valorización para cada tamiz.

Tabla 1.8. Factores de valorización de tamices.

| Número de tamiz | Apertura de malla (mm) | Factor α |
|-----------------|------------------------|-----------------|
| 6 | 3.36 | 3 |
| 12 | 1.68 | 5 |
| 20 | 0.84 | 10 |
| 30 | 0.59 | 20 |
| 40 | 0.42 | 30 |
| 50 | 0.29 | 40 |
| 70 | 0.21 | 50 |
| 100 | 0.149 | 70 |
| 140 | 0.105 | 100 |
| 200 | 0.074 | 140 |
| 270 | 0.053 | 200 |
| Recolector | -- | 300 |

(Fuente: Folleto de fundición EPN)

Para el cálculo del índice de finura se tiene la siguiente fórmula.

$$\text{Índice de Finura (i)} = \frac{\sum(\alpha * \%)}{\sum \%}$$

Ec. (1.32)

- Estudio de la permeabilidad en la mezcla de moldeo

Es una de las propiedades de la arena base en la cual se determina el paso de los gases para evacuarlos del molde, esto ocurre en el momento del colado del metal. Al presentar una difícil o escasa salida de gases, el metal líquido empieza a burbujear provocando en la pieza la aparición de sopladuras.

La permeabilidad depende de la forma, tamaño y distribución de los granos de la arena base. Mientras más gruesos son los granos se tiene una mayor permeabilidad. Al tener una distribución uniforme de los granos se tendrá una base refractaria con más permeabilidad en comparación con otra con un índice de grosor igual, pero sin contar con la uniformidad de los granos.

La forma de los granos influye mucho en la permeabilidad de la arena base; una base refractaria con granos angulosos tiene más permeabilidad que una base refractaria con

granos redondos, esto se da ya que existe una mayor compresión unos a otros con menor apretamiento.

La humedad hace que aumente la permeabilidad de la arena base entre 4 a 6 %, tendiendo a disminuir.

1.5.3. Aglomerantes y aglutinantes.

Existen diferentes tipos de aglutinantes que se usan en la preparación de la base refractaria para moldeo:

Tabla 1.9. Tipos de aglutinantes.

| Aglutinantes inorgánicos de tipo arcilloso | Arcillas, Bentonitas |
|---|---|
| Aglutinantes inorgánicos cementosos | Cemento, Silicatos |
| Aglutinantes orgánicos | Cereales, Lignina, Melaza, Alquitrán, Resina, Aceites |

(Fuente: Capelo Edoardo, 1989)

Las propiedades de los aglutinantes inorgánicos arcillosos dependen del tamaño y forma de la corteza cristalina que se forma, mientras más pequeñas son éstas, mayor va ser el poder aglutinante. Por otro lado el contenido de agua tiene mucha influencia con la plasticidad (Capelo Edoardo, 1989).

Como aglutinantes cementosos se hace referencia al cemento portland, que se usa en un porcentaje de 8 a 10 en una mezcla con contenido de agua del 8 %, obteniéndose un endurecimiento a temperaturas ambiente debido a la acción de fragua del cemento (Capelo Edoardo, 1989).

Una gran parte de los aglutinantes orgánicos elevan el efecto de cohesión en la arena verde por lo que se queman a temperaturas bajas.

1.5.4. Moldeo de fundición

Hay tres tipos de moldeo: a mano, máquina y automático. El moldeo a mano se efectúa para la elaboración de molduras ya sea por unidades o un conjunto de estas. El moldeo a máquina se lleva a cabo cuando se tiene una producción en serie de las molduras; y por ultimo tenemos el moldeo automático empleado en la producción a gran escala.

Para la producción de las piezas, el moldeo será a mano. Se utilizan diferentes herramientas para la elaboración de moldes a mano, unas usadas para el mezclado y llenado de las cajas de moldeo y por otro lado las que son usadas para la extracción de los modelos y acabado de los mismos, entre estas tenemos:

Palas, agujas para ventilación, elevadores (rosca, tornillo, gancho), cribas, pinceles, martillos, pisones, cepillos, alisadores y cucharas.

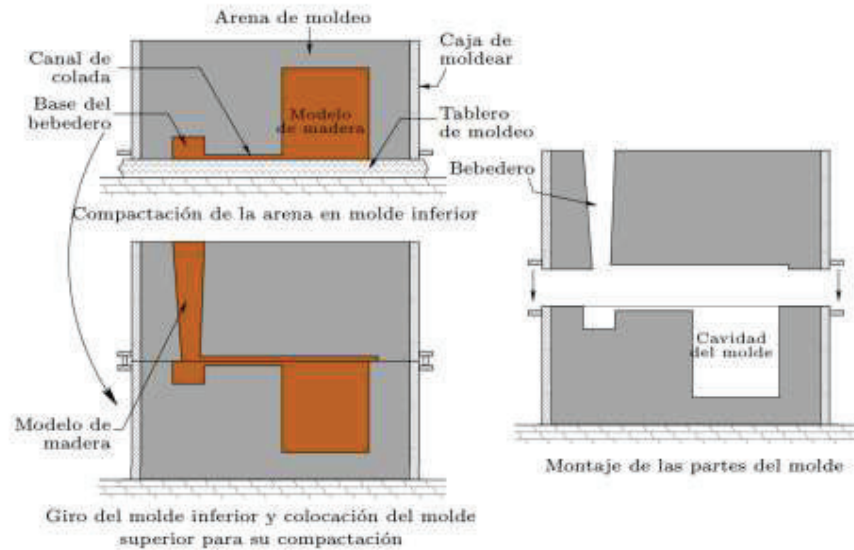


Figura 1.18. Representación del proceso de moldeo en arena.
(Fuente: López Rodríguez, 2011, pág. 61)

1.5.5. Cajas de moldeado

Se denominan cajas de moldeo, a aquellas cajas cuyos marcos pueden ser de elaboradas con marcos rígidos y así evitar que se destruyan los moldes de arena.

Hay que tomar en cuenta la distancia a dejar entre el modelo y la pared de la caja del molde, que es de 25 a 50 [mm].

La arena es de material refractario la cual contiene arcilla y al mezclarse con agua es usada para el moldeo. Este tipo de arena refractaria está compuesta en su totalidad de sílice (SiO_2). Comúnmente la arena de sílice (arena base) es utilizada por su bajo costo. Requiere de elementos adicionales para obtener una mezcla adecuada en la fundición. (ASM International, 1998)

Al calentarse, la arena refractaria presenta una serie de cambios cristalográficos. Primero a temperaturas iguales a 573 ° C la arena base tiende a expandirse, causando

derretimiento del molde. Con temperaturas mayores a los 870 ° C la arena basa se contrae debido al calentamiento que presenta. (ASM International, 1998)

La bentonita es un tipo de arcilla con forma de silicato de aluminio hidratado. “Se compone de tetraedros alternados de átomos de silicio rodeados de átomos de oxígeno y átomos de aluminio rodeados de átomos de oxígeno” (ASM International, 1998, pág. 456).

La estructura que se forma es por capas, donde las placas planas son de elementos de arcilla.

1.5.6. Mezcla de arenas para noyos

Los machos están expuestos a acciones térmicas y mecánicas considerables en el proceso de vertido del material, superiores a los que se tienen en el molde, esto se genera porque la masa fundida va estar rodeando por completo al macho (Titov & Stepánov, 1981).

Debido a las acciones que deben soportar los machos, éstos necesitan tener mayor resistencia en estado seco y dureza superficial. Entre las propiedades adquiridas en la mezcla se obtienen un poder refractario alto, gran compresibilidad, alta penetrabilidad y por ultimo debe ser de fácil expulsión.

Para la fabricación de machos (noyos) existen varios métodos de obtención, dependiendo de: la ejecución (mano, máquina), temperatura de fabricación, precisión de las piezas, la arena y los aglomerantes utilizados. Los procesos de fabricación de machos más utilizados por las industrias son: aceite, silicato y resinas. El estudio se centrará en la fabricación de noyos mediante la adición de resinas.

El empleo de resinas ha facilitado la obtención de machos de alta resistencia térmica, buena dureza superficial y fácil desprendimiento, además de permitir una producción a gran escala, donde la forma y el tamaño no implican una dificultad.

Según la necesidad, la caja de los noyos puede ser en caliente o en frío.

Los noyos en caja caliente presentan una serie de ventajas en cuanto al endurecimiento y el uso, son adecuados para una producción en serie, poseen buen acabado superficial y una mayor exactitud dimensional. Se emplean habitualmente para la elaboración de piezas pequeñas, pueden ser utilizados en materiales ferrosos y no ferrosos.

Para los noyos en frío o comúnmente llamados de auto-fraguado, la caja del noyo permanece a la temperatura ambiente. Este tipo de fabricación de noyos facilita la

elaboración de machos de gran tamaño y la producción de cantidades elevadas de noyos pequeños.

La diferencia entre el proceso de obtención de noyos en caliente y en frío es que para el primer caso se hace uso de calor para la elaboración del noyo, mientras que en el segundo, el endurecimiento es posible gracias a la utilización de un catalizador.

Las resinas empleadas para la fabricación de noyos en su mayoría son de base fenol-formol, urea-fenol-formol y urea-formol, por otro lado pueden ser polímeros de alcohol furfurool, comercialmente se las denomina resinas de base fenólica y furánicas (Anchaluisa & Serrano, 2012).

1.6. Parámetros para la construcción de modelos

1.6.1. Espesores mínimos de las piezas

Para saber si una pieza se puede obtener por el método de fundición, partimos determinando los espesores mínimos para con ello establecer el método adecuado de fundición. En la obtención del espesor de las paredes de la pieza se toma en cuenta tipo de aleación, propiedades, configuración, dimensiones máximas y método de fundición.

Una de las consideraciones a tomar en cuenta acerca del espesor excesivo, es que provoca un incremento del peso de la pieza, generándose porosidades por contracción en la pieza.

Los espesores mínimos de las paredes deben garantizar la resistencia nominal que se requiere y satisfacer los requerimientos en lo que compete a la tecnología de fundición. Para el caso de piezas elaboradas en moldes de arena se hace uso de diferentes tablas y gráficos para especificar los espesores mínimos. En el uso de los gráficos se consideran el tipo de aleación y la dimensión equivalente N , proveniente de la siguiente expresión:

$$N = \frac{2(l) + b + h}{3} [m] \quad (\text{pieza hueca})$$

Ec. (1.33)

$$N = \frac{2(l) + b + h}{4} [m] \quad (\text{pieza maciza})$$

Ec. (1.34)

Donde:

l : Longitud.

b : Ancho.

h : Altura.

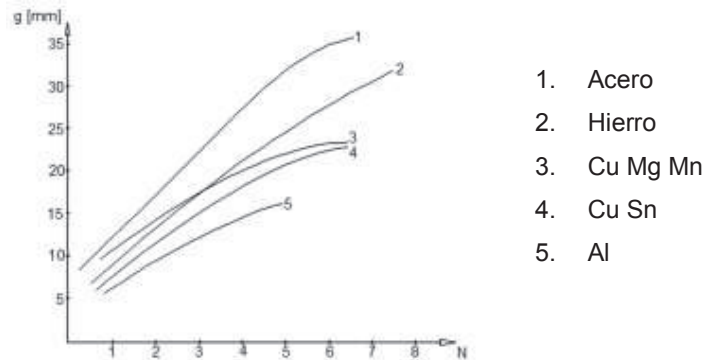


Figura 1.19. Espesores mínimos de las piezas.
(Fuente: Goyos & Martínez, 1978)

Para piezas de aleaciones con base en cobre con dimensión equivalente $N < 0,1$ m, el espesor de las paredes no puede ser menor de:

Aleaciones de cobre sin estaño: 4,0 mm

Aleaciones de cobre con estaño: 2,5 mm

Es recomendable mantener una equidad entre los espesores para contrarrestar las tensiones, esto se aplica a piezas fundidas en cualquier aleación.

1.6.2. Superficie externa de la pieza

La pieza debe presentar la mayor cantidad de superficies planas con partes rectas conectadas por curvas, esto suaviza el cambio de secciones en la pieza (Goyos & Martínez, 1978).

Tabla 1.10. Radios de acorde de las piezas.

| Dimensiones máximas de la pieza (mm) | Radios mínimos (mm) | |
|--------------------------------------|---------------------|------------------|
| | Radio interno Ri | Radio externo Re |
| < 250 | 3 | 2 |
| 250 - 500 | 5 | 3 |
| 500 - 750 | 6 | 3 |
| 750 - 1000 | 8 | 5 |
| 1000 - 1500 | 10 | 5 |
| > 1500 | 12 | 6 |

(Fuente: Goyos & Martínez, 1978)

Como se muestra en la tabla 1.10 existen radios de acorde que se establecen de acuerdo a la dimensión máxima de la pieza, teniendo radios de 2 mm para las partes externas y de 3 mm en las zonas internas de la pieza.

1.6.3. Sobre-medida de maquinado

Las dimensiones del sobre espesor para el maquinado de la pieza dependen del tipo de material, dándose principalmente sobre espesores mayores en la parte superior que en la parte inferior y lateral del modelo, esto se debe a la presencia de inclusiones de escoria y sopladuras por gas. (Titov & Stepánov, 1981)

1.6.4. Dimensiones de orificios fundidos

Los orificios de dimensiones pequeñas generalmente no se las realiza en piezas fundidas, esto se debe a la complejidad que se tiene en la eliminación de la mezcla de moldeo en estas zonas, por lo que se recomienda limitar las dimensiones mínimas de los orificios que se los va a fundir.

Para piezas de fundición de aleaciones con base de cobre, donde se tienen agujeros no es necesario desarrollarlos en los modelos si estos se verifican en la siguiente expresión:

$$d \leq 0,3 \cdot h + 10$$

Ec. (1.35)

Donde:

d : Diámetro del agujero (mm).

h : Profundidad del agujero (mm).

1.6.5. Contracción de fundición

Se habla de una contracción al fenómeno que ocurre cuando el metal líquido dentro del molde empieza a enfriarse para solidificarse. Este fenómeno depende de la temperatura, tanto del metal como del entorno. A mayor temperatura los cuerpos se dilatan y si disminuye los cuerpos se contraen. Esto es lo que ocurre en el metal al adquirir la forma del molde, presentará dimensiones menores en comparación a las dimensiones iniciales. (Capelo Edoardo, 1989)

Tomando en cuenta estos parámetros, el molde será construido de acuerdo al grado de contracción del metal empleado para la colada. Los valores expuestos en la tabla 1.11 son resultados de experimentos prácticos realizados para los diferentes materiales. (Capelo Edoardo, 1989, pág. 14)

Tabla 1.11. Contracción lineal media para aleaciones en base de bronce.

| Aleación | Dimensiones del modelo (Piezas macizas) | Piezas con machos | Contracción en mm/m |
|------------------------------------|---|-------------------|---------------------|
| Bronce mecánico con 10 % de estaño | -- | -- | 14 |
| Aluminio y sus aleaciones | Piezas pequeña | Pequeñas | 13 - 15 |
| | Piezas medianas | Medianas | 12 - 13 |
| | Piezas grandes | Grandes | 11 - 12 |

(Fuente: Capelo Edoardo, 1989)

1.6.6. Ángulos de desmoldeo

Se añade a aquellas superficies del modelo que se encuentren perpendiculares al plano divisor (m) de dicho molde con el fin de facilitar la extracción del modelo después del moldeado, como se observa en la figura 1.20.

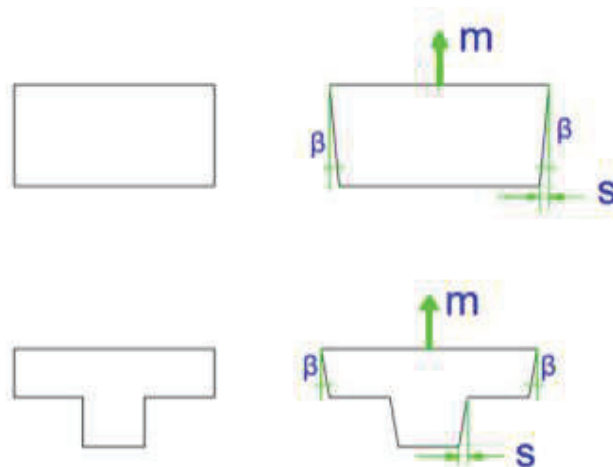


Figura 1.20. Ángulos de salida para modelos de fundición.
(Fuente: Propia)

Según la norma NC-1008, la magnitud de las diferentes inclinaciones de moldeo requeridas en los modelos de fundición se detalla a continuación (Capelo Edoardo, 1989, pág. 11)

Tabla 1.12. Ángulos de salida de acuerdo a la altura.

| Altura del modelo mm | Salida | | |
|----------------------|--------|--------------|--------------------------|
| | s | | Ángulo β de salida |
| | mm | % | |
| hasta 40 | 0,5 | 1,25 | 1'30" |
| 40 - 59 | 0,75 | 1,8 - 1,2 | 1' |
| 60 - 119 | 1 | 1,7 - 0,8 | 40" |
| 120 - 159 | 1,5 | 1,25 - 0,9 | 40" |
| 160 - 199 | 1,75 | 1,1 - 0,9 | 40" |
| 200 - 249 | 2 | 1 - 0,8 | 30" |
| 250 - 299 | 2,5 | 1 - 0,8 | 30" |
| 300 - 399 | 3 | 1 - 0,75 | 30" |
| 400 - 499 | 3,5 | 0,9 - 0,8 | 30" |
| más de 500 | 4 | menos de 0,8 | 30" |

(Fuente: Capelo Edoardo, 1989)

1.6.7. Sistema de alimentación para moldes de fundición

El sistema de alimentación tiene una gran importancia para obtener una fundición de calidad. El sistema debe garantizar un suministro suave y constante del metal fundido hacia

la cavidad moldeada en la arena. La eliminación de rechupes, contradicciones y porosidad depende del diseño correcto de los sistemas de alimentación.

Un sistema de alimentación bien diseñado y ubicado ofrece un buen llenado del molde, alimentación continua en el proceso de solidificación, ayuda a obtener las dimensiones exactas, previene el apareamiento de defectos superficiales (atascamientos, quedades, inclusiones de escoria y otros). En el diseño de la alimentación se debe buscar una solidificación dirigida para evitar cambios bruscos de temperatura entre las distintas secciones de la pieza y lograr que la última parte en enfriarse sean los canales de alimentación. Además que el gasto en el sistema de alimentación sea mínimo.

- Partes del sistema de Alimentación:

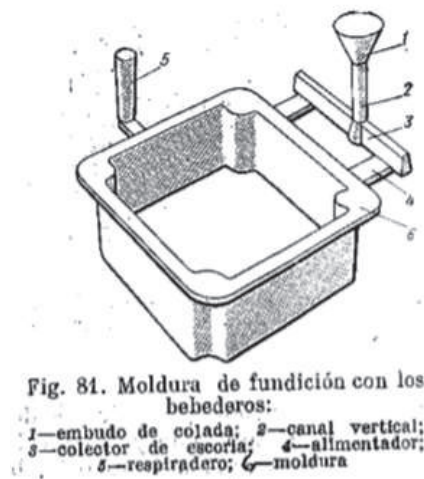


Figura 1.21. Partes del sistema de alimentación.
(Fuente: Titov & Stepánov, 1981)

Embudo: Está presente en la parte superior del sistema de alimentación, su función es recibir el chorro de metal fundido. Titov & Stepánov (1981) Generalmente tiene una forma cónica, y su función principal es reducir la turbulencia del metal líquido al inicio de la colada. Sin embargo este diseño presenta una desventaja, que es no poder controlar la velocidad del flujo al ser difícil mantener un nivel constante de llenado.

Canal Vertical: Es la cavidad por donde se desplaza el metal fundido desde el embudo hasta los otros elementos del sistema de alimentación. La altura de este canal debe garantizar que exista la suficiente presión para lograr el llenado tanto las mazarotas, como el canal horizontal y la pieza.

Pozo de colada: Es la parte de unión entre el fondo del canal vertical y los ataques o alimentadores (canal horizontal). Ayuda a tener una transición suave del flujo de metal fundido. Recibe el metal líquido con mayor velocidad que baja desde el bebedero y lo re direcciona horizontalmente, también ayuda a que en el fondo del pozo se deposite la arena que se arrastra producto de la caída del metal por el canal vertical y evita que las burbujas de gas lleguen a la pieza.

