



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

FACULTAD DE CIENCIA DE LA INGENIERIA Y APLICADAS

CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA

PROYECTO DE PROPUESTA TECNOLÓGICA

“IMPRESIÓN 3D APLICADA A LA OBTENCIÓN DE PIEZAS DE ALUMINIO FUNDIDO MEDIANTE MOLDES DE ARENA”

Proyecto de propuesta tecnológica presentado previo a la obtención del Título de Ingeniero en Electromecánica

Autor:

Jharot Antony Villavicencio Erazo

Tutor:

Ing. Luis Miguel Navarrete López .MSc

LATACUNGA - ECUADOR

MARZO – 2025

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Yo, Villavicencio Erazo Antony Jharot, con cédula de ciudadanía N.º 1400787493 declaro ser autor de la presente PROPUESTA TECNOLÓGICA: “IMPRESIÓN 3D APLICADA A LA OBTENCION DE PIEZAS DE ALUMINIO FUNDIDO MEDIANTE MOLDES DE ARENA”, siendo el Ing. M.Sc. Luis Miguel Navarrete López, tutor del presente trabajo; y, eximo expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

Además, certifico que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de mi exclusiva responsabilidad.

Latacunga, marzo del 2025.

Antony U.

Villavicencio Erazo Antony Jharot

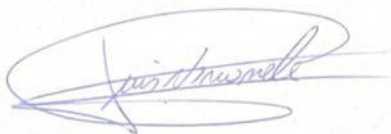
C.C: 1400787493

AVAL DEL TUTOR DE LA PROPUESTA TECNOLÓGICA

En calidad de Tutor de la Propuesta Tecnológica sobre el título:

“IMPRESIÓN 3D APLICADA A LA OBTENCIÓN DE PIEZAS DE ALUMINIO FUNDIDO MEDIANTE MOLDES DE ARENA”, de: Villavicencio Erazo Antony Jharot con número de cédula N.º 1400787493, de la carrera de Ingeniería Electromecánica, considero que dicha Propuesta Tecnológica es merecedor del aval de aprobación al cumplir las normas técnicas, traducción y formatos previstos, así como también ha incorporado las observaciones y recomendaciones propuestas en la pre-defensa.

Latacunga, marzo de 2025.



Ing. Navarrete López Luis Miguel

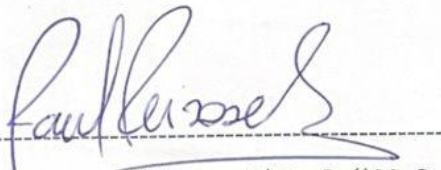
C.C: 1803747284

AVAL DE MIEMBROS DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN

En calidad de Tribunal de Lectores, aprueban la presente propuesta tecnológica de acuerdo a las disposiciones reglamentarias emitidas por la Universidad Técnica de Cotopaxi, y por la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas; por cuanto, el postulante: Villavicencio Erazo Jharot Antony con número de cédula, N.º 1400787493 con el título de Proyecto de titulación: “IMPRESIÓN 3D APLICADA A LA OBTENCIÓN DE PIEZAS DE ALUMINIO FUNDIDO MEDIANTE MOLDES DE ARENA”, ha considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúne los méritos suficientes para ser sometido al acto de sustentación del trabajo de titulación.

Por lo antes expuesto, se autoriza grabar los archivos correspondientes en un CD, según la normativa institucional.

Latacunga, marzo de 2025.