Canal horizontal o alimentador: Es el canal conectado directamente con el molde. Es el suministro último del metal fundido hacia la pieza. Cumple con las siguientes características, su ubicación no debe alterar la geometría de la pieza, es decir no pueden situarse en lugares donde el maquinado sea imposible, su configuración se diseña de tal manera que el metal líquido llegue suavemente a la pieza y se enfríe poco en el trayecto. Luego de la solidificación deben quebrarse fácilmente. (Titov & Stepánov, 1981)

Ley de Dubinski y Sobeleb

$$\sum Fa : Fes : Ft = 3 : 1,2 : (1,2 - 2)$$

Ec. (1.36)

Donde

F_a : Área de la sección transversal del alimentador

F_{es} : Área de la sección transversal del escoriador

F_t : Área de la sección transversal del tragadero

$$\sum Fa = \frac{G}{\mu T_v \delta \sqrt{2Hm g}}$$

Ec. (1.37)

Donde

G : Masa de la Pieza (kg)

μ : Coeficiente que abarca la resistencia del S.A al paso del metal (0,3)

δ : Peso específico del metal líquido (0,0089 Kg/cm³)

Hm : Altura nominal

T_v : Tiempo de vertido

g : Gravedad (98 cm/s²)

$$\rho \sqrt{2g} = 0,31$$

$$\sum Area_{min} = \frac{G}{\mu T_v 0,31\sqrt{Hm}}$$

Ec. (1.38)

Altura nominal:

$$Hm = Ho - \frac{p^2}{2c}$$

Ec. (1.39)

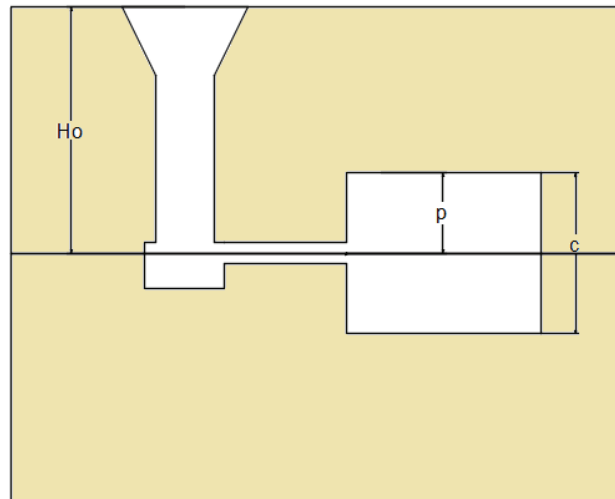


Figura 1.22. Partes del sistema de alimentación.
(Fuente: Titov & Stepánov, 1981)

Donde

Ho: Altura de la caja

P: Mitad de la altura de la pieza

c: Altura de la pieza

Tiempo de vertido

$$T_v = S \sqrt[3]{(\varepsilon \cdot G)}$$

Ec. (1.40)

Donde

ε : Espesor predominante de la pared de la pieza (mm)

S: Coeficiente que depende del espesor y configuración de la pieza

G: Masa en gramos

$$T = K_t * \sigma^n * G^m$$

Ec. (1.41)

Donde

K_t : Coeficiente de corrección (0.47)

σ : Espesor nominal

G : Masa en gramos

n : Exponente de corrección (0.2)

m : Exponente de corrección (0.5)

$$\sigma = \frac{\varepsilon}{1 + \frac{w}{\varepsilon} + \frac{L}{\varepsilon}}$$

Ec. (1.42)

Velocidad del vertido

$$V = \frac{c}{T_v}$$

Ec. (1.43)

$$\sum Fa : Fes : Ft = 3 : 1,2 : (1,2 - 2)$$

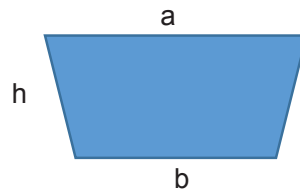
Dimensiones del bebedero o tragadero

$$Area = 1.6 * Fa$$

$$\varnothing = \sqrt{\frac{4 * Area}{\pi}}$$

Dimensiones de los alimentadores

$$Aa = 3 * Fa$$

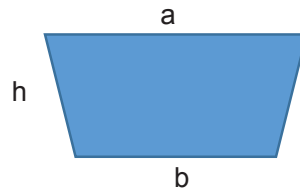


Longitud del alimentador

Se obtiene de acuerdo a las áreas de los alimentadores encontradas. (Navas, Batista, & Suchkov, 1990, pág. 36)

Dimensión de los escoriadores

$$A_{es} = 1.2 * Fa$$



Mazarotas: Las mazarotas son cavidades que forman parte de la pieza junto al sistema de alimentación, con el fin de compensar con material a la zona de rechupe por la contracción del metal, al pasar de estado líquido a sólido. Los rechupes se originan en las partes donde el tiempo de solidificación es mayor.

Se deben ubicar las mazarotas en las zonas con mayor concentración de masa, para evitar la formación de rechupes en la pieza. Obteniéndose así, la solidificación de la pieza y luego de la mazarota.

Para el cálculo de las mazarotas se hace uso de la regla de Chvorinov:

$$T_{st\ Aportador} = 1,2 T_{st\ Pieza}$$

Ec. (1.44)

Donde:

$T_{st\ Aportador}$: Tiempo de solidificación del aportador.

$T_{st\ Pieza}$: Tiempo de solidificación de la pieza.

$$T_{stAportador} = C_m \left(\frac{V_{Aportador}}{A_{Aportador}} \right)^2$$

Ec. (1.45)

Donde:

C_m : Constante del molde.

$V_{Aportador}$: Volumen del aportador.

$A_{Aportador}$: Área del aportador.

$$T_{st\ Pieza} = C_m \left(\frac{V_{Pieza}}{A_{Pieza}} \right)^2$$

Ec. (1.46)

Donde:

C_m : Constante del molde.

V_{Pieza} : Volumen de la pieza.

A_{Pieza} : Área de la pieza.

Para un aportador cilíndrico tenemos:

$$A_{Aportador} = \frac{\pi}{4} D^2 + \pi D H + \pi D^2$$

$$A_{Aportador} = D^2 \left(\frac{\pi}{4} + \pi \frac{H}{D} + \pi \right)$$

Ec. (1.47)

$$V_{Aportador} = \frac{\pi}{4} D^2 H + \frac{\pi D^3}{12}$$

$$V_{Aportador} = D^3 \left(\frac{\pi H}{4 D} + \frac{\pi}{12} \right)$$

Ec. (1.48)

Donde:

H : Altura del aportador.

D : Diámetro del aportador.

Relación altura diámetro.

$$r = \frac{H}{D} = 1.5$$

Ec. (1.49)

Reemplazar la ecuación (1.49) en las ecuaciones (1.47) y (1.48), luego las ecuaciones (1.47) y (1.48) se reemplaza en (1.46) y finalmente las ecuaciones (1.45) y (1.46) en (1.44).
Despejar D

Nota: V_{pieza} , A_{pieza} y r son dato.

$$(1.45) = (1.46)$$

$$C_m \left(\frac{V_{Aportador}}{A_{Aportador}} \right)^2 = C_m \left(\frac{V_{Pieza}}{A_{Pieza}} \right)^2$$

2. METODOLOGÍA

El estudio ha seguido un orden que contempla tanto la teoría como la práctica el proceso para la obtención de piezas fundidas. En cada una de las etapas se aplicó de forma general una metodología investigativa basada en la bibliografía y en la experiencia. Para la solución de problemas se parte del fundamento teórico: conceptos y fórmulas, que aplicadas al caso de estudio específico se convierten en hipótesis que se comprueban o refutan en la práctica.

El proceso de fundición consta de varios pasos, que tienen que llevarse de una forma ordenada y sucesiva, a esta serie de operaciones se las denomina Diagrama de trabajo.

A continuación se detalla el diagrama de trabajo, empleado para la fabricación y obtención del pistón y cámara de presión por medio de la fundición.

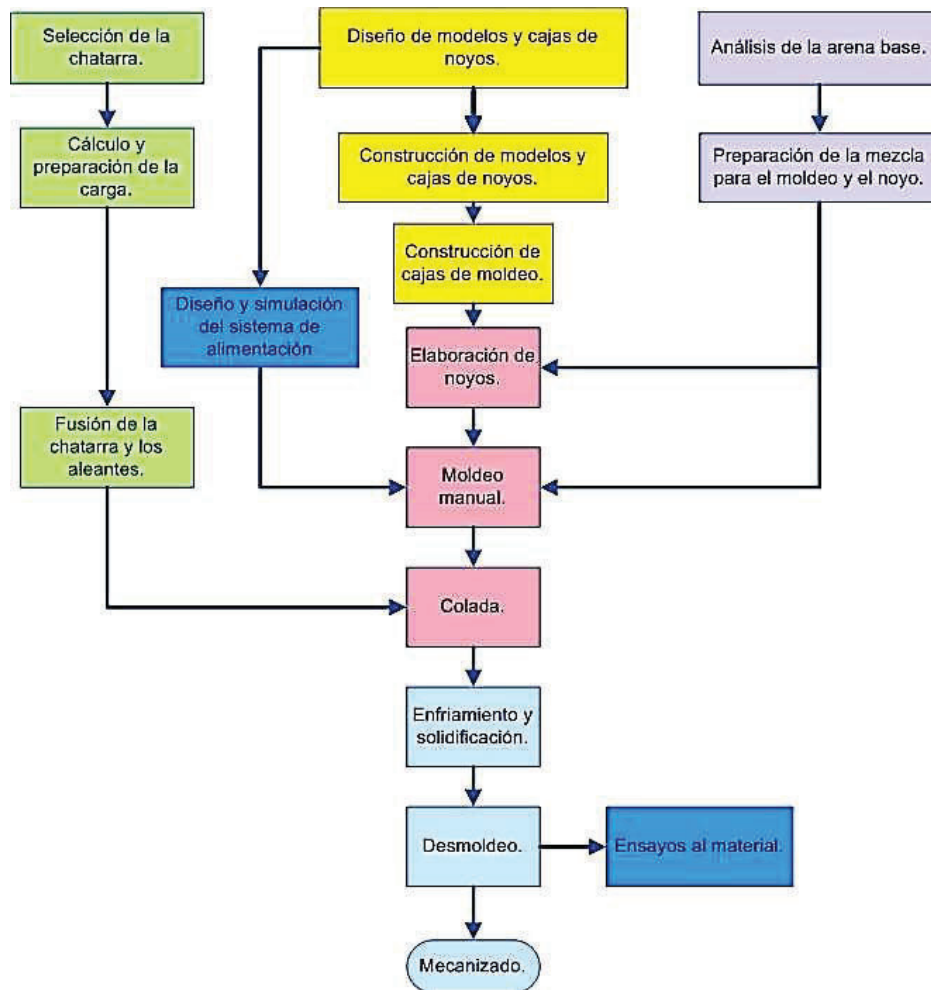


Figura 2.1. Diagrama de trabajo.
(Fuente: Propia)

2.1. Dimensionamiento de las piezas

2.1.1. Cálculo de esfuerzos del pistón

Se considerarán datos de empresas que se dedican a la fabricación de piezas y elementos mecánicos con este tipo de materiales, que a su vez detallan todas las propiedades características del material, tomadas de normas, como es la ASTM B148 / B505, ver anexo 2.

Para el cálculo del esfuerzo que actúa sobre el pistón empleamos la ecuación 1.5.

$$\sigma = \frac{F}{A_p}$$

Donde

F : Carga aplicada al pistón transmitida por el inyector

A_p : Área de la sección transversal del pistón

$$A_p = \pi \cdot \frac{D^2}{4}$$

$$A_p = \pi \cdot \frac{(80 \text{ mm})^2}{4}$$

$$A_p = 5026,55 \text{ mm}^2$$

Una vez calculada la carga que actúa y se transmite a lo largo del inyector, determinamos el esfuerzo que se genera en el pistón.

$$P = 300 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2} [\text{PSI}] = 2068427,19 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} [\text{Pa}]$$

$$\sigma = 2,068 [\text{MPa}]$$

Con el valor del esfuerzo calculado, que es el esfuerzo que se requiere y el esfuerzo de fluencia igual a 205 [Mpa], obtenido de las propiedades del material, se calcula el factor de seguridad.

Calculo del factor de seguridad, usando la ecuación 1.6.

$$n = \frac{\text{Resistencia de fluencia}}{\text{Resistencia requerida}}$$

$$n = \frac{205 [MPa]}{2,068 [MPa]}$$

$$n = 99,13$$

Como se evidencia, el factor de seguridad obtenido sobrepasa los límites establecidos para evitar la falla, esto se debe al sobredimensionamiento que existe en el elemento de estudio. Es recomendable que el diseñador cambie las cargas que van actuar sobre el elemento y no modificar las dimensiones de diseño de las piezas realizadas, ya que resulta ventajoso en cuanto a modificaciones técnicas.

Se tomará como referencia, a máquinas similares que presentan las mismas características en el modelo de la bomba, que de acuerdo al diámetro del inyector varía la presión de trabajo, como se evidencia en el anexo 3.

Se trabajara para un inyector de diámetro igual a 25 [mm], donde cuya presión es 6061 [PSI]. (GASO, 2017)

Como se explicó anteriormente la presión ejercida en el inyector es transmitida hacia el pistón, teniendo:

$$P = 6061 \frac{b}{in^2} [PSI] = 41787 \frac{kN}{m^2} [kPa]$$

$$\sigma = 41,79 [MPa]$$

Con el nuevo valor del esfuerzo requerido, procedemos a calcular el factor de seguridad para el elemento.

Factor de seguridad:

$$n = \frac{\text{Resistencia de fluencia}}{\text{Resistencia requerida}}$$

$$n = \frac{205 [MPa]}{41,79 [MPa]}$$

$$n = 4,91$$

Para el cálculo del esfuerzo admisible del elemento, se utiliza la ecuación 1.7.

$$\sigma_{adm} = \frac{\sigma_u}{n}$$

$$\sigma_{adm} = \frac{515 [MPa]}{4,91}$$

$$\sigma_{adm} = 104,89 \text{ [MPa]}$$

Con el esfuerzo admisible calculado determinamos la carga admisible del elemento, ecuación 1.8.

$$F_{adm} = \sigma_{adm} \cdot A_p$$

$$F_{adm} = 104,89 \text{ [MPa]} \cdot \frac{\pi}{4} (0,08)^2 \text{ [m}^2\text{]}$$

$$F_{adm} = 0,53 \text{ [MPa]} = 76,47 \text{ [PSI]}$$

Como se puede observar, el valor de la carga admisible es de 76,47 [PSI], lo que demuestra que al elemento se debe aplicar dicha carga para que no haya una deformación permanente del material.

2.1.2. Cálculo de parámetros de diseño en el pistón

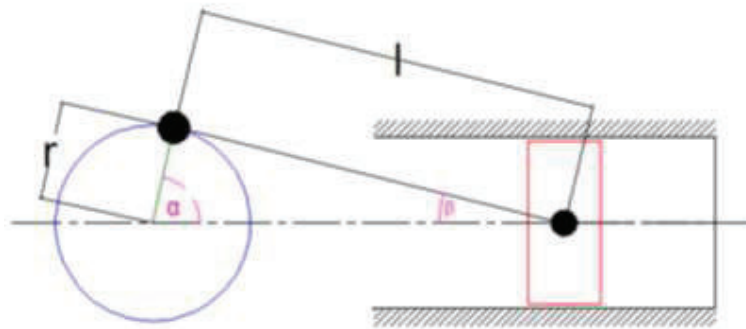


Figura 2.2. Esquema del mecanismo cigüeñal-biela-pistón.
(Fuente: Propia)

La figura 2.2 representa el esquema del mecanismo cigüeñal-biela-pistón, y con uso de la ecuación 1.11, procedemos a encontrar el desplazamiento del pistón.

$$x = r(1 - \cos \alpha) + \frac{1}{\lambda} \left(1 - \sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2 \alpha} \right)$$

Donde

$$r = 40 \text{ mm}$$

$$l = 133 \text{ mm}$$

$$\lambda = \frac{40}{133} = 0,30$$

El valor de α variará dependiendo de donde se encuentre el punto de contacto entre el cigüeñal y la biela, teniendo dos posiciones extremas, cuando $\alpha = 0$ y $\alpha = 180^\circ$.

Caso 1, cuando $\alpha = 0$

Se tiene: $\cos(0) = 1$

$$\sin(0) = 0$$

$$x = 40(1 - 1) + \frac{1}{0,30} \left(1 - \sqrt{1 - (0,30)^2 \cdot 0} \right)$$

$$x = 0 \text{ [mm]}$$

Ésta sería el valor del desplazamiento del pistón cuando el ángulo de giro es 0.

Caso 2, cuando $\alpha = 180^\circ$

Se tiene: $\cos(180) = -1$

$$\sin(180) = 0$$

$$x = 40(1 + 1) + \frac{1}{0,30} \left(1 - \sqrt{1 - (0,30)^2 \cdot 0} \right)$$

$$x = 80 \text{ [mm]}$$

El desplazamiento que alcanzaría el pistón es de 80 mm, con un ángulo de rotación del cigüeñal igual a 180° . Ésta sería la carrera del pistón.

Al derivar la ecuación 1.11 correspondiente al desplazamiento del pistón, se obtiene la ecuación 1.12, que viene a ser la velocidad lineal del pistón.

$$v = r \cdot w \cdot \left(\sin \alpha + \frac{\lambda \cdot \sin \alpha \cos \alpha}{\sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2 \alpha}} \right)$$

Donde

$$r = 40 \text{ mm}$$

$$w = 400 \text{ rpm}$$

$$\lambda = \frac{40}{133} = 0,30$$

Para el cálculo de la velocidad, señalaremos que el cigüeñal se mueve con una velocidad angular constante, esto se explicó en el capítulo 1. Por lo que nos daría lo mismo calcular el valor de la velocidad para $\alpha = 0$ o $\alpha = 180^\circ$.

Caso 1, cuando $\alpha = 0$

Se tiene: $\cos(0) = 1$

$$\sin(0) = 0$$

$$v = 40 \cdot 400 \cdot \left(0 + \frac{0,30 \cdot 0 \cdot 1}{\sqrt{1 - (0,30)^2 \cdot 0}} \right)$$

$$v = 0 \text{ [m/s]}$$

Caso 2, cuando $\alpha = 180^\circ$

Se tiene: $\cos(180) = -1$

$$\sin(180) = 0$$

$$v = 40 \cdot 400 \cdot \left(0 + \frac{0,30 \cdot 0 \cdot (-1)}{\sqrt{1 - (0,30)^2 \cdot 0}} \right)$$

$$v = 0 \text{ [m/s]}$$

Como se observa el valor de la velocidad en estos dos puntos es igual a 0, debido a que son los extremos del desplazamiento del pistón.

Para conocer el valor máximo de la velocidad del pistón se calcula cuando el valor del ángulo es igual a 90° .

Teniendo: $\cos(90) = 0$

$$\sin(90) = 1$$

$$v = 40 \cdot 400 \cdot \left(1 + \frac{0,30 \cdot 1 \cdot 0}{\sqrt{1 - (0,30)^2 \cdot 1}} \right)$$

$$v = 40[\text{mm}] \left| \frac{1\text{m}}{1000\text{mm}} \right| \cdot 400 \text{ rpm} \frac{|1\text{min}|}{60 \text{ s}}$$

$$v = 0,26 \text{ [m/s]}$$

La velocidad del pistón sería de 0,26 [m/s], cuyo valor está dentro del límite señalado que no debe sobrepasar los 1,5 [m/s].

Variando el valor del radio del cigüeñal, se mejoran las condiciones de funcionamiento del pistón, carrera y velocidad lineal. Ver tabla 2.1.

Tabla 2.1. Variación del radio del cigüeñal.

| Radio r [mm] | Desplazamiento x [mm] | Velocidad v [m/s] |
|-----------------|--------------------------|----------------------|
| 30 | 60 | 0,20 |
| 35 | 70 | 0,23 |
| 40 | 80 | 0,26 |

(Fuente: Propia)

Mediante la comparación de los valores obtenidos en la tabla 2.1, para un radio de 35 [mm] el pistón va desplazarse 70 [mm] a una velocidad de 0,23 [m/s], que es el valor promedio respecto a la variación del radio del cigüeñal.

Cálculo del espesor de la cabeza del pistón, ecuación 1.13.

$$e_p = D \sqrt{\frac{3 \cdot p}{16 \cdot \sigma_{adm}}}$$

Donde:

D : 80 [mm]

p : 41,79 [N/mm²]

σ_{adm} : 104,89 [MPa]

$$e_p = 80 \cdot \sqrt{\frac{3 \cdot 41,79}{16 \cdot 104,89}}$$

$$e_p = 21,86 [mm]$$

Cálculo del espesor radial del anillo, ecuación 1.14.

$$t_1 = D \sqrt{\frac{3 \cdot p_w}{\sigma_t}}$$

Donde:

$$D: 80 \text{ [mm]}$$

$$p_w: 0,042 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_t: 515 \text{ [MPa]}$$

$$t_1 = 80 \cdot \sqrt{\frac{3 \cdot 0,042}{515}}$$

$$t_1 = 1,25 \text{ [mm]}$$

Cálculo del espesor axial del anillo, ecuación 1.15.

$$t_2 = 0,7 \cdot t_1$$

Donde:

$$t_1: 1,25 \text{ [mm]}$$

$$t_2 = 0,7 \cdot 1,25$$

$$t_2 = 0,88 \text{ [mm]}$$

Cálculo del ancho de la ranura del anillo; ecuación 1.16.

$$m_2 = 0,75 \cdot t_2$$

Donde:

$$t_2 = 0,88 \text{ [mm]}$$

$$m_2 = 0,75 \cdot 0,88$$

$$m_2 = 0,66 \text{ [mm]}$$

Para determinar el espesor del barril del pistón se utiliza la expresión 1.17.

$$t_3 = (0,03 \cdot D) + b + 4,5$$

Donde:

b : Profundidad radial de las ranuras del anillo

$$b = 0,4 + t_1$$

Donde:

t_1 : 1,25 [mm]

$$b = 0,4 + 1,25$$

$$b = 1,65 \text{ [mm]}$$

Para encontrar el espesor del cilindro en el extremo abierto se usa la ecuación 1.19.

$$t_4 = 0,25 \cdot t_1$$

Donde:

t_1 : 1,25 [mm]

$$t_4 = 0,25 \cdot 1,25$$

$$t_4 = 0,31 \text{ [mm]}$$

Diámetro del pasador del pistón, ecuación 1.20.

$$d_o = 0,03 \cdot D$$

Donde:

D : 80 [mm]

$$d_o = 0,03 \cdot 80$$

$$d_o = 2,4 \text{ [mm]}$$

2.1.3. Cálculo de esfuerzo en sección crítica de la cámara de presión

Para el cálculo del esfuerzo localizado en la intersección de las perforaciones de la cámara de presión, emplearemos la ecuación 1.21.

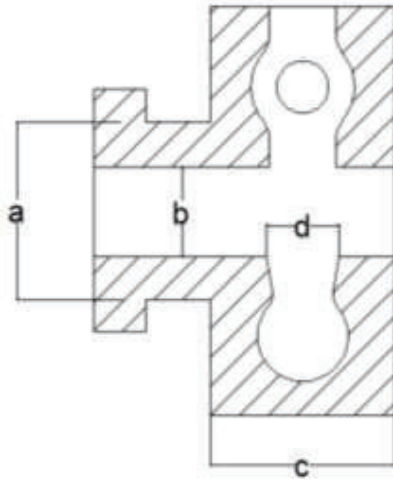


Figura 2.3. Sección de la cámara de presión.
(Fuente: Propia)

$$S = P \left[\left(\frac{a^2 + b^2}{a^2 - b^2} \right) + \left(\frac{c^2 + d^2}{c^2 - d^2} \right) \right]$$

Donde

P : es la presión en la cámara de presión igual a 6061 lb/in^2 [PSI], valor tomado como nueva dato para el dimensionamiento de las piezas a diseñar.

b : 28 mm.

d : 30 mm.

a : 74 mm.

c : 100 mm.

$$S = 41789123,95 \frac{N}{m^2} \left[\left(\frac{(74)^2 + (28)^2}{(74)^2 - (28)^2} \right) + \left(\frac{(100)^2 + (30)^2}{(100)^2 - (30)^2} \right) \right]$$

$$S = 105,81 \text{ [MPa]}$$

Como se evidencia en el resultado, el esfuerzo que se obtiene es menor al establecido como dato comparativo que es la resistencia a la fluencia igual a 205 [MPa]. Sin duda el dimensionamiento del elemento a obtenerse es el adecuado, ya que se va trabajar con una presión baja en cuanto a bombas del mismo tipo, que trabajan para presiones sumamente altas.

2.1.4. Cálculo de parámetros de diseño en la cámara de presión

De acuerdo a la ecuación 1.22 se hace la relación radio-espesor del cilindro, para saber si la tubería tiene una pared gruesa o delgada.

$$\frac{r}{e} \geq 10$$

Donde

$$r = 14 \text{ [mm]}$$

$$e = 23 \text{ [mm]}$$

$$\frac{14}{23} \geq 10$$

$$0,6 \geq 10$$

De acuerdo al valor obtenido y lo expuesto en el capítulo anterior, la pared del cilindro es gruesa.

Para el cálculo de los esfuerzos en cilindros de pared gruesa, se usa las ecuaciones 1.24 y 1.25 para determinar los esfuerzos transversal y radial.

$$\sigma_t = P \frac{r_2^2 + r_1^2}{r_2^2 - r_1^2}$$

$$\sigma_r = -P$$

Donde

$$P = 6061 \text{ lb/in}^2 \text{ [PSI]}$$

$$r_2 = 37 \text{ [mm]}$$

$$r_1 = 14 \text{ [mm]}$$

$$\sigma_t = 6061 \text{ [PSI]} \left| \frac{6894,75 \text{ Pa}}{1 \text{ PSI}} \right| \frac{(37)^2 + (14)^2}{(37)^2 - (14)^2}$$

$$\sigma_t = 55,75 \text{ [MPa]}$$

$$\sigma_r = -6061 \text{ [PSI]} \left| \frac{6894,75 \text{ Pa}}{1 \text{ PSI}} \right|$$

$$\sigma_r = -41,79 \text{ [MPa]}$$

Para hallar el esfuerzo admisible, empleamos la ecuación 1.26.

$$\sigma_{adm} = \sigma_t + \sigma_r$$

Donde

$$\sigma_t = 55,75 \text{ [MPa]}$$

$$\sigma_r = -41,79 \text{ [MPa]}$$

$$\sigma_{adm} = 55,75 \text{ [MPa]} + (-41,79) \text{ [MPa]}$$

$$\sigma_{adm} = 13,96 \left[\frac{N}{mm^2} \right]$$

Con el resultado del valor del esfuerzo admisible igual ha $13,96 \left[\frac{N}{mm^2} \right]$, se hace el análisis comparativo con el esfuerzo del material igual a $515 \left[\frac{N}{mm^2} \right]$, donde se evidencia que el valor del esfuerzo admisible es menor al del material. Esto se debe al sobre dimensionamiento que existe en la cámara de presión para trabajar con una presión de $P = 6061 \text{ lb/in}^2 \text{ [PSI]}$.

2.2. Cálculo del calor necesario para el horno

Determinamos el calor de calentamiento con la ecuación 1.27.

$$Q_1 = m c_1 \Delta T ; \quad \Delta T = T_1 - T$$

Donde

$$m: 30,4 \text{ [kg]}$$

$$c_1: 0,09 \left[\frac{kcal}{kg \cdot ^\circ C} \right]$$

$$T_1 = 925 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$T = 20 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$Q_1 = 30,4 \text{ [kg]} \cdot 0,09 \left[\frac{kcal}{kg \cdot ^\circ C} \right] \cdot (925 - 20) \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$Q_1 = 2476,08 \text{ [kcal]}$$

Cálculo del calor latente de fusión empleando la ecuación 1.28.

$$Q_2 = m c_2$$

Donde

$$m: 30,4 \text{ [kg]}$$

$$c_2: 43 \left[\frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \right]$$

$$Q_2 = 30,4 \text{ [kg]} \cdot 43 \left[\frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \right]$$

$$Q_2 = 1307,2 \text{ [kcal]}$$

Para el cálculo del calor de recalentamiento trabajamos con la ecuación 1.29.

$$Q_3 = m c_3 \Delta T \quad ; \quad \Delta T = T_2 - T_1$$

Donde

$$m: 30,4 \text{ [kg]}$$

$$c_3: 0,156 \left[\frac{\text{kcal}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \right]$$

$$T_2 = 1200 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$T_1 = 925 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$Q_3 = 30,4 \text{ [kg]} \cdot 0,156 \left[\frac{\text{kcal}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \right] \cdot (1200 - 925) \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$Q_3 = 1304,16 \text{ [kcal]}$$

Para determinar el calor necesario utilizado en la fundición empleamos la ecuación 1.30.

$$Q_T = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

$$Q_T = 2476,08 \text{ [kcal]} + 1307,2 \text{ [kcal]} + 1304,16 \text{ [kcal]}$$

$$Q_T = 5087,44 \text{ [kcal]}$$

Con una masa de 30,4 [gr] de bronce de aluminio, se necesita un calor total necesario de 5087,44 [kcal].

El rendimiento del horno se emplea la ecuación 1.31.

$$\eta = \frac{Q}{Q_t}$$

Donde:

Q : 2476,08 [kcal]

Q_t : 5087,44 [kcal]

η : Eficiencia del horno

$$\eta = \frac{2476,08}{5087,44}$$

$$\eta = 0,48$$

2.3. Análisis de arcilla en la base refractaria

En el capítulo 1 se explicó el procedimiento del análisis de la concentración de arcilla en la arena mediante el proceso de levigación.

En la tabla 2.2 se presentan los resultados del proceso de levigación, donde la diferencia entre los pesos de arena es la cantidad de arcilla que se evacuó de la arena.

Tabla 2.2. Cantidad de arcilla en la arena.

| Peso [g] | | Contenido de arcilla [g] |
|----------|--------|--------------------------|
| Inicial | Final | |
| 50 | 48,475 | 1,525 |

(Fuente: Propia)

2.3.1. Análisis granulométrico de la base refractaria

Mediante el procedimiento expuesto anteriormente, y con los factores de valorización de los tamices localizados en la tabla 1.6, se procede a describir los datos obtenidos en el análisis de granulométrico, para el cálculo del índice de finura de la arena. Como se evidencia en la tabla 2.3.

Tabla 2.3. Análisis granulométrico de la arena.

| Tamiz | Peso | Porcentaje | Factor | Producto |
|------------|--------|------------|--------|----------|
| 6 | 0 | 0 | 3 | 0 |
| 12 | 0.148 | 0.32 | 5 | 1.58 |
| 20 | 0.261 | 0.56 | 10 | 5.56 |
| 30 | 0.72 | 1.53 | 20 | 30.65 |
| 40 | 18.377 | 39.12 | 30 | 1173.55 |
| 50 | 13.435 | 28.60 | 40 | 1143.94 |
| 70 | 0.591 | 1.26 | 50 | 62.90 |
| 100 | 12.224 | 26.02 | 70 | 1821.45 |
| 140 | 0.717 | 1.53 | 100 | 152.62 |
| 200 | 0.12 | 0.26 | 140 | 35.76 |
| 270 | 0.344 | 0.73 | 200 | 146.45 |
| Recolector | 0.041 | 0.087 | 300 | 26.18 |
| TOTAL | 46.978 | 100.00 | | 4600.64 |

(Fuente: Propia)

Para el cálculo del índice de finura se tiene la ecuación 1.32, que hace referencia a los valores de la tabla 2.3.

$$\text{Índice de Finura (i)} = \frac{\sum(\alpha * \%)}{\sum \%} = 46,1$$

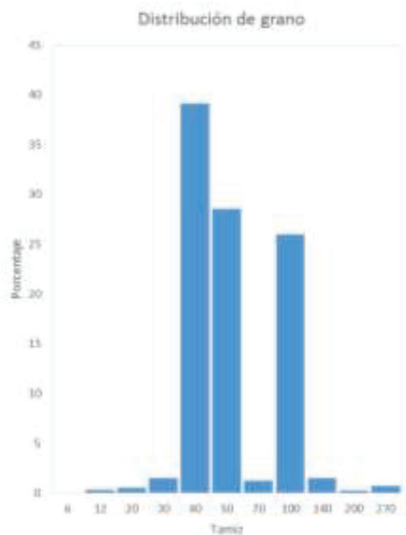


Figura 2.4. Diagrama del análisis granulométrico de la arena.

(Fuente: Propia)

2.3.2. Cálculo de propiedades mecánicas en la mezcla de moldeo

Para el cálculo de la permeabilidad de la arena, primero se pesa 300 g de arena gruesa nueva seca, se añade el 10% de bentonita con relación a la masa total de la arena.

Una vez mezclada la arena con la bentonita, se añade agua según los porcentajes que se vayan a manejar. Para nuestro análisis se trabajó con el 6, 8 10 y 12 por ciento de agua.

A continuación se presentan los valores correspondientes a los ensayos de la arena con los diferentes porcentajes de humedad.

Tabla 2.4. Resultados de las propiedades mecánicas de la arena.

| Porcentaje de agua: 6% | | | | |
|-------------------------|--------|---------------|----------------------|-----------------------------|
| | Dureza | Permeabilidad | Resistencia al corte | Resistencia a la compresión |
| Probeta 1 | 80 | 17 | 3,2 | |
| Probeta 2 | 70 | 22 | | 11,4 |
| Porcentaje de agua: 8% | | | | |
| | Dureza | Permeabilidad | Resistencia al corte | Resistencia a la compresión |
| Probeta 1 | 77 | 24 | 2,6 | |
| Probeta 2 | 71 | 24 | | 9 |
| Porcentaje de agua: 10% | | | | |
| | Dureza | Permeabilidad | Resistencia al corte | Resistencia a la compresión |
| Probeta 1 | 56 | 14 | 2,9 | |
| Probeta 2 | 70 | 15 | | 7,8 |
| Porcentaje de agua: 12% | | | | |
| | Dureza | Permeabilidad | Resistencia al corte | Resistencia a la compresión |
| Probeta 1 | 60 | 15 | 1,9 | |
| Probeta 2 | 50 | 14 | | 6,3 |

(Fuente: Propia)

De acuerdo a los datos obtenidos en la tabla 2.4, se tiene una mayor permeabilidad al presenciar el 8% de humedad en la arena.

2.4. Modelos y cajas de noyos de fundición

Para el cálculo de espesores mínimos de las piezas se emplea la ecuación 1.33.

$$N = \frac{2(l) + b + h}{3} [m]$$

Donde las piezas a realizarse presentan las diferentes longitudes expuestas en la tabla 2.5, con la dimensión equivalente de cada una de ellas.

Tabla 2.5. Dimensiones de las piezas a construir.

| Dimensión [m] | Pistón | Cámara de presión |
|-------------------------|--------|-------------------|
| Longitud (l) | 0,102 | 0,202 |
| Ancho (b) | 0,08 | 0,121 |
| Altura (h) | 0,08 | 0,120 |
| Dimensión equivalente N | 0,12 | 0,21 |

(Fuente: Propia)

A continuación, en la tabla 2.6 se evidencian los espesores mínimos de las piezas a elaborar:

Tabla 2.6. Espesores mínimos de las piezas.

| Pieza | Espesor mínimo (mm) |
|-------------------|---------------------|
| Pistón | 6 |
| Cámara de presión | 16,5 |

(Fuente: Propia)

Como se observa en la tabla 2.6 todas las piezas cumplen y están dentro de las dimensiones de espesores mínimos previamente determinados.

El cálculo de la superficie externa de la pieza se realiza, mediante el análisis de la tabla 1.10 y las dimensiones máximas de las piezas. Teniendo:

En el pistón se tiene una superficie circular plana exterior la cual va estar en contacto con la cámara de presión, por lo que necesita maquinarse una vez obtenida la pieza fundida para que logre la función correspondiente.



Figura 2.5. Superficies del pistón.
(Fuente: Propia)

La cámara de presión presenta una superficie semejante a la del pistón con la presencia de salientes en los extremos de la pieza, hay que tomar en consideración que ésta pieza es hueca por lo que requiere de un macho o noyo.

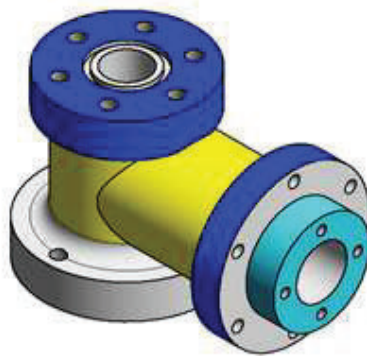


Figura 2.6. Superficies de la cámara de presión.
(Fuente: Propia)

La sobre medida de maquinado depende del tipo de metal a utilizarse, para el caso de bronce al aluminio, la medida de sobre espesor es igual a 3 mm para modelos de complejidad simple y para modelos de mayor complejidad su valor será de 4 mm, estos valores son determinados en base a la dimensión máxima obtenida en el modelo. (Titov & Stepánov, 1981)

Existen piezas que presentan pequeños orificios, los cuales se los calcula para verificar si debe o no ir el agujero. Ayudando a la verificación la ecuación 1.35.

$$d \leq 0,3 \cdot h + 10$$

Donde los datos de diámetro y profundidad se detallan en la tabla 2.7

Tabla 2.7. Magnitudes de piezas con orificios.

| | Pistón | | Cámara de presión |
|---------------------|--------|-------|-------------------|
| | Eje | Bulón | |
| Diámetro (mm) | 17,25 | 18 | 8 |
| Profundidad (mm) | 23 | 50 | 15 |
| $d \leq 0,3 h + 10$ | 16,9 | 25 | 14,5 |

(Fuente: Propia)

De acuerdo a los datos obtenidos en la tabla 2.7 los orificios se los deben realizar mediante proceso de taladrado salvo el caso para el eje del pistón, en cual no está dentro de la relación establecida por lo que es necesaria la presencia del agujero a realizar.

La contracción lineal media del material (base de cobre), es 1,4 por ciento para procesos de fundición, dato tomado de la tabla 1.11.

Para determinar el ángulo de desmoldeo, nos referimos a la tabla 1.12. Por medio de la altura de las piezas a fabricar se tienen diferentes valores, en cuanto al ángulo de salida.

Para las dimensiones del ángulo de salida en el pistón hay que considerar las dos partes que conforman ésta pieza, las cuales tienen una altura de 43 mm cada una con esto se obtiene un ángulo de salida de 1° o una distancia S de 0,75 mm de inclinación.

La cámara de presión consta de una altura de 50 mm, para ello el ángulo de salida es de 1° o una inclinación de 0,75 mm.



Figura 2.7. Modelos con ángulos de salida.
(Fuente: Propia)

2.4.1. Construcción de modelos y cajas de machos

Se realizan los planos de taller de las piezas (cajas de modelo y machos), partiendo de las dimensiones ya calculadas de la contracción del metal y el sobredimensionamiento para el maquinado. El modelista es quien construye los modelos de las piezas en madera, afinando cada detalle encontrado en los planos de las piezas a construir.

Partimos de los planos de taller de las piezas, así controlamos el dimensionamiento del pistón y la cámara de presión para que no exista un exceso de material a retirar en el mecanizado.

Los planos de los modelos de madera de la cámara de presión y del pistón se presentan en la sección de anexos.

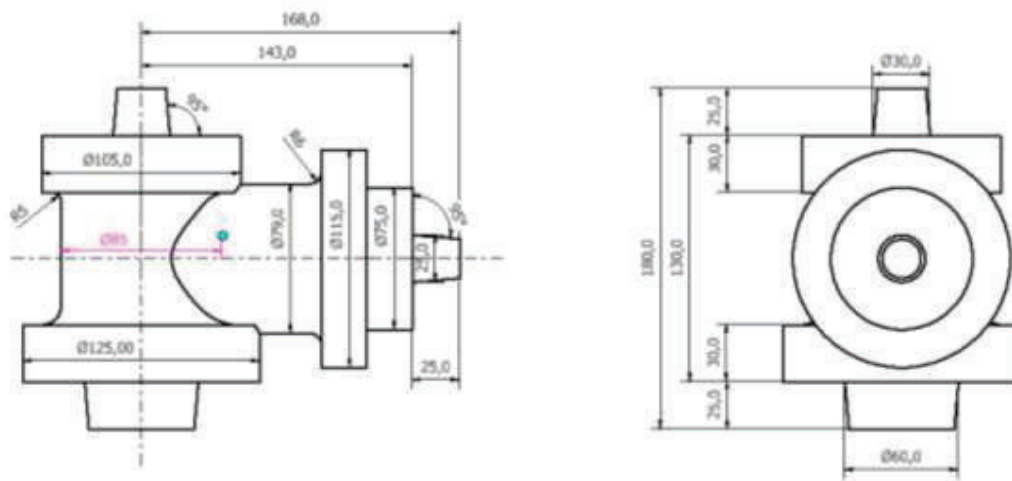


Figura 2.8. Cámara de presión (Bronce al aluminio).
(Fuente: Propia)

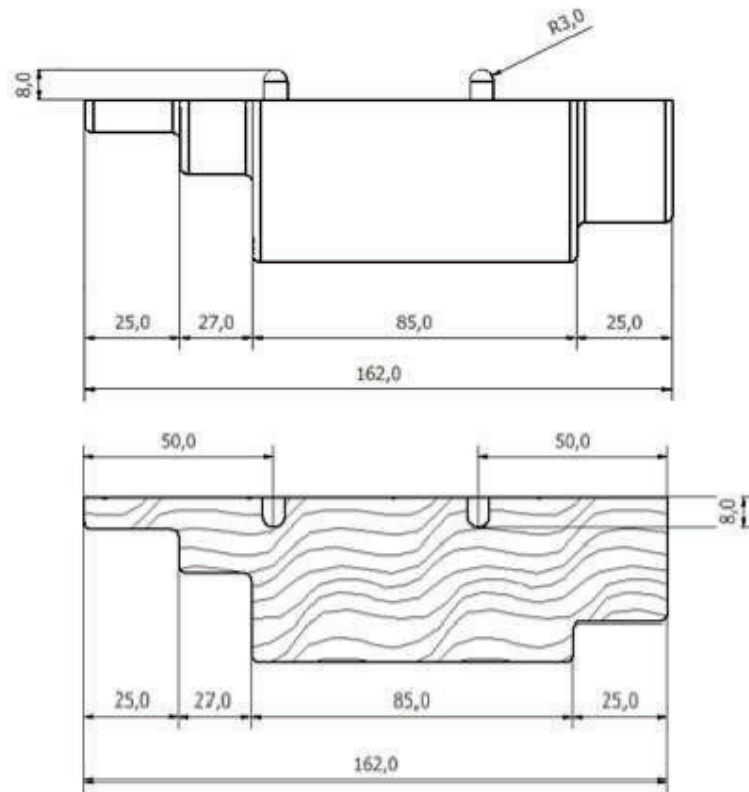


Figura 2.9. Pistón (Bronce al aluminio).
(Fuente: Propia)

Como se mencionó anteriormente las dimensiones se encuentran con un sobredimensionamiento en el modelo de madera y sobre espesor para maquinado, esto se debe a la contracción que se tiene en el material cuando se enfría, tomando en cuenta el principio de la termodinámica que todo cuerpo al estar a temperaturas elevadas se dilatan y al enfriarse los cuerpos se contraen.

Los machos (noyos), se realiza para piezas que en su interior son huecas como es el caso del pistón y la cámara de presión. Para los machos también se realiza un modelo de madera.

Los planos de los modelos de las cajas de noyos de la cámara de presión y el pistón se encuentran en la sección de anexos.

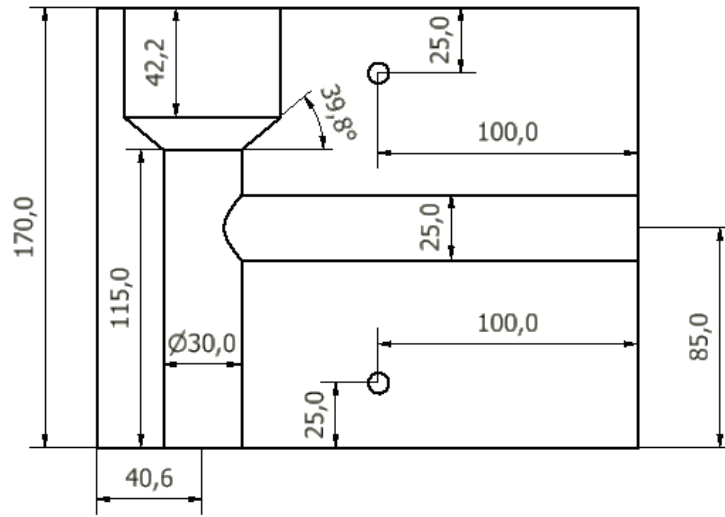


Figura 2.10. Caja de noyes para la cámara de presión.
(Fuente: Propia)

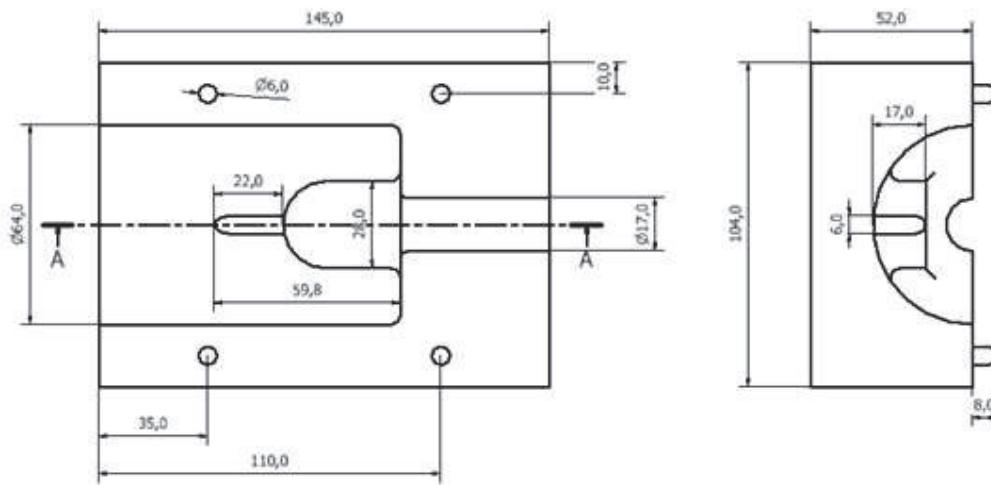


Figura 2.11. Caja de noyes para el pistón.
(Fuente: Propia)

2.5. Cálculo del sistema de alimentación

2.5.1. Pistón

Para el cálculo del sistema de alimentación del pistón, se hace énfasis en obtener el área de alimentación y mediante la relación entre áreas se determina su valor, utilizando la ecuación 1.36.

$$\sum Fa : Fes : Ft = 3 : 1.2 : (1.2 - 2)$$

Para determinar el área de la sección transversal de la alimentación se realiza mediante la ecuación 1.37, teniendo la siguiente expresión.

$$\sum Fa = \frac{G}{\mu T_v \delta \sqrt{2Hm g}}$$

Donde:

$$G = 2.399 \text{ [kg]}$$

$$\mu = 0.3$$

$$\delta = 0.0089 \text{ [Kg/cm}^3\text{]}$$

Hm = Altura Nominal

T_v = Tiempo de vertido

g = Gravedad (98 cm/s^2)