Ing. Reinoso Peñaherrera Héctor Raúl Ms.C

C.C: 0502150899



Ing. Cevallos Betún Segundo Angel Ms.C

C.C: 0501782437



Ing. Vizquete Fiallos Xavier Gonzalo Ms.C

C.C: 1714631361

AGRADECIMIENTO

Agradezco ampliamente a las personas que contribuyeron de manera positiva a la realización de esta tesis. Su apoyo, orientación y valiosa colaboración fueron de amplia importancia para el logro de este trabajo académico. Especialmente, agradezco a mi tutor de tesis por guiarme conforme a su amplia experiencia durante este proceso de investigación, sus sugerencias y conocimientos fueron importantes para la realización de la investigación y retroalimentar el tema. También agradezco a mi familia por su motivación emocional y constante apoyo, quienes fueron mi ejemplo y guía durante las arduas horas de estudio y empeño. Asimismo, expreso mi resiliencia a mis compañeros y amigos de clase por sus experiencias y ayudarme a crecer significativamente mi visión académica a través del intercambio de experiencias e ideas. Un agradecimiento especial a mis padres, Luis Villavicencio y Anita Erazo, por la guía, respaldo y búsqueda de soluciones en la realización de esta investigación. De la misma forma agradezco a Daniela Solano su compañía ha sido mi refugio y mi mayor motivación. Finalmente, aprecio y agradezco a todas las personas que de cualquier manera aportaron a este proyecto, dejando un rastro relevante en este trabajo. Este éxito refleja el fruto del esfuerzo conjunto y el respaldo, y estoy totalmente conmovido y agradecido con todos los involucrados en este trayecto universitario.

Antonny Villavicencio

DEDICATORIA

A mis padres que han sido todo en mi vida, forjaron mi camino con paciencia y amor, cuya amorosa dedicación y apoyo incondicional han sido la fuerza que me ha impulsado a alcanzar esta meta. Sin ustedes y su constante presencia y ánimo, este logro no hubiera sido posible. Les agradezco por creer en mí siempre, por enseñarme el valor de la perseverancia y del esfuerzo, y por estar en cada paso de mi vida. Gracias por ser mi refugio en los momentos difíciles y mi alegría en los momentos de triunfo. Por enseñarme los valores más importantes de la vida y por darme las herramientas necesarias para enfrentarme a cualquier desafío, su amor y dedicación no tiene precio. Solo quiero decirles que los amo profundamente y que estoy muy agradecido por tenerlos en mi vida. Con todo mi agradecimiento y cariño,

Antonny Villavicencio

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS.

TÍTULO: “IMPRESIÓN 3D APLICADA A LA OBTENCIÓN DE PIEZAS DE ALUMINIO FUNDIDO MEDIANTE MOLDES DE ARENA”

Autor:
Villavicencio Erazo Jharot Antony

RESUMEN

El objetivo general de este proyecto consiste en implementar nuevas técnicas para crear moldes para la fundición de aluminio y mejorar el acabado superficial, reducir costos y tiempo de producción de componentes de aluminio fundidos mediante el método de fundición con horno de crisol ayudado de moldes impresos en 3D. El proceso de fundición del aluminio con moldes impresos, presenta muchas variables que es preciso controlar y establecer para que el componente ya fundido no presente fallas dimensionales y superficiales, siendo necesario un estudio sobre el proceso y los defectos que se generan al implementar este método. El presente proyecto contiene generalidades sobre los hornos de fundición de crisol y la impresión 3D, sus propiedades, características, y el proceso de fabricación de las piezas de aluminio, en el proceso de fundición revisaremos sus variantes para su modelaje, así como las ventajas y desventajas de este proceso. Este proyecto describe de una manera general el análisis de arenas bases para fundición disponibles en el mercado para la realización del proyecto en los laboratorios de Universidad Técnica de Cotopaxi, además se implementará un horno de fundición de aluminio para el laboratorio con el fin de realizar el presente proyecto. Se aplica un proceso de ensayos y pruebas en la temperatura y tiempo de fundición del metal en el horno también se utilizará diferentes materiales para buscar el material más óptimo para la creación de los moldes impresos y en las arenas bases se buscara cual tiene las mejores propiedades y características para este proyecto. Para finalizar con la selección de los diferentes materiales aptos para este proyecto, donde se describe su composición, su elaboración, sus características y propiedades durante la creación de componentes de aluminio fundidos en horno utilizando tecnología 3D en moldes de arena.