Con la ecuación 1.38 se determina el área de la sección transversal del alimentador.

$$\rho \sqrt{2g} = 0.12$$

$$\sum Area_{min} = \frac{G}{\mu T_v 0.12 \sqrt{Hm}}$$

La altura Nominal se calcula mediante la ecuación 1.39:

$$Hm = Ho - \frac{p^2}{2c}$$

Donde

$$Ho = 240 \text{ [mm]}$$

$$p = 41.5 \text{ [mm]}$$

$$c = 83 \text{ [mm]}$$

$$Hm = 240 - \frac{(41.5)^2}{2(83)}$$

$$Hm = 229.63 \text{ mm}$$

Para el cálculo del tiempo de vertido se usa la expresión 1.40.

$$T_v = S \sqrt[3]{(\varepsilon \cdot G)}$$

Donde

$$\varepsilon = 10.5 [mm]$$

$$S = 0.7$$

$$G = 2399 [g]$$

$$T_v = 0.7 \sqrt[3]{9.5(2476)}$$

$$T_v = 20.73(s)$$

Forma alterna para el cálculo del tiempo de vertido mediante la ecuación 1.41:

$$T_v = K_t * \sigma^n * G^m$$

Donde

$$K_t = 0.47$$

σ = Espesor nominal

$$G = 2399 [g]$$

$$n = 0.2$$

$$m = 0.5$$

Para el cálculo del espesor nominal, se toma las longitudes ancho y largo de la pieza (ecuación 1.42).

$$\sigma = \frac{\varepsilon}{1 + \frac{W}{\varepsilon} + \frac{L}{\varepsilon}} = 0.54$$

$$T_v = 0.47 * 0.54^{0.2} * 2399^{0.5} = 20.35 [s]$$

Para la velocidad del vertido se emplea la ecuación 1.43:

$$V = \frac{C}{T_v} = \frac{83}{20.7} = 4.01 \left(\frac{mm}{s} \right) = 0.004 \left[\frac{m}{s} \right]$$

Al obtener los resultados de los cálculos anteriores, los valores se reemplazan en la ecuación 1.37, para obtener el área de la sección de alimentación.

$$\sum Fa = \frac{2.399 \text{ kg}}{0.3 * 20.7 * 0.0089 \text{ Kg/cm}^3 \sqrt{2 * 22.96 \text{ cm} * 98 \text{ cm/s}^2}}$$

$$\sum Fa = 0.65 [\text{cm}^2]$$

Una vez calculada el área Fa , se toma en consideración la relación de áreas de alimentación, escoriador y bebedero.

$$\sum Fa : Fes : Ft = 3 : 1.2 : (1.2 - 2)$$

Dimensiones del bebedero o tragadero

$$Area = 1.6 * Fa$$

$$Area = 1.6 * 0.65$$

$$Area = 1.04 [\text{cm}^2]$$

$$\phi = \sqrt{\frac{4 * Area}{\pi}} = 1.15 \text{ cm} = 12 [\text{mm}]$$

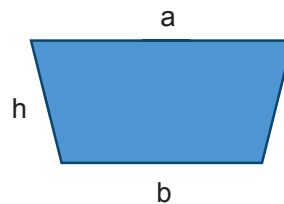
Para los alimentadores

$$Aa = 3 * Fa$$

$$Aa = 3 * 0.65$$

$$Aa = 1.95 [\text{cm}^2]$$

Con el área del alimentador, se encuentran las dimensiones del de los lados del canal. Según la Tabla 14 del libro Navas, Bastidas & Suchkov (1990). Ver anexo 4.



$$b = 18 [\text{mm}]$$

$$a = 22 [\text{mm}]$$

$$h = 10 [\text{mm}]$$

La longitud del canal de alimentación se obtiene de la Tabla 20 del libro Navas, Bastidas & Suchkov (1990). Ver anexo 5.

Longitud del alimentador entre 20 y 25 [mm].

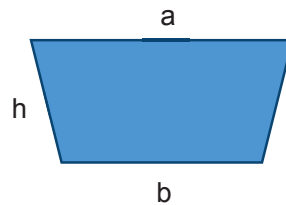
Para los escoriadores

$$A_{es} = 1.2 * Fa$$

$$A_{es} = 1.2 * 0.65$$

$$A_{es} = 0.78 [cm^2]$$

Con el área del escoriador, se obtienen las dimensiones de los lados del canal. Según la Tabla 22 del libro Navas, Bastidas & Suchkov (1990). Ver anexo 6.



$$b = 8 [mm]$$

$$a = 11 [mm]$$

$$h = 11 [mm]$$

Mazarota

Para el cálculo de las mazarotas se hace uso de la regla de Chvorinov, igualando las ecuaciones 1.45 y 1.46 se tiene:

$$(1.45) = (1.46)$$

$$C_m \left(\frac{V_{Aportador}}{A_{Aportador}} \right)^2 = C_m \left(\frac{V_{Pieza}}{A_{Pieza}} \right)^2$$

$$\left(\frac{D^3 \left(\frac{\pi}{4} \frac{H}{D} + \frac{\pi}{12} \right)}{D^2 \left(\frac{\pi}{4} + \pi \frac{H}{D} + \pi \right)} \right)^2 = \left(\frac{248877.7 \text{ mm}}{52426.3 \text{ mm}} \right)^2$$

$$\left(\frac{D \left(\frac{\pi}{4} \frac{3}{2} + \frac{\pi}{12} \right)}{\left(\frac{\pi}{4} + \pi \frac{3}{2} + \pi \right)} \right)^2 = \left(\frac{248877.7 \text{ mm}}{52426.3 \text{ mm}} \right)^2$$

$$D = 4.75 * \frac{\pi \left(\frac{1}{4} + \frac{3}{2} + 1 \right)}{\pi \left(\frac{3}{8} + \frac{1}{12} \right)}$$

$$D = 4.75 * \frac{\left(\frac{1}{4} + \frac{3}{2} + 1 \right)}{\left(\frac{3}{8} + \frac{1}{12} \right)}$$

$$D = 28.48 [mm]$$

$$H = 42.72 [mm]$$

2.5.2. Cámara de presión

Ley de Dubinski y Sobeleb

$$\sum Fa : Fes : Ft = 3 : 1.2 : (1.2 - 2)$$

Para determinar el área de la sección transversal de la alimentación se realiza mediante la ecuación 1.37, teniendo la siguiente expresión.

$$\sum Fa = \frac{G}{\mu T_v \delta \sqrt{2Hmg}}$$

Donde:

$$G = 13.243 [kg]$$

$$\mu = 0.3$$

$$\delta = 0.0089 Kg/cm^3$$

Hm = Altura Nominal

Tv = Tiempo de vertido

g = Gravedad (98 cm/s^2)

$$\rho \sqrt{2g} = 0.12$$

$$\sum Area_{min} = \frac{G}{\mu T_v 0.12 \sqrt{Hm}}$$

Altura Nominal:

$$Hm = Ho - \frac{p^2}{2C}$$

Donde

$$Ho = 320 [mm]$$

$$p = 62.5 [mm]$$

$$c = 125 [mm]$$

$$Hm = 320 - \frac{(62.5)^2}{2(125)}$$

$$Hm = 304.38 [mm]$$

Tiempo de vertido

$$T_v = S \sqrt[3]{(\varepsilon \cdot G)}$$

Donde

$$\varepsilon = 27 [mm]$$

$$S = 0.7$$

$$G = 13243 [g]$$

$$T_v = 0.7 \sqrt[3]{(27(13243))}$$

$$T_v = 49.68(s)$$

$$T = K_t * \sigma^n * G^m$$

Donde

$$K_t = 0.47$$

σ = Espesor nominal

$$G = 13243 [g]$$

$$n = 0.2$$

$$m = 0.5$$

Para el cálculo del espesor nominal, se toma las longitudes ancho y largo de la pieza.

$$\sigma = \frac{\varepsilon}{1 + \frac{w}{\varepsilon} + \frac{L}{\varepsilon}} = 2.13$$

$$T = 0.47 * 2.13^{0.2} * 13243^{0.5} = 62.92 \text{ [s]}$$

Velocidad del vertido

$$V = \frac{C}{T_V} = \frac{125}{62.92} = 1.98 \left[\frac{mm}{s} \right] = 0.002 \left[\frac{m}{s} \right]$$

Al obtener los resultados de los cálculos anteriores, los valores se reemplazan en la ecuación 1.37, para obtener el área de la sección de alimentación.

$$\sum Fa = \frac{13.243 \text{ kg}}{0.3 * 62.92 * 0.0089 \text{ Kg/cm}^3 \sqrt{2} * 30.438 \text{ cm} * 98 \text{ cm/s}^2}$$

$$\sum Fa = 1.02 \text{ [cm}^2\text{]}$$

Una vez calculada el área Fa , se toma en consideración la relación de áreas de alimentación, escoriador y bebedero.

$$\sum Fa : Fes : Ft = 3 : 1.2 : (1.2 - 2)$$

Dimensiones del bebedero o tragadero

$$Area = 1.6 * Fa$$

$$Area = 1.6 * 1.02$$

$$Area = 1.63 \text{ [cm}^2\text{]}$$

$$\phi = \sqrt{\frac{4 * Area}{\pi}} = 1.44 \text{ cm} = 14.4 \text{ [mm]}$$

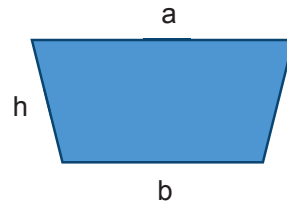
Para los alimentadores

$$Aa = 3 * Fa$$

$$Aa = 3 * 1.02$$

$$Aa = 3.06 \text{ [cm}^2\text{]}$$

Como se explicó en el caso anterior, las dimensiones las encontramos en la tabla 14 del libro de Navas, Bastidas & Suchkov (1990).



$$b = 22 \text{ [mm]}$$

$$a = 26 \text{ [mm]}$$

$$h = 13 \text{ [mm]}$$

Longitud del alimentador entre 25 y 30 [mm]. Ver anexo 5.

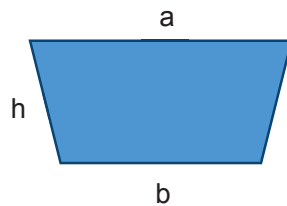
Para los escoriadores

$$A_{es} = 1.2 * Fa$$

$$A_{es} = 1.2 * 1.02$$

$$A_{es} = 1.22 \text{ [cm}^2\text{]}$$

Las dimensiones del canal se encuentran en el anexo 6.



$$b = 10 \text{ [mm]}$$

$$a = 12 \text{ [mm]}$$

$$h = 12 \text{ [mm]}$$

Debido al gran espesor de la cámara de presión, se recomienda el uso de una mazarota para contrarrestar los defectos de rechupes y porosidades generados por la acumulación de la masa en estas zonas, provocando que se solidifique en última instancia.

Mazarota

Como en el caso anterior se iguala las ecuaciones 1.45 y 1.46:

$$C_m \left(\frac{V_{Aportador}}{A_{Aportador}} \right)^2 = C_m \left(\frac{V_{Pieza}}{A_{Pieza}} \right)^2$$

$$\left(\frac{D^3 \left(\frac{\pi}{4} \frac{H}{D} + \frac{\pi}{12} \right)}{D^2 \left(\frac{\pi}{4} + \pi \frac{H}{D} + \pi \right)} \right)^2 = \left(\frac{1492962.9 \text{ mm}}{129600.04 \text{ mm}} \right)^2$$

$$\left(\frac{D \left(\frac{\pi}{4} \frac{3}{2} + \frac{\pi}{12} \right)}{\left(\frac{\pi}{4} + \pi \frac{3}{2} + \pi \right)} \right)^2 = \left(\frac{1492962.9 \text{ mm}}{129600.04 \text{ mm}} \right)^2$$

$$D = 11.52 * \frac{\pi \left(\frac{1}{4} + \frac{3}{2} + 1 \right)}{\pi \left(\frac{3}{8} + \frac{1}{12} \right)}$$

$$D = 11.52 * \frac{\left(\frac{1}{4} + \frac{3}{2} + 1 \right)}{\left(\frac{3}{8} + \frac{1}{12} \right)}$$

$$D = 69.12 \text{ [mm]}$$

$$H = 103.68 \text{ [mm]}$$

2.5.3. Verificación y ajustes del sistema de alimentación mediante paquete computacional de simulación

Los cálculos anteriores sirven como base para evaluar el diseño del sistema de alimentación utilizando el paquete computacional de simulación. Los reajustes realizados fueron, reemplazar la mazarota cerrada por una abierta que a la vez cumple la función de alimentador y canal de salida. Estos son colocados en las partes de mayor concentración de masa, para que el enfriamiento sea direccionado hacia las mazarotas abiertas.

Para determinar la ubicación de los canales de alimentación se identifica el lugar donde se desarrollan nudos térmicos. Para detectar la presencia de nudos térmicos se inscriben círculos en la sección analizada. La solidificación se da de las zonas de los círculos de menor a las de mayor diámetro (Goyos & Martínez, 1978, pág. 113).

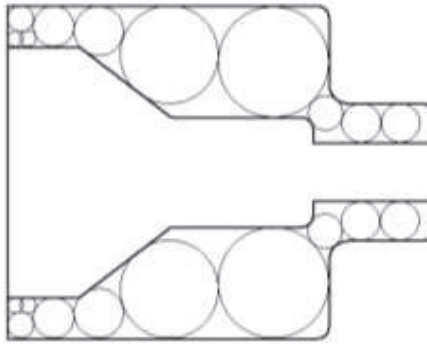


Figura 2.12. Nodos térmicos en el pistón.
(Fuente: Propia)

Las condiciones de frontera para desarrollar la simulación son:

- Temperatura de vertido: 1200 °C
- Flujo másico: 0,178 [kg/s]
- Temperatura ambiente: 20 °C (El cuerpo se enfría con el aire)
- Presión en la entrada y salida: 1 atm

En el gráfico del tiempo de solidificación se observa que la zona con mayor temperatura esta fuera de la pieza, en las mazarotas abiertas. El enfriamiento se direcciona desde la pieza hacia los canales de alimentación. Las mazarotas son las ultimas en enfriarse.

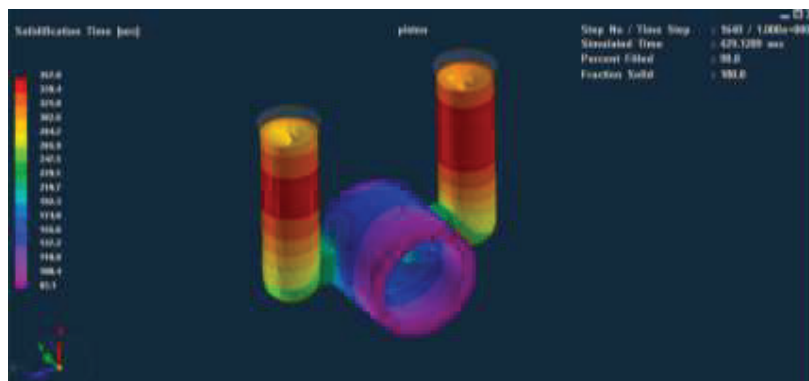


Figura 2.13. Tiempo de solidificación en el pistón.
(Fuente: Propia)

El tiempo de llenado es cercano al calculado, la simulación permite observar las zonas que se llenan primero y el comportamiento del fluido dentro del modelo. Esta parte es fundamental para visualizar si existen turbulencias en el recorrido del metal fundido.

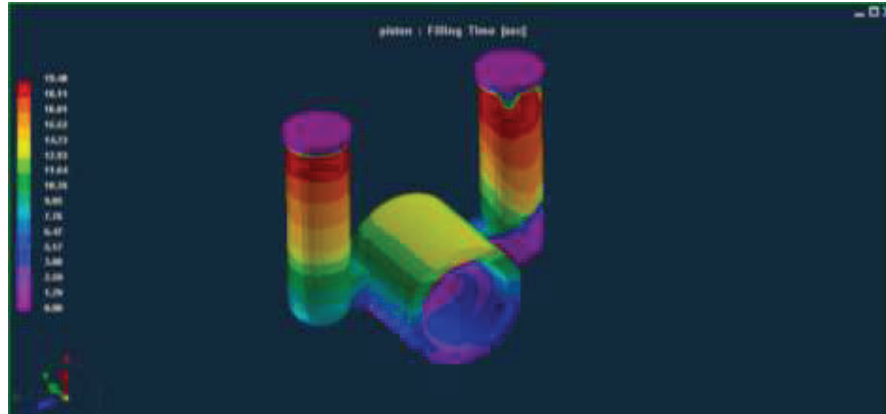


Figura 2.14. Tiempo de llenado en el pistón.
(Fuente: Propia)

Finalmente para analizar la formación de porosidades, el programa permite observar el porcentaje de porosidad presente en la pieza. En la pieza a nivel superficial existe 0% de porosidad. Para constatar esto se realiza una inspección usando planos que atraviesan a la pieza.

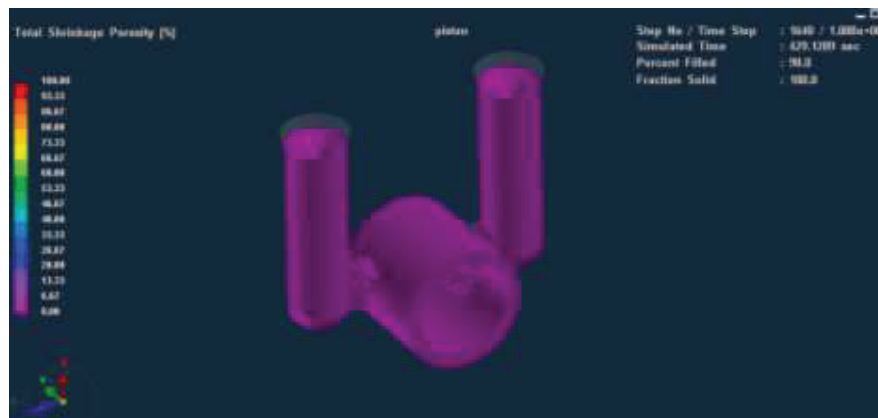


Figura 2.15. Formación de porosidades en el pistón.
(Fuente: Propia)

En el plano XZ, aparecen porosidades, pero están fuera de la pieza en medio de los canales de entrada y salida. Justamente a la altura de la zona con mayor temperatura que se analizó antes.

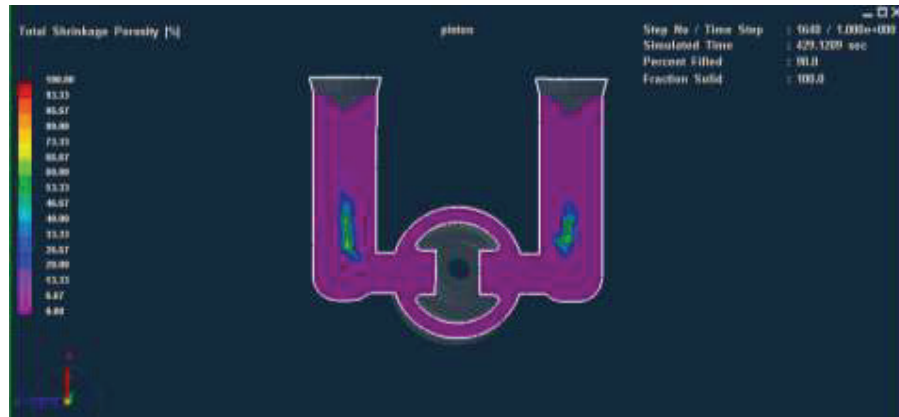


Figura 2.16. Porosidades en plano xz.
(Fuente: Propia)

Para la cámara, se conservan las condiciones de frontera anteriores. Los ajustes realizados también fueron descartar la mazarota cerrada en incluir una abierta que sirva a la vez como canal de alimentación. Al ser una pieza con gran concentración de masa, para poder direccionar el enfriamiento, se incluyen dos canales de salida, con un diámetro de 45 [mm]. Dos criterios determinaron la ubicación de los canales de entrada y salida: la ubicación de los nudos térmicos y la forma de la pieza. La zona donde se ubican los nudos térmicos es la parte superior de la cámara, en el cuerpo central.

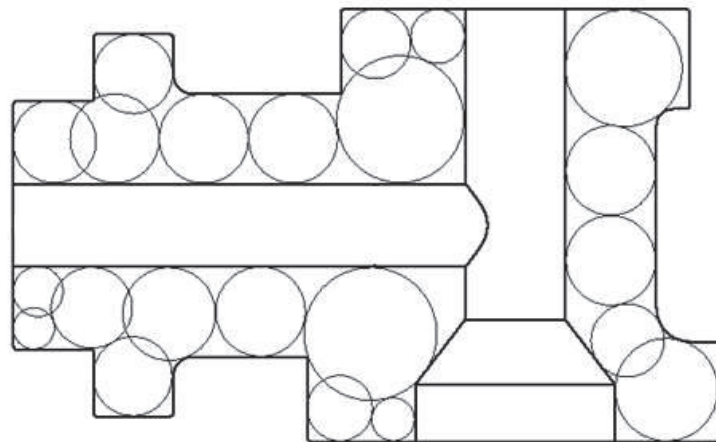


Figura 2.17. Nudos térmicos en la cámara de presión.
(Fuente: Propia)

La forma de la pieza hace imposible colocar salidas en la zona central de la pieza porque complica el maquinado, por eso la alternativa fue colocar salidas laterales a la altura de la zona con nudos térmicos.

En el tiempo de solidificación se observa que la última parte en enfriarse es la mazarota abierta, sin embargo la parte media de la pieza tiene una temperatura mayor al resto de la pieza.

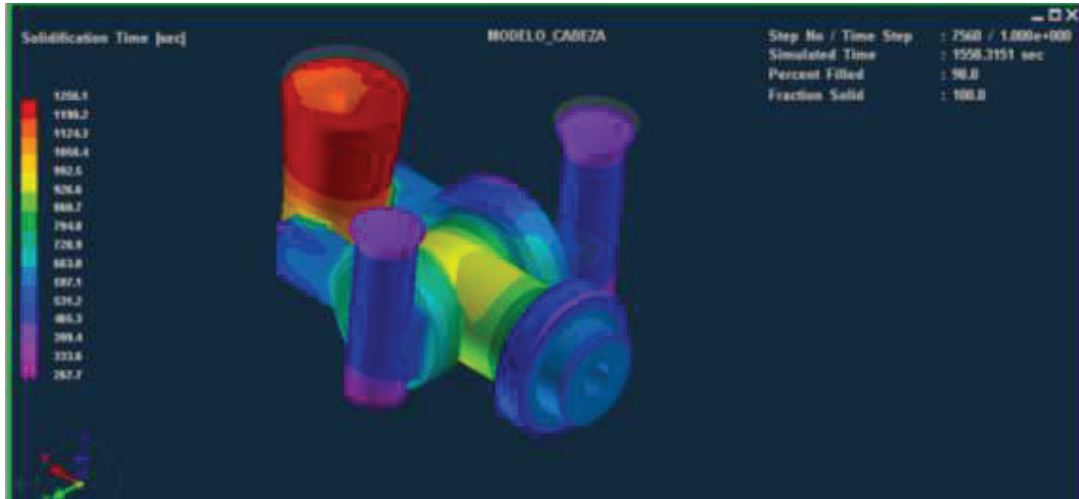


Figura 2.18. Tiempo de solidificación en la cámara de presión.
(Fuente: Propia)

El tiempo de llenado es un minuto y medio, no se observa turbulencias internas.

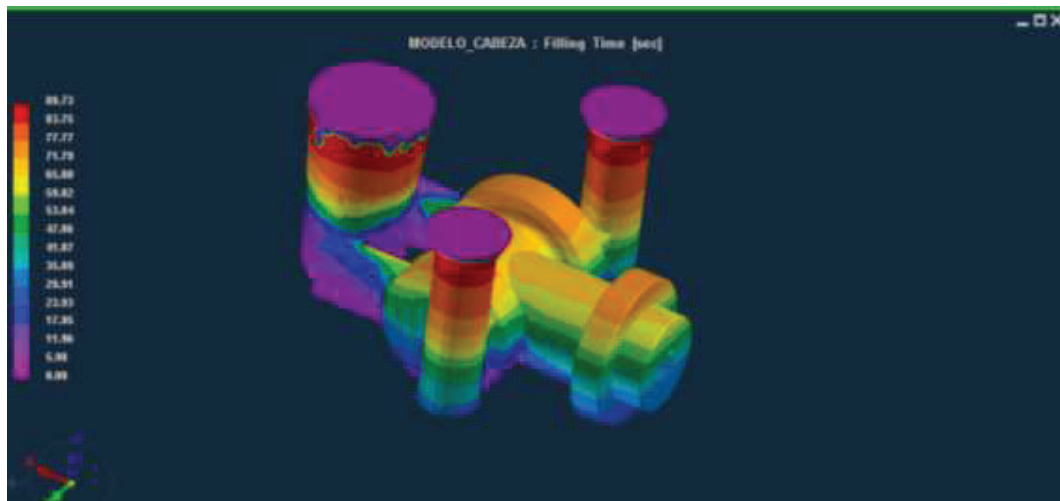


Figura 2.19. Tiempo de llenado en la cámara de presión.
(Fuente: Propia)

Al igual que el pistón, no se forman porosidades superficiales, pero en el plano XZ se observa la formación de porosidades internas alrededor del noyo. Esto se soluciona adicionando partículas metálicas en el cuerpo del macho, que acelere la transferencia de calor entre la pieza y el noyo y permita el enfriamiento de la zona crítica.



Figura 2.20. Porosidades en la cámara de presión.
(Fuente: Propia)

2.6. Preparación de los moldes

La fabricación de piezas fundidas debe responder a un proceso ordenado que garantice la obtención de piezas sin defectos o discontinuidades. Hay que tomar en cuenta que cada etapa compromete el resultado final. En esta etapa es importante la habilidad y experiencia del fundidor para obtener un moldeo de calidad.

2.6.1. Preparación de la mezcla de moldeo

Se mezcla la base refractaria (arena sílice) con bentonita, en un porcentaje del 2 al 4 % del peso total de la arena base. Luego se añade agua hasta obtener la uniformidad y humedad necesaria. Esto hace que la arena base adquiera una mayor refractariedad, permeabilidad y moldeabilidad



Figura 2.21. Mezcla de moldeo.
(Fuente: Propia)

2.6.2. Fabricación de noyos para modelos huecos

Los machos (noyos) se elaboran utilizando resinas como aglomerante de la arena. El laboratorio de fundición de la Facultad de Ingeniería Mecánica dispone de resina de base Fenólica e Isocianato. Se menciona este tipo de resinas debido a que se realizó un análisis mediante pruebas infrarrojo, en el Centro de Investigaciones Aplicadas a Polímeros (CIAP), cuyos resultados se muestran en el anexo 7.

El endurecimiento del noyo tiene lugar mediante la reacción entre la Resina A, Resina B y el catalizador. El último cumple la función de acelerar el proceso.

Mediante la experimentación se desarrollaron pruebas para seleccionar el proceso y los porcentajes adecuados en la obtención de los machos.

Masa del noyo del pistón: 475 [gr]

Masa del noyo de la cámara de presión: 450 [gr]

A continuación se detallan las cantidades usadas a base de la experimentación.

Tabla 2.8. Porcentajes para la fabricación de resinas.

| RESINAS | DENOMINACIÓN | PORCENTAJE (%) | DESCRIPCIÓN |
|-----------------|--------------|----------------|--|
| Base Fenólica | Resina A | 3 | Porcentaje con respecto a la masa total de arena usada para el noyo. |
| Base Isocianato | Resina B | 40 | Porcentaje con respecto al valor resultante de la resina A. |
| Catalizador | Catalizador | 10 | Porcentaje con respecto al valor resultante de la resina A. |

(Fuente: Propia)

Con estos porcentajes se logra tener un noyo con buena dureza superficial, buen acabado y de fácil extracción. El tiempo aproximado de secado es de 15 a 20 minutos. Este tiempo puede disminuir al aumentar el porcentaje de catalizador, sin embargo se recomienda no abusar de su uso ya que puede provocar problemas en el moldeo, la mezcla se endurecerá antes de llenar la caja de machos.

La forma de los noyos hizo necesario la utilización de una armadura de refuerzo para brindar más rigidez. Los machos más pequeños y sencillos se refuerzan con simples alambres de hierro adecuados al tamaño y al cometido del macho. (Capelo Edoardo, 1989)

Procedimiento de obtención:

1. Pesar la base refractariada o arena base según lo necesario, aumentar 50gr que contempla las pérdidas durante el proceso de fabricación. Para lograr un mejor acabado se recomienda lavar la arena y tamizarla.
2. Pesar en recipientes separados cada una de las resinas y el catalizador según los porcentajes señalados.
3. Preparar la caja de noyos y las armaduras de refuerzo.
4. Mezclar manual o mecánicamente la base refractaria con la resina A.
5. Adicionar a la mezcla la Resina B.
6. Colocar el catalizador y mezclar rápidamente.
7. Introducir la mezcla en la caja de noyos, no es necesario taconear con fuerza basta distribuir la mezcla dentro de la caja.
8. Dejar secar durante 20 minutos.
9. Desmoldear el noyo.



Figura 2.22. Noyo del pistón.
(Fuente: Propia)



Figura 2.23. Noyo de la cámara de presión.
(Fuente: Propia)

2.6.3. Moldeo

El moldeo se realiza en cajas de madera con las siguientes dimensiones:

| Pistón | Cámara |
|------------------|------------------|
| Largo: 400 [mm] | Largo: 650 [mm] |
| Ancho: 400 [mm] | Ancho: 500 [mm] |
| Altura: 240 [mm] | Altura: 320 [mm] |

Se coloca el modelo de madera recubierto de grafito dentro de la caja hembra. El modelo es cubierto con una capa de arena tamizada llamada arena de contacto. Sobre la cual va arena sin tamizar, denominada de relleno. La arena de relleno se añade por capas, taconeando, primero por los extremos y luego en el centro de la caja, este procedimiento se repite hasta llenar completamente la caja. La arena restante sobre la caja es retirada con la regleta hasta que la superficie quede completamente lisa.

Teniendo la caja hembra moldeada se voltea, quedando la superficie con el modelo hacia arriba. Luego se coloca la caja y el modelo macho para completar la forma de la pieza a obtener. Antes de colocar la mezcla de moldeo, debe existir una capa intermedia de arena base (sílice), que evita la unión entre la arena de la caja hembra y macho.



Figura 2.24. Moldeo en cajas de madera.
(Fuente: Propia)

- Moldeo de las piezas

Una vez terminado el proceso de taconeado, se realizan los canales de alimentación de las piezas, con cucharas y espátulas. Para retirar los modelos de las cajas moldeadas se utilizan un espiqueta y un martillo, se retira la pieza evitando que se dañe la forma de la pieza.

La cavidad moldeada se limpia con aire comprimido. Cuando la superficie moldeada está completamente limpia (sin residuos de arena), es recubierta con una mezcla de melaza y grafito, para obtener un buen acabado superficial de la pieza.



Figura 2.25. Moldeo de piezas.
(Fuente: Propia)

- Moldes

Después de pintar la superficie de la caja moldeada, se flamea por un período de 30 minutos, esto aumenta la dureza del molde y evita desprendimiento de arena.



Figura 2.26. Flameado de los moldes.
(Fuente: Propia)

Terminado el flameado de las cajas, se colocan los noyos en las cavidades del moldeo. Con los noyos ubicados en su lugar se procede a tapan las cajas de moldeo, observando que las guías de las cajas se encuentren correctamente puestas, se descende la caja lentamente y lo más paralela con respecto a la caja ubicada en la parte inferior.



Figura 2.27. Sellado de las cajas.
(Fuente: Propia)

2.7. Fusión y colado del metal

2.7.1. Preparación y cálculo de la carga

Los materiales a usar deben ser debidamente seleccionados. Si se trata de materiales nuevos deben tener el certificado, con la composición química y el porcentaje de impurezas que contiene. Si se va a trabajar con chatarra debe estar bien clasificada y limpia. (Titov & Stepánov, 1981, pág. 384)

Para la obtención del bronce al aluminio se hará una comparación de los componentes de los elementos aleantes con los de la norma ASTM B148 – 14, con el fin de estar dentro de los porcentajes establecidos en la norma. El tipo de bronce al aluminio tomado para la fabricación de las piezas es el UNS C95400, con los porcentajes de los elementos aleantes mostrados en la tabla 1.13.

Selección de la chatarra

Cobre: Proviene de chatarra de cobre. Alambre de cobre utilizado en las instalaciones de transmisión eléctrica de las redes de distribución de la Empresa Eléctrica Quito. El material de estos alambres es cobre de alta pureza.

Aluminio: La chatarra de aluminio proviene de perfiles utilizados para fabricación de ventanas, puertas etc. Según los catálogos de fabricantes este material contiene entre 95%- 98% de pureza, ver anexo 8 (CEDAL, 2008).

Hierro: Para conseguir Fe, se usa chatarra de acero comercial. Retazos pequeños de perfiles y placas de bajo espesor.

Ferroaleaciones: Para lograr la aleación se emplea ferroníquel y ferromanganeso con una composición 75% de níquel y manganeso y 25 % de hierro.

Cálculo de la carga

Consiste en determinar la masa de los distintos materiales en función de la composición química de la aleación que se busca obtener. Los datos de partida para el cálculo son la masa total necesaria y los porcentajes de la composición química, a esto se adicionan el valor de las pérdidas, que es el porcentaje de masa no recuperable en el quemado. Las pérdidas aparecen por la evaporación, la formación de óxidos, etc. (Titov & Stepánov, 1981)

Para determinar la masa total necesaria, se extrae la información de los programas CAD utilizados para el modelado de la pieza y los sistemas de alimentación. También se toma en cuenta las pérdidas que ocurre por oxidación y rebabas, también el metal que se pierde al escoriar o incluso cuando se derrama al momento del vertido, etc. Esto corresponde al 6% de la cantidad del metal útil. (Navas, Batista, & Suchkov, 1990)

Masa Pistón: 5,38 [kg]

Masa Cámara: 26,39 [kg]

Masa total: 31,77 [kg]

A este último valor se adiciona el 6% de pérdidas por oxidación, rebabas, etc.:

31,77 [kg] 100%

x [kg] 6%

La masa total necesaria es: 33,68 [kg]

A partir de esto se determina el valor de la masa de cada elemento dentro de la aleación:

Tabla 2.9. Composición química.

| Aleantes | Porcentaje |
|----------|------------|
| Cu | 83% |
| Al | 10.00% |
| Fe | 4% |
| Mn | 0.50% |
| Ni | 1.5% |
| Otros | 1% |

(Fuente: Propia)

Cobre: $33,68 \text{ [kg]} * 0,83 = 27,95 \text{ [kg]}$

Aluminio: $33,68 \text{ [kg]} * 0,10 = 3,37 \text{ [kg]}$

Hierro: $33,68 \text{ [kg]} * 0,04 = 1,35 \text{ [kg]}$

Manganeso: $33,68 \text{ [kg]} * 0,005 = 0,168 \text{ [kg]}$

Níquel: $33,68 \text{ [kg]} * 0,015 = 0,50 \text{ [kg]}$

Considerando las pérdidas de cada elemento tenemos:

Tabla 2.10. Pérdidas por fusión de los elementos aleantes del bronce al aluminio.

| Pérdidas por fusión | |
|---------------------|------------|
| Material | Porcentaje |
| Cu | 1,0 - 1,5 |
| Al | 2 - 3 |
| Mn | 2 - 3 |
| Ni | 1,2 |
| Fe | 1 |

(Fuente: Titov & Stepánov, 1981, pág. 385)

Cobre: $27,95 \text{ [kg]} * 0,015 = 0,42 \text{ [kg]}$

Aluminio: $3,37 \text{ [kg]} * 0,03 = 0,1 \text{ [kg]}$

Hierro: $1,35 \text{ [kg]} * 0,01 = 0,014 \text{ [kg]}$

Manganeso: $0,168 \text{ [kg]} * 0,03 = 0,005 \text{ [kg]}$

Níquel: $0,50 \text{ [kg]} * 0,012 = 0,006 \text{ [kg]}$

Ahora se determina la masa total de cada elemento:

Cobre: $27,95 \text{ [kg]} + 0,42 \text{ [kg]} = 28,37 \text{ [kg]}$

Aluminio: $3,37 \text{ [kg]} + 0,1 \text{ [kg]} = 3,47 \text{ [kg]}$

Hierro: $1,35 \text{ [kg]} + 0,014 \text{ [kg]} = 1,36 \text{ [kg]}$

Manganeso: $0,168 \text{ [kg]} + 0,005 \text{ [kg]} = 0,17 \text{ [kg]}$

Níquel: $0,50 \text{ [kg]} + 0,006 \text{ [kg]} = 0,51 \text{ [kg]}$

Luego se pesan los diferentes metales usados para la aleación. En el caso de ser necesario deben cortarse para que entren en el crisol.



Figura 2.28. Alambre de cobre cortado y enrollado.
(Fuente: <https://thumbs.dreamstime.com/x/copper-wire-19094525>.)

2.7.2. Método de carga del crisol

Al inicio el crisol es cargado con el cobre, hierro y las ferroaleaciones. En la base del crisol se coloca una capa de Borax, es útil como fundente del cobre, para proporcionar fluidez adecuada y aglomerar óxidos de impureza que aparecen en el proceso de fundición. (ASM International, 1998, pág. 978). La colada es protegida con vidrio roto a fin de evitar la oxidación y el quemado (Titov & Stepánov, 1981, pág. 387).

La carga debe fundirse hasta tener una mezcla líquida, una vez que toda la masa se ha fundido y alcanzado aproximadamente los $1200 \text{ }^{\circ}\text{C}$, se desoxida con fósforo de cobre. Antes de cargar el aluminio, este debe ser calentado, se añade en porciones, cada vez que se coloca una porción la colada debe mezclarse. (Titov & Stepánov, 1981, pág. 388)

Antes del vertido el metal debe sobrecalentarse en el horno para garantizar la separación de inclusiones no metálicas, gases y asegurarse que el metal se mantenga caliente durante

el transporte y el vertido dentro del molde. En las aleaciones de Cobre, hay que considerar la tendencia a la absorción de gases y la rápida pérdida de temperatura al momento de realizar el vertido. Al tener lista la aleación del metal fundido y las cajas de los moldes cerradas, se procede a verter la colada por los sistemas de alimentación verticales o bebederos. La forma de verter debe ser lenta al inicio y con chorro delgado, luego que el canal de alimentación está lleno debe aumentarse la velocidad. En el interior de la caja aparece una presión denominada metalostática, producida por el metal fundido al ingresar por los alimentadores de la caja. Para evitar derrames se coloca arena húmeda, en los contornos de la unión de la caja y sobre pesos encima las cajas.



Figura 2.29. Vertido del metal líquido.
(Fuente: Propia)

2.8. Operaciones post fundición

2.8.1. Desmoldeo

Las piezas se enfrían dentro de la arena de moldeo. El desmoldeo de aleaciones de cobre no presenta mayor dificultad, salvo las piezas con geometría compleja, que deben enfriarse completamente en el molde para evitar tensiones y deformaciones. Goyos (1978) recomienda que las aleaciones de cobre deben desmoldearse a temperaturas entre 250-350°C. (pág. 210)

El proceso consiste en extraer las piezas obtenidas, destruir el molde de arena de la caja y limpiar la arena de la superficie de la pieza. En esta etapa también se incluye la eliminación de los noyos internos.

2.8.2. Mecanizado

La pieza fundida contiene alimentadores, bebederos, mazarotas, rebabas, restos de mezcla de moldeo quemada en la superficie, etc., (Titov & Stepánov, 1981, pág. 16) ésta etapa contempla la extracción de estos elementos y el acabado para ajustar y lograr las dimensiones de diseño de las piezas.

El mecanizado realizado consiste en la extracción de todo el sistema de alimentación y el desbaste de la superficie para lograr un mejor acabado, esto se efectúa con máquinas como tornos, fresadoras, taladros, etc., cuya función es el arranque de viruta. Aquí las piezas llegan a tener un acabado superficial preliminar.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Resultados

A continuación se describen los resultados obtenidos concernientes a la obtención y maquinado de la pieza así como también a los ensayos realizados para comprobar las características del material. Las piezas se analizan mediante inspección visual, utilizando instrumentos de medición tales como flexómetro, y calibrador, para guardar los registros se utilizan cámaras fotográficas. En el análisis del material los equipos utilizados se describen en cada ensayo.

3.1.1. Acabado superficial y dimensionamiento de las piezas

3.1.2. Pistón sin maquinar

Pistón fundido sin extraer los canales de alimentación.



Figura 3.1. Vista frontal del pistón fundido.
(Fuente: Propia)



(a)

(b)

Figura 3.2. (a) Vista superior del pistón fundido (b) Cavity y detalle interno del pistón.
(Fuente: Propia)

3.1.3. Medidas de la pieza fundida



Figura 3.3. Diámetros externos e internos del Pistón.
(Fuente: Propia)

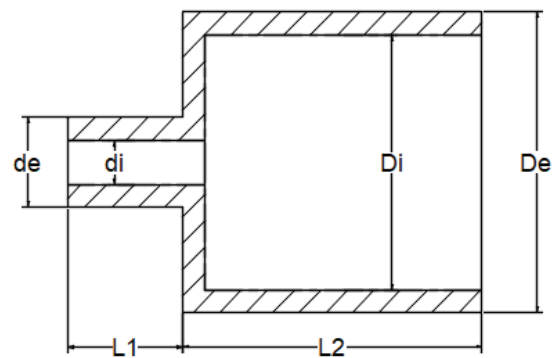


Figura 3.4. Esquema del pistón.
(Fuente: Propia)

Tabla 3.1. Medidas del pistón fundido.

| Dimensiones | Medida (mm) |
|-------------|-------------|
| Di | 64,2 |
| De | 83,6 |
| Di | 16,8 |
| De | 38,2 |
| L1 | 25,4 |
| L2 | 84,1 |

(Fuente: Propia)

3.1.4. Cámara de presión sin maquinar



Figura 3.5. Vista superior de la cámara de presión.
(Fuente: Propia)



Figura 3.6. Vista lateral de la cámara de presión.
(Fuente: Propia)

3.1.5. Medida de la Pieza fundida



Figura 3.7. Medidas generales de la cámara de presión.
(Fuente: Propia)

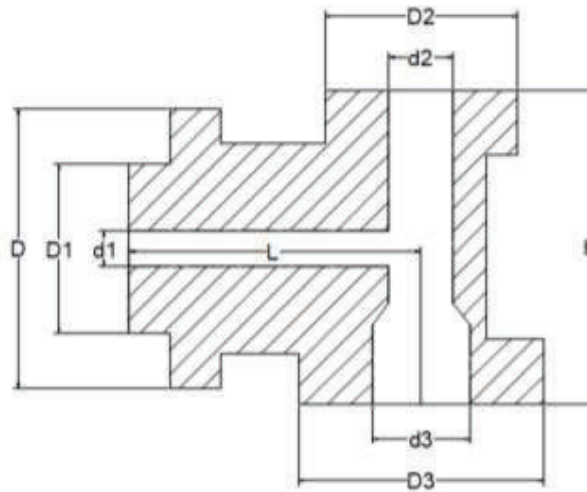


Figura 3.8. Esquema de la cámara de presión.
(Fuente: Propia)

Tabla 3.2. Dimensiones de la cámara de presión fundida.

| Dimensiones | Medida (mm) |
|-------------|-------------|
| D | 114,3 |
| D1 | 74,1 |
| D2 | 104,3 |
| D3 | 124,4 |
| d1 | 24,7 |
| d2 | 28,8 |
| d3 | 59,7 |
| L | 143,7 |
| H | 126,1 |

(Fuente: Propia)

3.1.6. Piezas maquinadas

Al diseñar los modelos de las piezas, se tomó en consideración las medidas de sobredimensionamiento (3 a 4 milímetros) para maquinado. Una vez obtenidas las piezas fundidas, se miden verificando que se encuentren dentro de las dimensiones establecidas para el maquinado.

Por la complejidad de la forma de las piezas, el maquinado se realizara en el torno.

El maquinado para materiales como el bronce al aluminio, se realiza con cuchillas de material de carburo debido a la dureza que presentan este tipo de aleaciones.

Como las piezas presentan exceso de material y rebabas producto de los defectos en las cajas de moldeo, se eliminan mediante el maquinado, hasta obtener un acabado previo de las piezas.

Con el arranque de viruta se observa que las piezas no tienen porosidades, agrietamientos o fisuras internas.

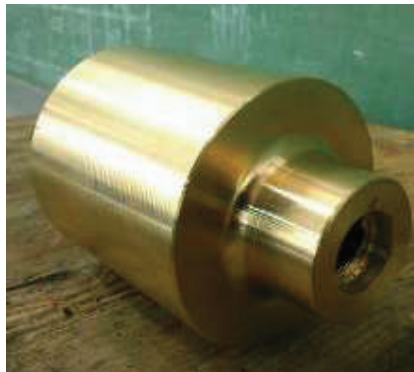


Figura 3.9. Pistón cilindrado y refrentado.
(Fuente: Propia)



Figura 3.10. Cámara de presión luego del cilindrado y refrentado de las bridas.
(Fuente: Propia)

3.1.7. Análisis del material

3.1.8. Ensayo de Dureza HRB

Equipo: Durómetro Rockwell HRB

Marca: HardRocker

Modelo: 150 A

Carga Mínima: 10 (kgf)

Carga máxima: 60, 100 y 150 (kgf)

Identador: Bola de 1/16 (pulg)

Aplicación de la fuerza mediante sistema de amortiguador hidráulico. Display análogo.