Palabras clave: Impresión 3D, aluminio, fundición, horno de fundición.

TECHNICAL UNIVERSITY OF COTOPAXI

FACULTY OF ENGINEERING AND APPLIED SCIENCES

TITLE: "3D PRINTING APPLIED TO THE PRODUCTION OF ALUMINUM CASTINGS USING SAND MOLDS"

Author: Villavicencio Erazo Jharot Antony

ABSTRACT

The general objective of this project is to implement new techniques to create molds for aluminum casting and improve surface finish, reduce costs and production time of cast components using crucible furnace method aided by 3D models. The process presents many precise variables to control and establish so that the cast component does not present dimensional and superficial failures, being necessary a study on the procedure and the defects that are generated by this method. This project contains general information about crucible melting furnaces and 3D printing, its properties, characteristics, and the method of manufacturing aluminum parts. In the development of casting, its variants were reviewed for modeling, as well as the advantages and disadvantages of this operation. This project describes in a general way the analysis of base sands for casting available in the market, the project was developed in the laboratories of Universidad Técnica de Cotopaxi, and an aluminum casting furnace was implemented. A process of tests and trials was applied in the temperature and time of melting, also different materials were used to find the most optimal for the creation of the printed models and in the base sands with better properties and characteristics. To finish it was the most suitable materials for this project were determined, where its composition, its elaboration, its characteristics and properties during the creation of aluminum components cast in furnace using 3D technology in sand molds are described.

Keywords: 3D printing, aluminum, casting, casting furnace.

AVAL DE TRADUCCIÓN

En calidad de Docente del Idioma Inglés del Centro de Idiomas de la Universidad Técnica de Cotopaxi; en forma legal **CERTIFICO** que:

La traducción del resumen al idioma Inglés del proyecto de investigación cuyo título versa: “**IMPRESIÓN 3D APLICADA A LA OBTENCIÓN DE PIEZAS DE ALUMINIO FUNDIDO MEDIANTE MOLDES DE ARENA**” presentado por: **Villavicencio Erazo Jharot Antony**, egresado de la Carrera de: **Ingeniería Electromecánica**, perteneciente a la **Facultad de Ciencias De La Ingeniería Y Aplicadas**, lo realizó bajo mi supervisión y cumple con una correcta estructura gramatical del Idioma.

Es todo cuanto puedo certificar en honor a la verdad y autorizo al peticionario hacer uso del presente aval para los fines académicos legales.

Latacunga, Marzo del 2025

Atentamente,



EDISON MARCELO PACHECO PRUNA
DOCENTE CENTRO DE IDIOMAS-UTC
CI: 0502617350



CENTRO
DE IDIOMAS



ÍNDICE GENERAL

1. INFORMACIÓN GENERAL	1
2. INTRODUCCIÓN.....	2
2.1 Situación problemática	2
2.2 Formulación del problema	3
2.3 OBJETIVO Y CAMPO DE ACCIÓN	3
2.3.1 Objeto de Investigación:.....	3
2.3.2 Campo de Acción:	3
2.4 BENEFICIARIOS	3
2.4.1 Directos	3
2.4.2 Indirectos	3
2.5 JUSTIFICACIÓN	4
2.6 OBJETIVOS	4
2.6.1 Objetivo General	4
2.6.2 Objetivos Específicos.....	4
2.6.3 Sistemas de tareas.....	5
3. MARCO TEÓRICO	6
3.1 ANTECEDENTES	6
3.2 FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....	6
3.2.1 Fundición de metales.....	6
3.2.2 Modelo para fundición	7
3.2.3 Moldes para fundición.....	10
3.2.3.1 Arena para molde	11
3.2.3.2 Cajas de moldeo	13