Tabla 3.3. Datos de dureza.

| N° | Dureza Rockwell B HRB | Dureza Brinell HB |
|----------|-----------------------------|----------------------|
| 1 | 60 | 102 |
| 2 | 60 | 102 |
| 3 | 63 | 106.3 |
| 4 | 65 | 110.3 |
| 5 | 60 | 102 |
| Promedio | 61.6 | 104.5 |

(Fuente: Propia)

3.1.9. Ensayo de tracción

Equipo: Maquina universal de ensayos

Marca: Tinius Olsen

Modelo: Súper L

Carga máxima: 60000 lbf

Tabla 3.4. Datos ensayo de tracción.

| Id. | Diámetro promedio | Carga máxima registrada | | Resistencia a la tracción | | % Elongación en 50 [mm] |
|----------|-------------------|-------------------------|--------|---------------------------|------|-------------------------|
| | mm | lbf | N | MPa | ksi | |
| T-1 | 12,64 | 51,199 | 11,510 | 408,0 | 59,2 | 2,8 |
| T-2 | 12,64 | 57,498 | 12,926 | 458,2 | 66,5 | 3,3 |
| Promedio | 12,64 | 54,349 | 12,218 | 433,1 | 62,9 | 3,1 |

(Fuente: Laboratorio de Análisis de esfuerzos y vibraciones)

No presenta resistencia a la fluencia. Ver anexo 9.



Figura 3.11. Probeta normalizada ensayo de tracción.
(Fuente: Propia)

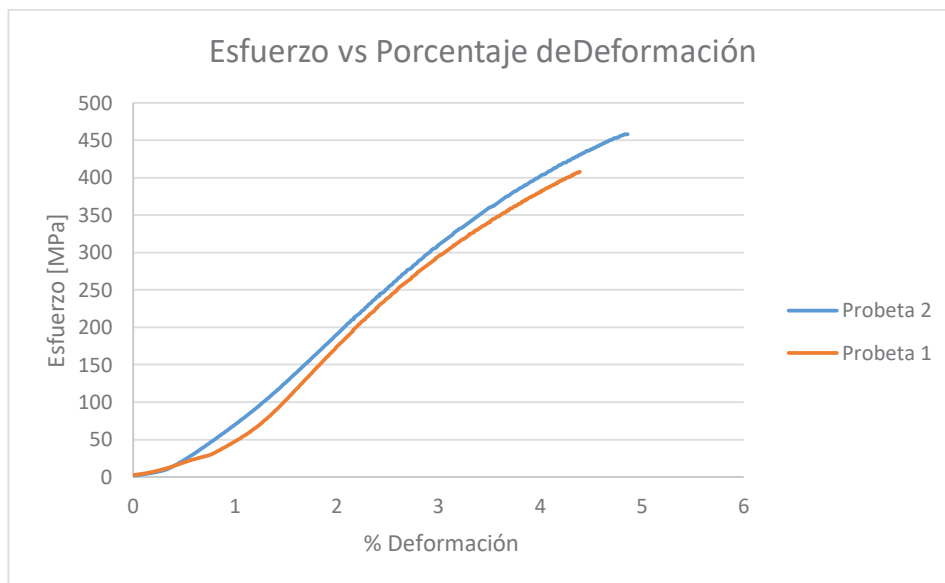


Figura 3.12. Diagrama esfuerzo vs porcentaje de deformación.
(Fuente: Propia)

3.1.10. Metalografía

Equipo: Microscopio Stereo-zoom

Marca: Meiji

Cabezal: Trinocular

Lente: SXD 10x

Materiales:

Alcohol etílico de 99,8% de concentración

Reactivo: Cloruro férrico



Figura 3.13. Probeta pulida.
(Fuente: Propia)



Figura 3.14. Probeta con ataque químico.
(Fuente: Propia)

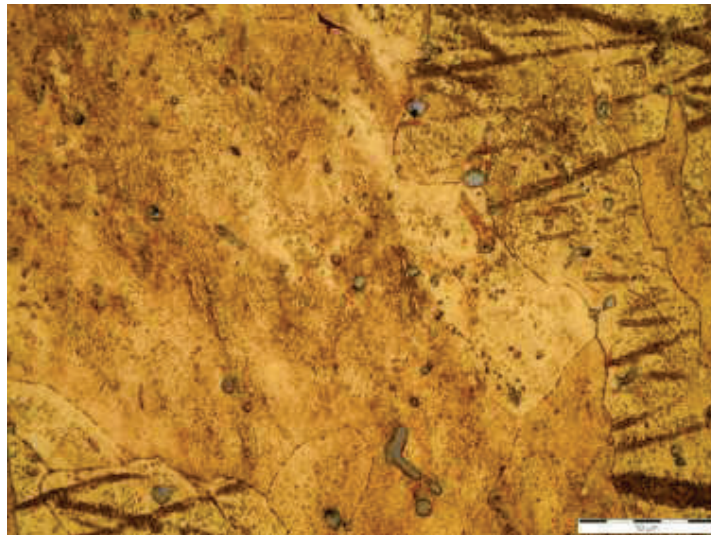


Figura 3.15. Microestructura de la probeta fundida con ataque químico, amplificación 500x.
(Fuente: Propia)

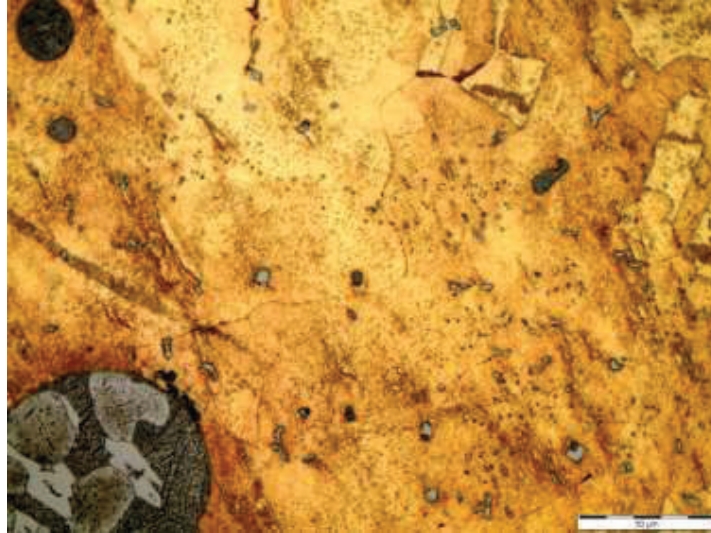


Figura 3.16. Microestructura de la probeta fundida con ataque químico, amplificación 500x.
(Fuente: Propia)

3.1.11. Espectrometría por Chispa

Equipo: Espectrómetro de chispa.

Marca: Bruker.

Modelo: Q2 ION.

Se toman tres mediciones, el valor final es el promedio.

Tabla 3.5. Composición química.

| Elemento | Símbolo | Valor (%) |
|-----------|---------|-----------|
| Cobre | Cu | 83,370 |
| Aluminio | Al | 9,406 |
| Hierro | Fe | 5,722 |
| Níquel | Ni | 0,837 |
| Manganeso | Mn | 0,129 |
| Otros | -- | 0,536 |

(Fuente: Propia)

Ver detalles en anexo 10.

3.2. Discusión

3.2.1. Acabado superficial y dimensionamiento de las piezas

A diferencia de otros procesos de producción donde los resultados son examinados únicamente en torno a la presión y exactitud dimensional, en los procesos de fundición la precisión se evalúa por tres aspectos como se muestra en la figura 3.15.

La precisión dimensional, el acabado superficial y la capacidad de reproducir detalles complejos se pueden analizar independientemente, sin embargo para evaluar la precisión de una pieza fundida los tres aspectos se correlacionan. Cada etapa dentro del proceso de fundición compromete la precisión final de la pieza.

Pueden presentarse fallos acarreados desde la etapa de moldeo, dados por el desgaste de las herramientas de trabajo, por ejemplo el desgaste o distorsión de las guías de las cajas de moldeo, pueden ocasionar un mal ajuste entre las cajas acompañado de desmoronamiento de arena y esto a su vez provoca una alteración en la precisión de la pieza.

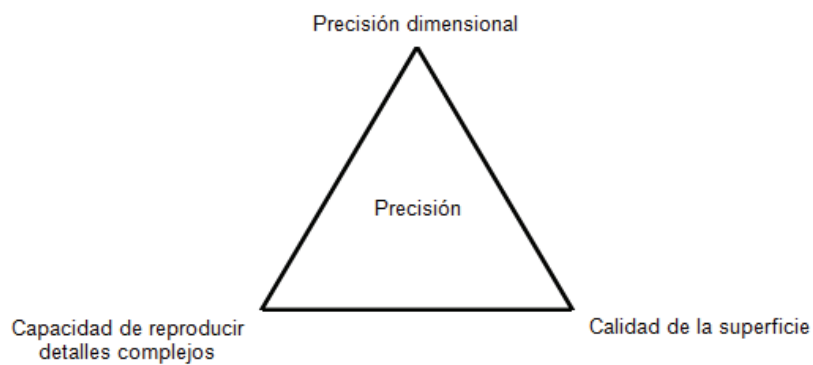


Figura 3.17. Concepto de precisión en fundición.
(Fuente: Beeley & Smart, 1995, pág. 5)

También las dimensiones del molde, se alteran cuando el modelo abandona el molde, debido a los movimientos y las vibraciones provocados para sacar el modelo, esto es difícil de dimensionar o controlar.

El concepto de precisión debe considerarse, naturalmente, junto con otros atributos de calidad de las piezas fundidas, por ejemplo, baja incidencia de inclusiones no metálicas, películas de óxido, porosidad y grietas (Beeley & Smart, 1995, pág. 5).

3.2.2. Análisis de la precisión dimensional

Para el análisis de las dimensiones de las piezas, se contrastan las dimensiones de las piezas con las dimensiones de los modelos, y con las dimensiones de la pieza final, que se logra luego del maquinado como se muestra a continuación, el sobre espesor de maquinado es la diferencia entre la medida de la pieza fundida y la medida de la pieza final.

Tabla 3.6. Comparación de dimensiones del Pistón.

| Dimensiones | Medida pieza fundida (mm) | Medida Modelo (mm) | Medida pieza final (mm) | Sobre espesor para maquinado (mm) |
|-------------|---------------------------|--------------------|-------------------------|-----------------------------------|
| Di | 64,2 | 64 | 64 | 0,2 |
| De | 83,6 | 85 | 80 | 3,6 |
| Di | 16,8 | 17 | 17,3 | 0,5 |
| De | 38,2 | 39 | 35 | 3,2 |
| L1 | 26,4 | 27 | 22 | 4,4 |
| L2 | 83,2 | 85 | 80 | 3,2 |

(Fuente: Propia)

El pistón en cuanto a dimensiones tiene buena precisión, para llegar a la pieza final es necesario cilindrar únicamente de 3 y 4 milímetros que fue lo previsto cuando se construyeron los modelos. En el fenómeno de contracción las dimensiones disminuyen linealmente alrededor de 1 milímetro.

Tabla 3.7. Comparación de dimensiones de la Cámara de presión.

| Dimensiones | Medida pieza fundida (mm) | Medida Modelo (mm) | Medida pieza final (mm) | Sobre espesor para maquinado (mm) |
|-------------|---------------------------|--------------------|-------------------------|-----------------------------------|
| D | 114,3 | 115 | 110 | 4,3 |
| D1 | 74,1 | 75 | 70 | 4,1 |
| D2 | 104,3 | 105 | 100 | 4,3 |
| D3 | 124,4 | 125 | 120 | 4,4 |
| d1 | 24,7 | 25 | 25 | 0,3 |
| d2 | 28,8 | 30 | 30 | 0,2 |
| d3 | 59,7 | 60 | 60 | 0,3 |
| L | 143,7 | 145 | 142 | 1,7 |
| H | 126,1 | 130 | 120 | 6,1 |

(Fuente: Propia)

Las dimensiones de la cámara de presión también son precisas con respecto a las medidas generales, el maquinado consiste en cilindrar los anillos circulares y refrentar las caras. Los diámetros de las cavidades huecas, son cercanas al valor de la pieza final, esto demuestra que el noyo es resistente a la presión que ejerce el metal fundido y no se contrae mayormente.

3.2.3. Análisis del acabado superficial



Figura 3.18. Discontinuidades superficiales del pistón.
(Fuente: Propia)

El acabado superficial del pistón presenta algunas irregularidades, no existe homogeneidad en la superficie, hay zonas rugosas y otras lisas, este problema está asociado al acabo superficial del molde.

Las rebabas en las compuertas, para el caso de moldeo con arena en verde son inevitables. Los noyos deben ingresar fácilmente en las compuertas, es decir tener una holgura para que al momento de cerrar las cajas, no choque con las paredes de las compuertas superiores. Las rebabas de las compuertas no son un problema porque se pueden eliminar con facilidad.

Las rebabas en la unión de los modelos y la línea de soldadura se pueden disminuir mejorando el procedimiento de moldeo y el modelo. Para desaparecer este defecto, la unión del macho con hembra de los modelos debe ser exacta y la línea de unión debe ser casi imperceptible.

Se observa en la pieza una zona con inclusiones de arena quemada, que no se pueden remover con el cepillo metálico, este defecto se elimina en el proceso de maquinado ya que no afecta los espesores mínimos de la pieza.

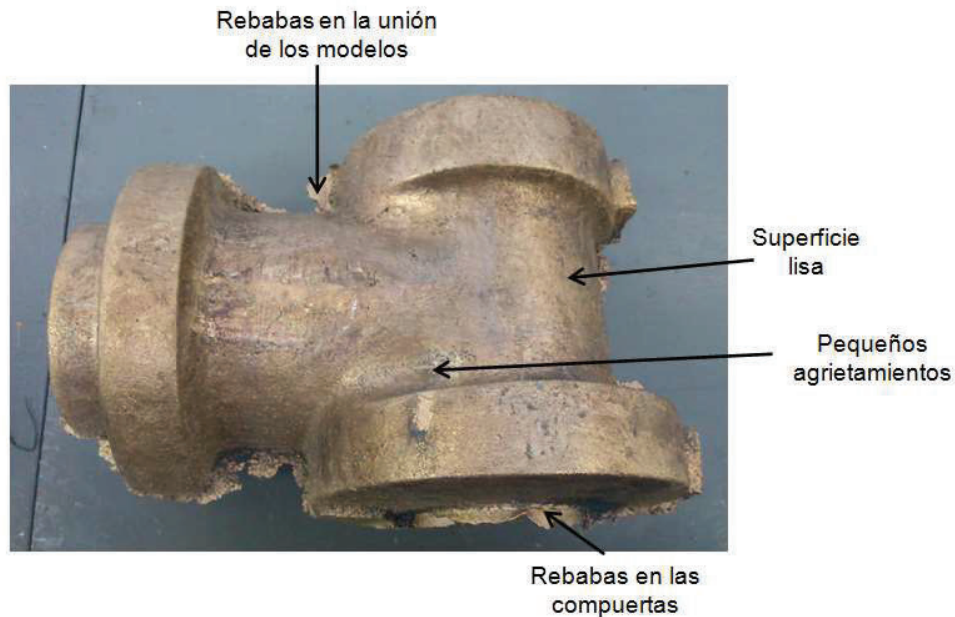


Figura 3.19. Discontinuidades superficiales de la cámara de presión.
(Fuente: Propia)

El acabado superficial de la cámara de presión al igual que el pistón tiene rebabas en las compuertas y en la unión de los modelos, que responden a las mismas razones que se analizaron antes. La superficie tiene un mejor acabado que el pistón, la mayoría de la superficie es lisa y no tiene restos de arena quemada, ni óxidos.

Existe la presencia de pequeños agrietamientos, encontrados en una zona sensible, donde hubo una la posibilidad de que se produzca un rechupe, debido a la gran concentración de masa. El diseño del sistema de alimentación evitó que se formen rechupes y porosidades internas.

3.2.4. Capacidad de reproducir detalles complejos

Si bien el pistón tiene una forma geométrica sencilla (cilindro de dos secciones diferentes), su cavidad interna posee un detalle complejo importante. Tiene un volumen sobre el cual se asientan los pasadores que sostienen la biela y que soportan grandes esfuerzos. Esta geometría solo podría ser conseguida mediante forja, para pistones de aluminio, por eso lograr este detalle mediante fundición de Bronce al Aluminio se convierte en una ventaja significativa.



Figura 3.20. Detalle interno del pistón.
(Fuente: Propia)

La forma geométrica de la cámara de presión es difícil de obtener mediante otros procesos de producción, al tratarse de una tubería en T hueca, maciza y destinada a soportar grandes presiones, su fabricación, solo es posible mediante un proceso de fundición. La posibilidad de reproducir las cavidades internas ahorran el tiempo de maquinado.



Figura 3.21. Detalles interno de la cámara de presión.
(Fuente: Propia)

De acuerdo a esto se puede concluir que las piezas fundidas responden a los requerimientos generales en cuanto a dimensiones, acabo superficial y forma. Por lo tanto son piezas que conservan los criterios de calidad.

3.2.5. Análisis del material

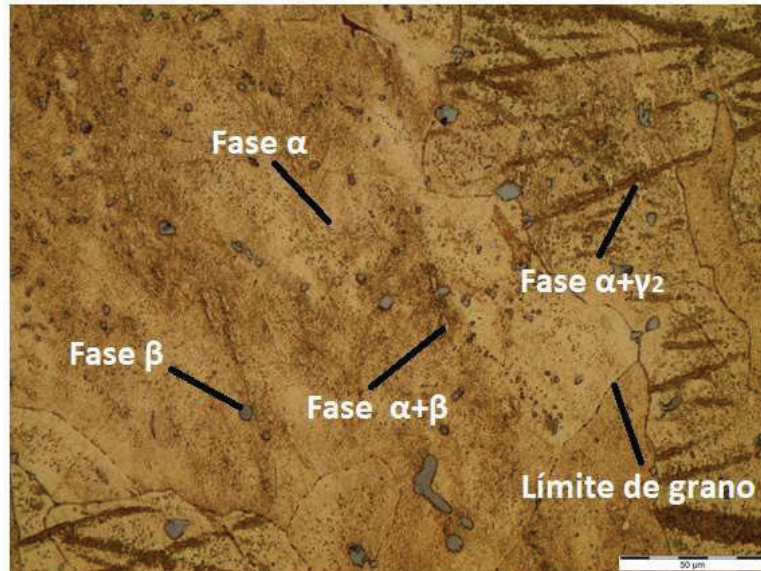


Figura 3.22. Microestructura de la probeta fundida con ataque químico, amplificación 500x.
(Fuente: Propia)

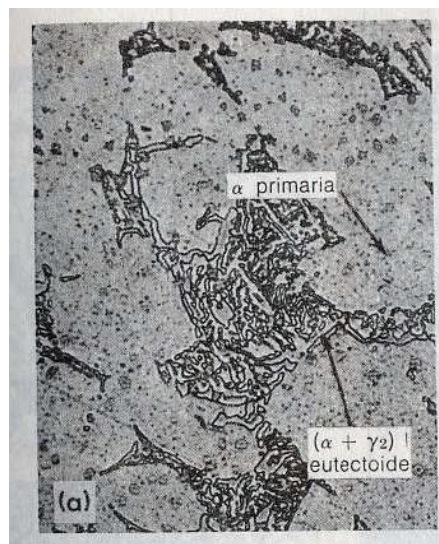


Figura 3.23. Microestructura de Bronce al 10 % aluminio en las fundiciones.
(Fuente: Avner, 1995, pág. 473)

La microestructura de la figura se asemeja a la figura 12.15 (a) del libro de Avner, donde se evidencia una matriz de base de cobre (fase α), aluminio de fase β , aluminio y cobre de fase $\alpha + \beta$ y una fase $\alpha + \gamma_2$ eutectoide granular. En la fase $\alpha + \beta$ se debe a la no transformación del cobre y aluminio en borde de grano. En la fase $\alpha + \gamma_2$, está compuesta por los aleantes (aluminio, hierro y níquel), que empiezan formarse por la descomposición de la fase β .

Dureza:

La dureza promedio de la probeta es de 61,6 en escala Rockwell B (104,4 dureza Brinell), valor menor a la establecida en la norma ASTM B148 – 14 que es igual a 110 Brinell. Esto se debe a la variación de concentración de los elementos aleantes como el hierro y el manganeso que actuando conjuntamente altera la resistencia mecánica de la aleación.

Ensayo de tracción:

El esfuerzo último promedio de las dos probetas es de 433,1 [MPa], cuyo valor es menor al de la norma ASTM B148 – 14 donde el valor del esfuerzo último es de 515 [MPa]. El valor del esfuerzo a la fluencia en las probetas no se pudo obtener mediante el ensayo, y respecto a la norma se tiene un valor de 205 [MPa].

Los esfuerzos obtenidos en las probetas mediante el ensayo de tracción presentan una gran diferencia en cuanto a la norma establecida (ASTM B148 – 14), esto se debe principalmente al lugar de obtención de las probetas, ya que fueron obtenidas de los canales de alimentación de la pieza. Se evidencia la presencia de porosidades en las probetas, esto se debe a los alimentadores que sirven como salida de gases del material fundido en el proceso de colado. Las porosidades actúan como concentradores de esfuerzos ocasionando la falla del material, es por eso que las probetas se asemejan a un material frágil, con un límite de fluencia muy bajo o nulo dependiendo del material de estudio.

Composición química:

De acuerdo al análisis químico de la probeta obtenida mediante el proceso de fundición, se tiene una aleación con 83,4 % de cobre, 9,4 % de aluminio, 5,7 % de hierro, 0,13 % de manganeso y 0,8 % de níquel. Los valores obtenidos de la aleación se encuentran dentro de los rangos presentes en la norma ASTM B148 – 14, para fundiciones en arena de aleaciones de bronce al aluminio.

Para el análisis global, se parte de la inspección visual de las piezas obtenidas, comprobando que tienen un buen acabado superficial y la forma completa de las mismas, con sus respectivas medidas para el maquinado, como se evidencia en las tablas 3.6 y 3.7. Tanto la espectrometría, como las metalografías corroboran las características del material en cuanto a composición química y a microestructura. Los porcentajes de los aleantes presentes en aleaciones de Bronce al aluminio, se pueden observar en la tabla 3.5. En cuanto a las propiedades mecánicas del material, se tienen variaciones en la dureza, resistencia última y resistencia a la fluencia. Esto interfiere en la identificación y determinación del material ya que las propiedades pueden asemejarse a las de otro tipo de aleación de Bronce al aluminio, sin embargo los resultados pueden mejorar si se realizan tratamientos térmicos a la fundición.

4. CONCLUSIONES

El moldeo debe realizarse sobre una superficie plana y lisa, además se debe cuidar que el ensamble entre ambas partes de las cajas sea exacto. No debe existir juego entre las guías que ayudan a cerrar las cajas, ya que cualquier desviación al momento de ensamblar las cajas puede originar desprendimiento de arena al interior, que a su vez genera arrastre de arena al verter el metal fundido.

La forma y el acabado superficial de los modelos son factores importantes para evitar la retención de arena en el proceso de desmoldeo. Es recomendable realizar pruebas de moldeo para identificar si existe retención. No se admite ninguna arista viva, estas se rompen con facilidad, y aumentan el riesgo de tener problemas en la pieza final.

Las dimensiones de los noyos deben ser de 1 a 2 milímetros, más pequeñas, en relación a las compuertas de los modelos de la pieza (lugar donde se asientan los noyos). Esto evita que al cerrar las cajas, el noyo desmorone arena. Se debe verificar que el noyo se asiente con la misma holgura en la caja hembra como en la caja macho. En la construcción de piezas cilíndricas huecas, el eje del noyo y el molde deben estar alineados de manera precisa.

El moldeo químico es otra alternativa para la fabricación de las piezas, en la práctica se comprobó que evita el desmoronamiento de arena y permite una mayor manipulación del molde y las cajas, pero compromete el acabo superficial de la pieza, porque el uso de resinas en exceso hace que se queden residuos de arena quemada en la superficie, estos residuos son más difíciles de remover que los residuos de arena en verde.

Los bebederos, respiraderos y alimentadores deben ser de las dimensiones previamente calculadas y diseñadas mediante el uso de un software de simulación. La ubicación del sistema de alimentación se determina mediante el método de nudos térmicos, que muestra las zonas últimas en solidificarse. El uso del software de simulación, optimiza el proceso de fundición, permite observar el comportamiento del fluido y la solidificación, brinda la forma final del sistema de alimentación. Si se desea modificar alturas o diámetros del sistema de alimentación, este debe ser sometido a una nueva simulación y no ser probado en la práctica directamente.

Las piezas obtenidas en bronce al aluminio presentan dimensiones menores a las planteadas en los planos de los modelos, esto ocurre por la contracción del metal al solidificarse. Se conservan entre 3 a 4 milímetros de sobre espesor, destinados al

maquinado. No se pueden hacer un sobredimensionamiento deliberado, eso aumenta el tiempo de maquinado, y por lo tanto el costo general de la opción de la pieza.

La aleación de cobre tiende a enfriarse rápidamente al añadir el aluminio en el horno, por eso antes de corlar se debe elevar la temperatura del horno hasta llegar al sobrecalentamiento. La colada debe ser protegida con desgacificantes y desoxidantes. En el país las empresas fundidoras tienen problemas en cuando a la adquisición de estos insumos, por eso recurren a utilizar otras alternativas como son el vidrio picado y la arena sílice que actúan como desgacificantes. El Cuprofosforo es el desoxidante para aleaciones de cobre y permite la cohesión de los aleantes, lamentablemente este insumo no puede ser reemplazado.

Las ferroaleaciones deben estar acompañadas de la hoja técnica para conocer con exactitud su composición. Una alternativa que disminuye los costos y no perjudica el resultado final, es la utilización de monedas de 5ctvs, en lugar de ferroníquel. La chatarra del hierro debe provenir de retazos de perfiles o platinas de bajo espesor ya que el punto de fusión mayor al del cobre.

El material obtenido fue un bronce con 83% de Cu, 9,4% de Al, 5,72% de Fe, 0,13% de Manganeso y 0,84% de Níquel que corresponde al bronce C95400 según la norma ASTM B148 – 4. Esto muestra que es posible llegar al material deseado si se conoce la composición química y el porcentaje de quemado de los materiales. La variación con respecto a la norma está en el rango de 0,06% que es bastante aceptable. De acuerdo al análisis metalográfico el material es una aleación con una matriz de base de cobre, fase α , base de aluminio fase β y la fase $\alpha + \gamma_2$ que es la fase donde se encuentran los aleantes usados en la aleación (aluminio, hierro y níquel).

La velocidad del pistón debe ser la mitad de la velocidad máxima que es de 1,5 [m/s], esto se logra corrigiendo la dimensión del radio del cigüeñal, que para este caso debería aumentar hasta un radio de 70 [mm], sin modificar las revoluciones del motor ya que las 400 rpm con las que se trabaja es un promedio del valor óptimo con que se mueven éste tipo de bombas.

El espesor de pared de la cámara de presión al soportar una presión de 6061 [PSI], no va presentar daños ya que el esfuerzo generado en la pared es de $13,96 \left[\frac{N}{mm^2} \right]$, que está en función de los radios interior y exterior. Al disminuir el radio exterior se incrementa el esfuerzo admisible generado en la pared de la cámara, y menor a la resistencia última del material que es de $515 \left[\frac{N}{mm^2} \right]$.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Anchaluisa, S. M., & Serrano, T. J. (2012). *Determinación del proceso de producción por fundición de antenas alimentadoras de energía para el Sistema Integrado Trolebús en la ciudad de Quito*. Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- Anup R., P. (Junio de 2014). <http://gnu.inflibnet.ac.in/handle/123456789/1156>. Recuperado el 21 de Febrero de 2017, de <http://gnu.inflibnet.ac.in/bitstream/123456789/1156/1/Anup%20R.%20Patel.pdf>
- ASM International. (1998). *ASME HANDBOOK Casting*. ASM International.
- ASTM International. (1 de Abril de 2014). *Standard Specification for Aluminum-Bronze Sand Castings*.
- Avner, S. H. (1995). *Introducción a la metalurgia física*. México: McGraw-Hill.
- Beeley, P. R., & Smart, R. F. (1995). *Investment Casting*. London: The University Press Cambridge.
- Budynas, R. G., & Nisbett, J. K. (2008). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley* (Octava ed.). México: Mc Graw-Hill.
- Calderón F. Edisson, F. (2012). *Elaboración de un procedimiento de fabricación de los patines de conducción eléctrica de cables de alta tensión en troles*. Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- Capelo Edoardo. (1989). *Tecnología de la Fundición*. Estados Unidos: McGraw Hill.
- CEDAL. (2008). *ContruEX*. Obtenido de http://construex.com.ec/c/pdf_27.pdf
- Cengel Yunus, A., & Boles Michael, A. (2009). *Termodinámica*. México: McGraw Hill.
- CTP Quality Products. (2016). *costex.com*. Obtenido de costex.com: <http://costex.com/Library/articles/IT05S.pdf>

- Egas, I. (Agosto de 2011). *blog.utp.edu.col*. Obtenido de <http://blog.utp.edu.col/vanegasfiles201108Cap5.pdf>
- Eulogio, S., Oswaldo, R. L., Jullio, Y. D., & Aurelio, L. S. (Junio de 2005). <http://sisbib.unmsm.edu.pe/>. Obtenido de http://sisbib.unmsm.edu.pe/http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/publicaciones/indata/Vol8_n1/a03.pdf
- Fernández, D. P. (2005). <http://es.pfernandezdiez.es/?pageID=5>. Recuperado el 13 de Diciembre de 2016, de <http://files.pfernandezdiez.es/Bombas/PDFs/BOMBAS06.pdf>
- GASO. (30 de Marzo de 2017). *Gasos.com*. Recuperado el 24 de Junio de 2017, de <https://www.gaso.com/pumps/wheatley-t365-pump>
- Gere, J. M. (2002). *Mecánica de materiales*. México: McGraw-Hill.
- Gómez B., J. A., Parra E., Y., & Paneque R., P. (Marzo de 2010). *scielo.sld.cu*. Obtenido de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2071-00542010000100005
- Goyos, L., & Martínez, H. (1978). *Tecnología de la Fundición II*. La Habana: ISPJAE.
- Hernández Avendaño, J. L. (2008). <http://repositorio.uis.edu.co/jspui/>. (U. I. Santander, Ed.) Recuperado el 2 de Enero de 2017, de <http://repositorio.uis.edu.co/jspui/bitstream/123456789/6009/2/140181.pdf>
- Igor J. Karassik, J. P. (2001). PUMP HANDBOOK. En J. P. Igor J. Karassik, *PUMP HANDBOOK* (pág. 3. 24). New York: Mc GRAW-HILL.
- Kenneth J, M. (1989). *Bombas selección, uso y mantenimiento*. México: Mc Graw-Hill.
- Konečná, R., & Fintová, S. (2014). <http://www.intechopen.com/>. Recuperado el 27 de Noviembre de 2016, de http://www.intechopen.com/http://cdn.intechopen.com/pdfs/30472/InTech-Copper_and_copper_alloys_casting_classification_and_characteristic_microstructures.pdf

- Mott, R. L. (2006). *Mecánica de fluidos*. México: Pearson Educación.
- Navas, M. E., Batista, C. A., & Suchkov, A. N. (1990). *Métodos de cálculo en fundición*. Holgín.
- Rodrigo Cuesta, V. (2010). *Modelado, simulación y cálculo estructural de una bomba de pistones. Aplicación docente*. Leganés, España: Universidad Carlos III de Madrid.
- Sonar, D. K., & Chattopadhyay, M. (2015). Theoretical Analysis of Stress and Design of Piston Head using CATIA & ANSYS. *International Journal of Engineering Science Invention*, 52-61.
- SUMITEC. (s.f.). <http://www.sumiteccr.com>. Obtenido de <http://www.sumiteccr.com/Aplicaciones/Articulos/pdfs/UNS%20C-95400.pdf>
- Taylor, G., & Hicks, B. (1988). *Bombas su selección y aplicación*. México: C.E.C.S.A.
- Titov, N. D., & Stepánov, Y. A. (1981). *Tecnología del proceso de fundición*. URSS: Mir Moscú .
- Viejo Zubicaray, M., & Álvarez Fernández, J. (2003). *Bombas teoría, diseño y aplicaciones*. México: Noriega Editores.

ANEXOS

Anexo 1. Propiedades del Bronce al Aluminio.

BRONCE AL ALUMINIO (UNS C95400)

1. Descripción: Buena resistencia al desgaste y susceptible al tratamiento térmico. Este material es muy duro y resistente a la abrasión. Tiene excelente resistencia mecánica y a la abrasión con propiedades de mecanizado razonables.

2. Normas involucradas: ASTM B148 / B505

3. Propiedades mecánicas: Resistencia a la fluencia: 205 MPa (29.7 KSI)
Resistencia máxima: 515 MPa (74.7 KSI)
Resistencia a la compresión 940 Mpa (136 KSI)
Elongación 12% (en 50mm)
Reducción de área: 12%
Módulo de elasticidad: 110 GPa (16000 KSI)
Maquinabilidad: 60% (C36000=100%)

4. Propiedades físicas: Densidad 7,45 g/cm³ (0,269 lb/in³)

5. Propiedades químicas: 83,0 % Cu mín
10,0 – 11,5 % Al
3,0 – 5,0 % Fe
2,5 % Ni máx.
0,5 % Mn máx.

6. Usos: impellers para bombas, rodamientos, engranes, tornillos, asientos de válvula, guías y otras piezas que no deban provocar chispa.

NOTA:

Los valores expresados en las propiedades mecánicas y físicas corresponden a los valores promedio que se espera cumplir el material. Tales valores son para orientar a aquella persona que debe diseñar o controlar algún componente o estructura pero en ningún momento se deben considerar como valores exactamente exactos para su uso en el diseño.

| Properties | Metric | Imperial |
|---|----------|------------|
| Hardness, Brinell (.as cast; 3000 kg) | 170 | 170 |
| Hardness, Brinell(TQ50 temper; 3000 kg) | 195 | 195 |
| Hardness, Rockwell B (as cast) | 83 | 83 |
| Hardness, Rockwell B (TQ50 temper) | 94 | 94 |
| Tensile strength, ultimate (as cast) | 515 MPa | 74700 psi |
| Tensile strength, ultimate (TQ50 temper) | 620 MPa | 89900 psi |
| Tensile strength, yield (as cast) | 205 MPa | 29700 psi |
| Tensile strength, yield(TQ50 temper) | 310 MPa | 45000 psi |
| Elongation at break (TQ50 temper, in 50 mm) | 8% | 8% |
| Elongation at break (as cast, in 50 mm) | 12% | 12% |
| Reduction of area (TQ50 temper) | 6% | 6% |
| Reduction of area (as cast) | 12% | 12% |
| Creep strength (for 10E-5%/h, at 425°C) | 20.0 MPa | 2900 psi |
| Creep strength (for 10E-5%/h, at 370°C) | 30.0 MPa | 4350 psi |
| Creep strength (for 10-E5%/h, at 315°C) | 51.0 MPa | 7400 psi |
| Creep strength (for 10E-5%/h, at 230°C) | 115 MPa | 16700 psi |
| Modulus of Elasticity | 110 GPa | 16000 ksi |
| Compressive strength (as cast) | 940 MPa | 136000 psi |
| Compressive strength (TQ50 temper) | 1070 MPa | 155000 psi |
| Poisson's ratio | 0.316 | 0.316 |
| Charpy impact (keyhole, TQ50 temper) | 9.00 J | 6.64 ft-lb |
| Charpy impact (keyhole, as cast) | 15.0 J | 11.1 ft-lb |
| Izod impact (TQ50 temper) | 15.0 J | 11.1 ft-lb |
| Izod impact (as cast) | 22.0 J | 16.2 ft-lb |
| Fatigue strength (@# of cycles 1.00e+8 , reverse bending) | 240 MPa | 34800 psi |
| Machinability (UNS C36000 (free-cutting brass) = 100%) | 60% | 60% |
| Shear modulus | 41.0 GPa | 5950 ksi |

Thermal Properties

Newsletters you may be interested in



Heat Treatment
(Preview)



Mechanical & Physical Properties Testing
(Preview)



Rheology & Viscometry
(Preview)

[See all Newsletters »](#)

Anexo 2. Tipos de Bronce al aluminio.

TABLE 2 Mechanical Requirements

| Classification | Aluminum Bronze | | Nickel Aluminum Bronze | | Silicon Aluminum Bronze | | Manganese-Nickel Aluminum Bronze | | Aluminum Bronze | |
|---|-----------------|-------------------|------------------------|------------------------------------|-------------------------|---------------------|----------------------------------|---------------------|------------------------------------|---------------------|
| | As-Cast | C95400 and C95410 | As-Cast | C95820 | C95600 | C95700 | C95900 ^A | C95900 ^B | As-Cast | C95500 |
| Copper Alloy UNS No. | C95200 | C95300 | C95400 and C95410 | C95820 | C95600 | C95700 | C95900 ^A | C95900 ^B | As-Cast | C95500 |
| Tensile strength, min, ksi ^C (MPa) ^D | 65 (450) | 65 (450) | 75 (515) | 94 (650) | 60 (415) | 90 (620) | 85 (585) | ... | 90 (620) | 90 (620) |
| Yield strength, ^E min, ksi ^C (MPa) ^D | 25 (170) | 25 (170) | 30 (205) | 39 ^F (270) ^F | 28 (195) | 40 (275) | 35 (240) | ... | 39 ^F (270) ^F | 40 (275) |
| Elongation in 2 in. (50.8 mm), % | 20 | 20 | 12 | 13 | 10 | 20 | 15 | ... | 13 | 20 |
| Brinell hardness No. ^G (3000-kg load) | 110 | 110 | 150 | 190 | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| Heat-Treated | | | | | | | | | | |
| Copper Alloy UNS No. | C95300 | C95400 and C95410 | C95500 | C95520 ^H | C95520 ^H | C95520 ^H | C95520 ^H | C95520 ^H | C95520 ^H | C95520 ^H |
| Tensile strength, min, ksi ^C (MPa) ^D | 80 (550) | 90 (620) | 110 (760) | 125 (862) | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| Yield strength, ^E min, ksi ^C (MPa) ^D | 40 (275) | 45 (310) | 60 (415) | 95 ^F (655) ^F | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| Elongation in 2 in. (50.8 mm), % | 12 | 6 | 5 | 2 | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| Brinell hardness No. ^G (3000-kg load) | 160 | 190 | 200 | 255 ^I | ... | ... | ... | ... | ... | 241 min |

^A As cast or temper annealed.

^B Normally supplied annealed between 1100 and 1300°F for 4 h followed by air cooling.

^C ksi = 1000 psi.

^D See Appendix X1.

^E Yield strength shall be determined as the stress producing an elongation under load of 0.5 %, that is, 0.01 in. (0.254 mm) in a gage length of 2 in. (50.8 mm).

^F Yield strength at 0.2 % offset, min, ksi^C (MPa)^D.

^G For information only.

^H Copper Alloy UNS No. C95520 is used in the heat-treated condition only.

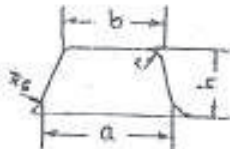
^I Sand castings and sand cast test specimens shall be 25 HRC minimum.

Anexo 3. Presión de trabajo de la bomba.

| PUMP | Metric Units | Plunger Dia. mm | Plunger Area cm ² | M ³ /Hr per RPM | L/Sec. per RPM | Max. Press. kPa | 50 RPM | | 150 RPM | | 250 RPM | | 300 RPM | | 350 RPM | | 420 RPM | |
|--------------------|--------------|-----------------|------------------------------|----------------------------|----------------|-----------------|--------------------|--------|--------------------|--------|--------------------|--------|--------------------|--------|--------------------|--------|--------------------|--------|
| | | | | | | | M ³ /Hr | L/Sec. | M ³ /Hr | L/Sec. | M ³ /Hr | L/Sec. | M ³ /Hr | L/Sec. | M ³ /Hr | L/Sec. | M ³ /Hr | L/Sec. |
| 59T-3L (T365AL) | 76 | 45.604 | 0.0730 | 0.0203 | 4643 | 3.65 | 1.01 | 10.95 | 3.04 | 18.24 | 5.07 | 21.89 | 6.08 | 25.54 | 7.09 | 30.65 | 8.51 | |
| | 73 | 41.883 | 0.0670 | 0.0186 | 5055 | 3.35 | 0.93 | 10.05 | 2.79 | 16.75 | 4.65 | 20.10 | 5.59 | 23.45 | 6.52 | 28.15 | 7.82 | |
| | 70 | 38.320 | 0.0613 | 0.0170 | 5526 | 3.07 | 0.85 | 9.20 | 2.55 | 15.33 | 4.26 | 18.39 | 5.11 | 21.46 | 5.96 | 25.75 | 7.15 | |
| 59T-3M (T365AM) | 67 | 34.915 | 0.0559 | 0.0155 | 6064 | 2.79 | 0.78 | 8.38 | 2.33 | 13.97 | 3.88 | 16.76 | 4.66 | 19.55 | 5.43 | 23.46 | 6.52 | |
| | 64 | 31.669 | 0.0507 | 0.0141 | 6886 | 2.53 | 0.70 | 7.60 | 2.11 | 12.67 | 3.52 | 15.20 | 4.22 | 17.74 | 4.93 | 21.28 | 5.91 | |
| | 60 | 28.581 | 0.0457 | 0.0127 | 7408 | 2.29 | 0.64 | 6.86 | 1.91 | 11.43 | 3.18 | 13.72 | 3.81 | 16.01 | 4.45 | 19.21 | 5.34 | |
| 59T-3MS (T365MS) | 57 | 25.652 | 0.0410 | 0.0114 | 8254 | 2.05 | 0.57 | 6.16 | 1.71 | 10.26 | 2.85 | 12.31 | 3.42 | 14.37 | 3.99 | 17.24 | 4.79 | |
| | 54 | 22.881 | 0.0366 | 0.0102 | 9254 | 1.83 | 0.51 | 5.49 | 1.53 | 9.15 | 2.54 | 10.98 | 3.05 | 12.81 | 3.56 | 15.38 | 4.27 | |
| | 51 | 20.268 | 0.0324 | 0.0090 | 10447 | 1.62 | 0.45 | 4.86 | 1.35 | 8.11 | 2.25 | 9.73 | 2.70 | 11.35 | 3.15 | 13.62 | 3.78 | |
| 59T-3H (T365H) | 48 | 17.814 | 0.0285 | 0.0079 | 11886 | 1.43 | 0.40 | 4.28 | 1.19 | 7.13 | 1.98 | 8.55 | 2.38 | 9.98 | 2.77 | 11.97 | 3.33 | |
| | 44 | 15.518 | 0.0248 | 0.0069 | 13645 | 1.24 | 0.34 | 3.72 | 1.03 | 6.21 | 1.72 | 7.45 | 2.07 | 8.69 | 2.41 | 10.43 | 2.90 | |
| | 41 | 13.380 | 0.0214 | 0.0059 | 15825 | 1.07 | 0.30 | 3.21 | 0.89 | 5.35 | 1.49 | 6.42 | 1.78 | 7.49 | 2.08 | 8.99 | 2.50 | |
| Kilowatts Required | 38 | 11.401 | 0.0182 | 0.0051 | 18572 | 0.91 | 0.25 | 2.74 | 0.76 | 4.56 | 1.27 | 5.47 | 1.52 | 6.38 | 1.77 | 7.66 | 2.13 | |
| | 35 | 9.580 | 0.0153 | 0.0043 | 22102 | 0.77 | 0.21 | 2.30 | 0.64 | 3.83 | 1.06 | 4.60 | 1.28 | 5.36 | 1.49 | 6.44 | 1.79 | |
| | 32 | 7.917 | 0.0127 | 0.0035 | 26744 | 0.63 | 0.18 | 1.90 | 0.53 | 3.17 | 0.88 | 3.80 | 1.06 | 4.43 | 1.23 | 5.32 | 1.48 | |
| Kilowatts Required | 29 | 6.413 | 0.0103 | 0.0029 | 33017 | 0.51 | 0.14 | 1.54 | 0.43 | 2.57 | 0.71 | 3.08 | 0.86 | 3.59 | 1.00 | 4.31 | 1.20 | |
| | 25 | 5.067 | 0.0081 | 0.0023 | 41787 | 0.41 | 0.11 | 1.22 | 0.34 | 2.03 | 0.56 | 2.43 | 0.68 | 2.84 | 0.79 | 3.41 | 0.95 | |
| | 22 | 3.879 | 0.0062 | 0.0017 | 54579 | 0.31 | 0.09 | 0.93 | 0.26 | 1.55 | 0.43 | 1.86 | 0.52 | 2.17 | 0.60 | 2.61 | 0.72 | |
| Kilowatts Required | 19 | 2.850 | 0.0046 | 0.0013 | 68948 | 0.23 | 0.06 | 0.68 | 0.19 | 1.14 | 0.32 | 1.37 | 0.38 | 1.60 | 0.44 | 1.92 | 0.53 | |
| | | | | | | 5 | 16 | 26 | 31 | 37 | 44 | | | | | | | |

Anexo 4. Dimensiones canales de alimentación.

Tabla 14. Canales de alimentación de sección trapezoidal (h=0,5 a).



El diagrama muestra un canal de sección trapezoidal con un ángulo de 45° en los lados. Las dimensiones indicadas son: 'a' para el ancho inferior, 'b' para el ancho superior, 'h' para la altura y 'r' para el radio de la esquina superior derecha.

| Área de la sección transversal cm ² | DIMENSIONES EN mm | | | | Área de la sección transversal cm ² | DIMENSIONES EN mm | | | |
|--|-------------------|------|------|---|--|-------------------|------|------|---|
| | a | b | h | r | | a | b | h | r |
| 1,0 | 15,0 | 12,0 | 7,5 | 5 | 7,5 | 40,0 | 34,0 | 20,0 | 5 |
| 1,5 | 18,0 | 15,5 | 9,0 | 5 | 8,0 | 42,0 | 35,0 | 21,0 | 5 |
| 2,0 | 22,0 | 18,0 | 10,0 | 5 | 8,5 | 43,0 | 37,0 | 21,5 | 5 |
| 2,5 | 24,0 | 20,0 | 11,5 | 5 | 9,0 | 44,0 | 38,0 | 22,0 | 5 |
| 3,0 | 26,0 | 22,0 | 13,0 | 5 | 10,0 | 45,0 | 40,0 | 23,0 | 6 |
| 3,5 | 27,0 | 23,0 | 14,0 | 5 | 11,0 | 48,0 | 43,0 | 24,0 | 6 |
| 4,0 | 30,0 | 24,0 | 15,0 | 5 | 12,5 | 52,0 | 46,0 | 26,0 | 6 |
| 4,5 | 31,0 | 26,0 | 15,5 | 5 | 15,0 | 57,0 | 49,0 | 28,5 | 6 |
| 5,0 | 33,0 | 28,0 | 17,0 | 5 | 17,5 | 61,0 | 55,0 | 30,5 | 8 |
| 5,5 | 35,0 | 29,0 | 17,5 | 5 | 20,0 | 65,0 | 59,0 | 32,5 | 8 |
| 6,0 | 36,0 | 31,0 | 18,0 | 5 | 22,5 | 70,0 | 60,0 | 35,0 | 8 |
| 6,5 | 37,0 | 32,0 | 19,0 | 5 | 25,0 | 72,0 | 64,0 | 36,0 | 8 |
| 7,0 | 38,0 | 33,0 | 19,5 | 5 | 30,0 | 80,0 | 70,0 | 40,0 | 8 |

Anexo 5. Longitud de los canales de alimentación.

Tabla 20. Características de los alimentadores para Cu, Al y Mg.

| VOLUMEN DEL METAL LIQUIDO dm^3 | PESO EN KG | | ALIMENTADORES | | ESPESOR DE PAÑOS PISA | |
|----------------------------------|-----------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|-----------------------|-----------------------------|
| | ABRACIO- NES DE COBRE | ABRACIO- NES DE ALUMINIO | ABRACIO- NES DE MAGNESIO | AREA DE SECCION EN cm^2 | LONGITUD EN mm | CANTIDAD DE ALIMENTA- DORES |
| 0-0,07 | 0-0,6 | 0-0,2 | 0-0,1 | 0,3-0,4 | 10-15 | 1 |
| 0,07-0,13 | 0,6-1,1 | 0,2-0,3 | 0,1-0,23 | 0,4-0,5 | 15-20 | 1 |
| 0,13-0,4 | 1,1-3,4 | 0,3-1,0 | 0,23-0,7 | 0,5-0,65 | 20-25 | 1 |
| 0,4-0,7 | 3,4-6 | 1-2 | 0,7-1,3 | 0,65-0,85 | 25-30 | 1 |
| 0,7-1,3 | 6-11 | 2-3,5 | 1,3-2,4 | 0,65-0,85 | 25-30 | 2-3 |
| 1,3-2,0 | 11-17 | 3,5-5 | 2,4-3,5 | 0,7-0,9 | 25-30 | 2-3 |
| 2,0-3,0 | 17-26 | 5-8 | 3,6-5,2 | 0,9-1 | 25-30 | 4 |
| 3,0-4,0 | 26-37 | 8-10 | 5,5-7 | 0,9-1 | 25-30 | 4 |
| 4,0-5,3 | 34-46 | 10-14 | 7-10 | 0,9-1 | 30-35 | 4 |
| 5,3-6,0 | 46-69 | 14-20 | 10-15 | 1,0-1,5 | 30-35 | 4-5 |
| 6,0-10,5 | 69-90 | 20-27 | 15-19 | 1-1,5 | 30-35 | 4-5 |
| 10,5-13 | 90-112 | 27-34 | 19-24 | 1-1,5 | 30-35 | 4-5 |
| 13-16 | 112-138 | 34-42 | 24-29 | 1-1,5 | 40-45 | 7 |
| 16-18,4 | 138-158 | 42-48 | 29-34 | 1-1,5 | 40-45 | 7 |
| 18,4-21 | 158-181 | 48-55 | 34-38 | 1-1,5 | 40-45 | 7 |
| 21-23,7 | 181-204 | 55-62 | 38-43 | 1-1,5 | 45-50 | 7 |
| 23,7-26,3 | 204-226 | 62-66 | 43-46 | 1-1,5 | 45-50 | 7 |
| 26,3-30 | 226-258 | 68-80 | 48-54 | 1,5-1,8 | 45-50 | 7-8 |
| 30-37 | 258-318 | 80-93 | 54-67 | 1,8-2 | 45-50 | 8 |
| 37-44 | 318-378 | 93-105 | 67-80 | 1,8-2 | 45-50 | 8 |
| 44-51 | 378-438 | 105-118 | 80-93 | 2,2-2,5 | 45-50 | 8 |
| 51-58 | 438-518 | 118-130 | 93-105 | 2,2-2,5 | 50-55 | 8 |
| 58-65 | 518-579 | 130-144 | 105-118 | 2,2-2,5 | 50-55 | 8 |
| 65-72 | 579-640 | 144-187 | 118-130 | 2,2-2,5 | 50-55 | 9-10 |
| 72-79 | 640-700 | 187-205 | 130-144 | 2,2-2,5 | 50-55 | 9-10 |
| 79-85 | 700-760 | 205-224 | 144-156 | 2,2-2,5 | 50-55 | 9-10 |

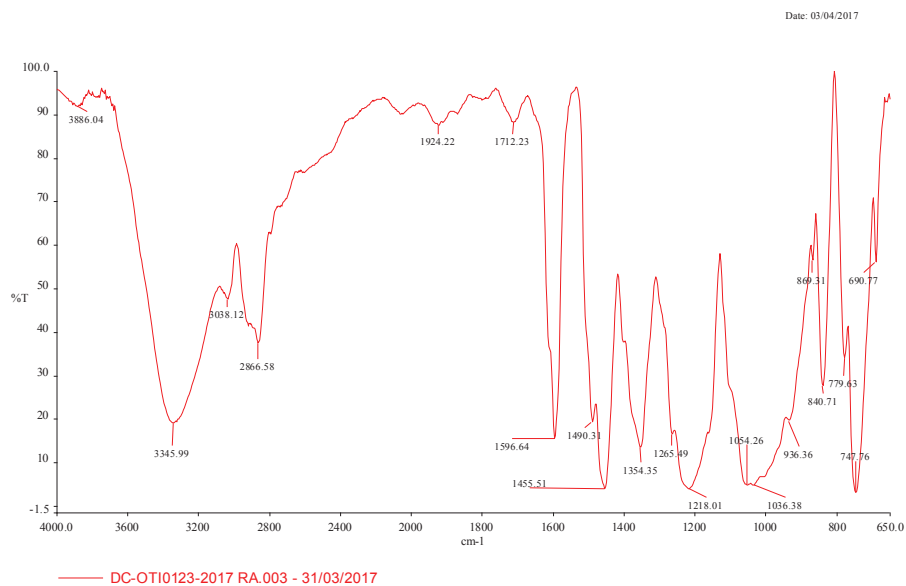
Anexo 6. Dimensiones de los escoriadores.

Tabla 22. Secciones típicas de colectores de escoria.

| AREA cm ² | DIMENSIONES EN mm | | | | | | | | |
|-------------------------|-------------------|----|----|------------------|----|----|-----------------|----|----|
| | Cuando $h=a$ | | | Cuando $h=1,25a$ | | | Cuando $h=1,5a$ | | |
| | a | b | h | a | b | h | a | b | h |
| 1,0 | 11 | 8 | 11 | - | - | - | - | - | - |
| 1,3 | 12 | 10 | 12 | 11 | 8 | 14 | - | - | - |
| 1,6 | 14 | 10 | 14 | 12 | 9 | 15 | 11 | 7 | 17 |
| 2,0 | 15 | 12 | 15 | 14 | 10 | 17 | 12 | 8 | 20 |
| 2,5 | 16 | 13 | 17 | 15 | 11 | 19 | 14 | 10 | 21 |
| 3,15 | 18 | 14 | 19 | 16 | 12 | 21 | 15 | 11 | 23 |
| 4,0 | 22 | 18 | 21 | 18 | 13 | 25 | 18 | 15 | 26 |
| 5,0 | 24 | 19 | 24 | 22 | 16 | 27 | 20 | 14 | 30 |
| 6,3 | 26 | 20 | 27 | 24 | 18 | 30 | 23 | 16 | 34 |
| 8,0 | 30 | 27 | 30 | 26 | 19 | 35 | 24 | 17 | 38 |
| 10,0 | 34 | 28 | 33 | 30 | 22 | 38 | 28 | 20 | 42 |
| 12,5 | 38 | 30 | 37 | 34 | 26 | 43 | 30 | 22 | 47 |
| 16,0 | 42 | 34 | 42 | 38 | 29 | 48 | 36 | 25 | 54 |
| 20,0 | 48 | 38 | 47 | 42 | 32 | 53 | 40 | 29 | 60 |
| 25,0 | 52 | 42 | 52 | 48 | 36 | 60 | 44 | 32 | 66 |
| 31,5 | 60 | 48 | 59 | 52 | 40 | 66 | 50 | 35 | 75 |
| 40,0 | 66 | 52 | 67 | 60 | 45 | 77 | 56 | 39 | 84 |

Anexo 7. Resultados de análisis infrarrojo de resinas.

Muestra RA: Resina A



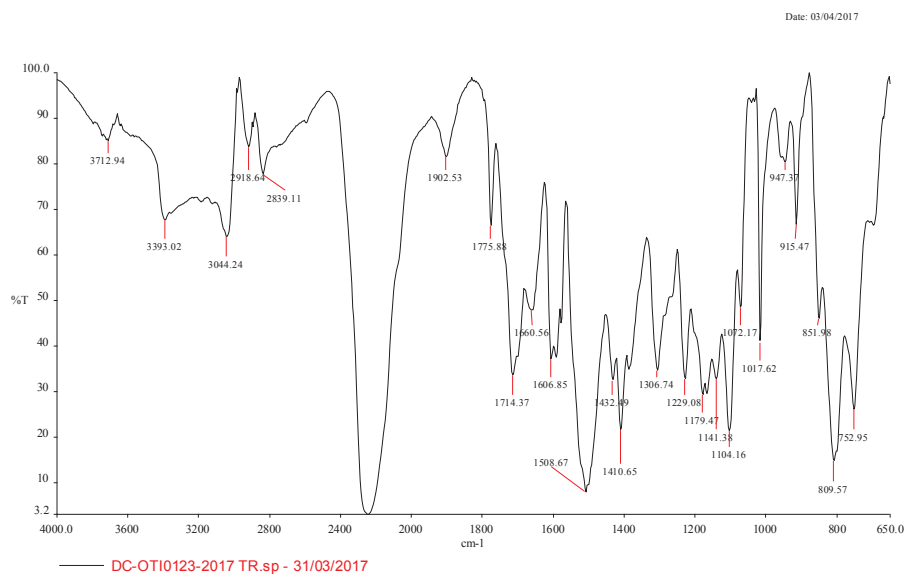
Análisis de grupos funcionales

| Grupo funcional | Número de onda cm ⁻¹ |
|-----------------------|--|
| Alquilo | 2990-2855 1485-1415 |
| Fenol orto sustituido | 3600-3330 1625-1575 1505-1470 1225-1175 760-740 |
| Fenol meta sustituido | 3475-3300 1620-1580 1510-1445 1315-1250 1245-1115 920-820 785-765 700-670 |

Identificación.

El espectro obtenido tiene las bandas características de una “resina fenólica” tipo reosol a 3345, 1250, y 1010 cm⁻¹.

Muestra TR: Resina B



Análisis de grupos funcionales

| Grupo funcional | Número de onda cm ⁻¹ |
|-----------------------------------|------------------------------------|
| Metileno (-CH ₂ -) | |
| Nitrilo aromático orto sustituido | 2290-2060 1595-1490 770-730 |
| Nitrilo aromático meta sustituido | 2290-2090 1540-1490 850-810 |

Identificación.- El espectro presenta las bandas características de un isocianato aromático, de la revisión de la bibliografía se encontró una semejanza aceptable con el difenilmetano 4,4 diisocianato MDI.

Anexo 8. Propiedades del aluminio.

Composición

Composición química de las aleaciones utilizadas

| No. Aleación | Si | Fe | Mg | Mn | Cu | Cr | Zn | Ti | Varios | Al (min) |
|--------------|-------------|------|-------------|------|-------------|-------------|------|------|--------|----------|
| 6063 | 0.20 - 0.60 | 0.35 | 0.45 - 0.90 | 0.10 | 0.10 | 0.10 | 0.10 | 0.10 | 0.15 | restante |
| 6061 | 0.40 - 0.80 | 0.70 | 0.80 - 1.20 | 0.15 | 0.15 - 0.40 | 0.04 - 0.35 | 0.25 | 0.15 | 0.15 | restante |
| 6005 | 0.60 - 0.90 | 0.35 | 0.40 - 0.80 | 0.10 | 0.10 | 0.10 | 0.10 | 0.10 | 0.15 | restante |

Dureza y resistencia

| Aleación A.A. | Espesor pulgadas | Dureza (HWB) min. | Webster B normal | Resist. a Fluencia (Kg /mm ²) mínimo normal | | Resist. a tensión (Kg /mm ²) mínimo normal | | Elongación (% en 5 cm) | |
|---------------|------------------|-------------------|------------------|--|------|---|------|------------------------|----|
| 6063-T1 | Todas | 4 | 0 | 5.6 | 8.5 | 11.2 | 16 | 14 | |
| | T4 | +0.5" | 5 | 7 | 6.2 | 8.8 | 12.9 | 16.7 | 14 |
| | T5 | +0.5"o más | 4 | 0 | 6 | 8.5 | 12.5 | 16.1 | 14 |
| | T6 | Todas | 7 | 8 | 9.5 | 13.3 | 13.9 | 17.6 | 12 |
| | T6 | +0.5" | 8 | 10 | 11.2 | 16.2 | 15.5 | 19.7 | 8 |
| | T6 | +0.5"o más | 7 | 9 | 10.7 | 14.4 | 14.8 | 18.9 | 8 |
| 6061-T1 | Todas | 8 | 11 | 11 | 14.1 | 16 | 24 | 15 | |
| | T1 | Todas | 8 | 11 | 11.2 | 14.8 | 18.3 | 24.5 | 14 |
| | T2 | Todas | 12 | 14 | 20.9 | 26 | 24.5 | 30 | 8 |
| | T3 | Todas | 14 | 16 | 24.5 | 28.1 | 26.5 | 31.8 | 9 |
| 6005-T1 | Todas | 8 | 9 | 8.2 | 13 | 12.3 | 23 | 15 | |
| | T4 | Todas | 9 | 10 | 10.5 | 14 | 17.5 | 24 | 15 |
| | T5 | Todas | 10 | 12 | 24 | 27.5 | 26 | 29.5 | 8 |
| | T6 | Todas | 14 | 14 | 24.5 | 28.5 | 26.5 | 30 | 8 |
| 6351-T1 | Todas | 9 | 10 | 9.5 | 16 | 18.3 | 20 | 16 | |
| | T4 | Todas | 9 | 11 | 13.3 | 16.5 | 22.4 | 25 | 16 |
| | T5 | Todas | 12 | 14 | 24.5 | 30 | 26.5 | 31.7 | 10 |
| | T6 | Todas | 15 | 16 | 26 | 30.2 | 29.8 | 34.4 | 10 |



Anexo 9. Resultados ensayo de tracción.



INFORME TÉCNICO

LAEV – JUN.17.24.0

Quito, 28 de junio del 2017

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

Los resultados contenidos en el presente informe corresponden a ensayos realizados en probetas de bronce al aluminio pertenecientes al Sr. Estalin Flores y Srta. Cristina Calderón para el desarrollo del proyecto de titulación "DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UN PISTÓN Y UNA CÁMARA DE PRESIÓN DE BRONCE AL ALUMINIO PARA UN PROTOTIPO DE BOMBA RECÍPROCANTE". Las probetas fueron entregadas en el Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones de la Escuela Politécnica Nacional.

RESULTADOS

- MUESTRAS:** Dos (2) probetas circulares de bronce al aluminio para ensayo de tracción.
- ENSAYO DE TRACCIÓN A MATERIAL BASE**

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 del material bronce al aluminio.

| Id. | Diámetro promedio | Carga máxima registrada | | Resistencia a la tracción | | % Elongación en 50 mm |
|-----|-------------------|-------------------------|--------|---------------------------|------|-----------------------|
| | mm | lbf | N | ksi | MPa | |
| T-1 | 12,64 | 51.190 | 11.615 | 476,0 | 66,7 | 3,9 |
| T-2 | 12,64 | 57.498 | 12.926 | 458,2 | 66,5 | 3,3 |

NOTA: No se pudo determinar el valor del límite de fluencia en las muestras ensayadas.

Las curvas de esfuerzo vs. porcentaje de deformación se muestran en el anexo. El porcentaje de deformación que se puede observar en la curva corresponde al desplazamiento del cabezal de la máquina universal de ensayos.

| | ELABORADO POR: | REVISADO POR: | APROBADO POR: |
|--|--------------------|-------------------|-----------------------------|
| Firma: | | | |
| Nombre: | Ing. Jonathan Rios | Ing. Alexis Solís | Ing. Jonathan Castro, M.Sc. |
| Cargo: | ASISTENTE | ESPECIALISTA | JEFE (E) |
| LABORATORIO DE ANÁLISIS DE ESFUERZOS Y VIBRACIONES | | | |
| ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL | | | |

ANEXO

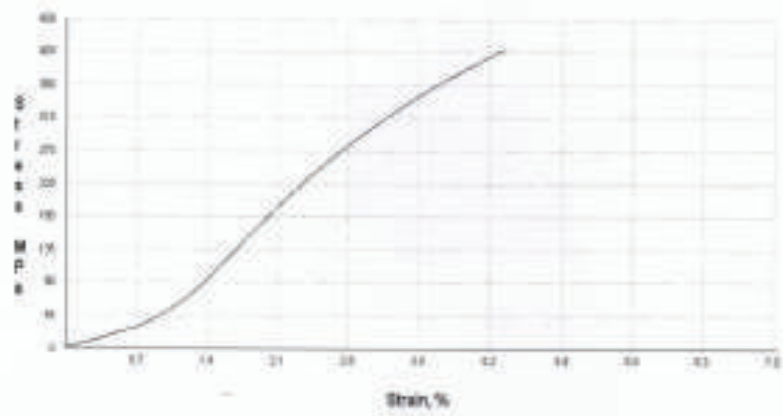


Figura 1. Curva de esfuerzo vs porcentaje de deformación de la probeta T-1

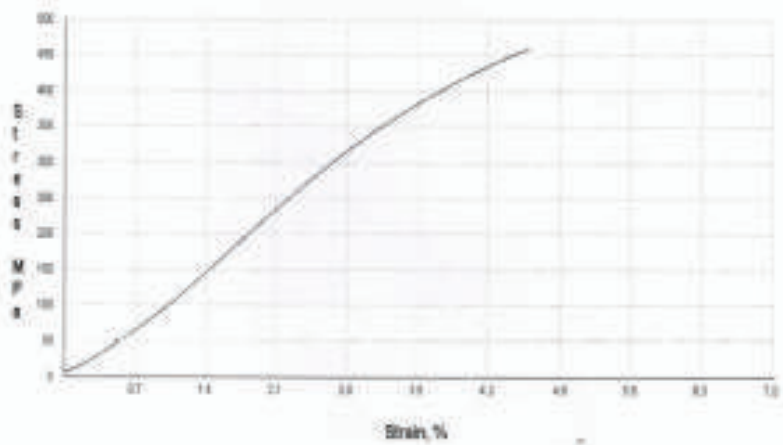


Figura 2. Curva de esfuerzo vs porcentaje de deformación de la probeta T-2



Anexo 10. Resultados de espectrometría por chispa.



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
DEPARTAMENTO DE MATERIALES
LABORATORIO DE FUNDICIÓN



INFORME TÉCNICO

Solicitado por: Cristina Calderón

Orden de Trabajo: LF001

Tipo de Trabajo: Espectrometría por chispa

Fecha: 24 de abril del 2017

Realizado por: Ing. Oscar Solomayor, Ing. Francisco Montaño

Descripción: Probetas de bronce

1. ANTECEDENTES.

Se recibe en el Laboratorio de Fundición de la Escuela Politécnica Nacional una probeta suelta

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

| Nombre | Identificación de la probeta |
|--------------------|------------------------------|
| Probetas de bronce | A1 |

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



| | | Muestra |
|-----------|----|-----------|
| | | A1 |
| Elemento | | Valor [%] |
| Zinc | Zn | 0,480 |
| Plomo | Pb | 0,033 |
| Estaño | Sn | 0,033 |
| Manganeso | Mn | 0,129 |
| Hierro | Fe | 5,722 |
| Níquel | Ni | 0,837 |
| Aluminio | Al | 9,406 |
| Arsénico | As | 0,006 |
| Cobre | Cu | 83,370 |

Ing. Francisco Montalvo

Técnico Responsable



Ing. Oscar Sotomayor

Jefe del Laboratorio de Fundición