3.2.4 Hornos de fundición.....	15
3.2.4.1 Hornos de Crisol para fundición de Aluminio	15
3.2.5 Proceso de fundición de metales	18
3.2.6 Proceso de fundición de aluminio	19
4. MÉTODOS Y PROCEDIMIENTO.....	21
4.1 ALCANCE	21
4.2 DISEÑO DE MODELO PLÁSTICO	22
4.2.1 Construcción de moldes.....	23
4.2.2 Selección del material para impresión 3D	23
4.3 METODOLOGIA PARA FUNDIR EL ALUMINIO.....	32
4.3.1 Diseño en software CAD del horno	32
4.3.2 Determinación del espesor de las paredes cilíndricas del horno.....	33
4.3.3 Altura del horno.....	33
4.3.4 Cálculo del calor.....	34
4.3.5 Consumo de combustible.	37
4.3.6 Construcción de cilindro metálico.....	37
4.4 FUNDICIÓN DE ALUMINIO	40
4.4.1 Calentamiento de aluminio.....	40
4.4.2 Vertido del aluminio	41
4.4.3 Desmoldaje de la pieza.....	44
5 ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	45
5.1 ANÁLISIS DE CONSTRUCCIÓN DEL HORNO	45
5.2 ANÁLISIS DE FUNDICIÓN DE ALUMINIO SEGÚN MATERIAL DE MOLDE.....	45
5.2.1 Análisis de costo de fabricación de modelo	47
5.3 ANÁLISIS DE TIEMPO DE VERTIDO DEL ALUMINIO 6061 EN EL MOLDE.....	48

5.4 ANÁLISIS DE DIÁMETRO DE BEBEDERO DE VERTIDO EN MOLDES	48
5.5 ANÁLISIS DEL TIEMPO DE ENFRIADO DEL ALUMINIO 6061	49
5.6 ANÁLISIS CONTRACCIÓN DEL MATERIAL.....	50
5.7 ANÁLISIS TOLERANCIAS DE GEOMETRÍA EN HÉLICES DE MOTOR FUERA DE BORDA	52
5.6 ANÁLISIS DE ACABADO SUPERFICIAL EN LA FUNDICIÓN DE ALUMINIO 6061	56
5.7 ANÁLISIS DE TIEMPO DE PRODUCCIÓN	57
5.8 ANÁLISIS DE COSTOS DE PRODUCCIÓN.....	58
5.9 PRESUPUESTO	60
5.9.1 Periodo de recuperación de inversión (PRI)	61
6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	61
6.1 CONCLUSIONES	61
6.2 RECOMENDACIONES.....	62
7 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	62
8 ANEXOS	¡Error! Marcador no definido.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1 Diagrama de flujo para fabricación de piezas por Fundición	7
Figura 3.2 Materiales para moldes	8
Figura 3.3 Tipos de modelo para molde	8
Figura 3.4 Impresión de plástico 3D	9
Figura 3.5 Materiales de impresión 3D	9
Figura 3.6 Etapas de impresión 3D	10
Figura 3.7 Tipos de molde	11
Figura 3.8 Partes de un molde de arena.....	11
Figura 3.9 Arenas de moldeo.....	12
Figura 3.10 Bentonita sódica.....	12
Figura 3.11 Desmoldantes para fundición	13
Figura 3.12 Cajas de molde	14
Figura 3.13 Tipos de cajas de molde	14
Figura 3.15 Sección de partes de horno de crisol.....	16
Figura 3.16 Gases para calentar hornos.....	17
Figura 3.17 Calentamiento de hornos.....	18
Figura 3.18 Proceso de fundición.....	19
Figura 4.1 Organigrama de proyecto	22
Figura 4.2 Diseño de componentes.....	23
Figura 4.3 Impresora por inyección de polímeros.....	24
Figura 4.4 Interface Ultimaker Cura.....	26
Figura 4.5 Relleno para Impresión 3D	27
Figura 4.6 Caja de molde para fundición	28

Figura 4.7 Mezcla de bentonita	30
Figura 4.8 Creación de molde.....	31
Figura 4.9 Desmoldaje de pieza 3D	31
Figura 4.10 Dimensiones de crisol[3].....	32
Figura 4.11 Modelado de horno 3D.....	34
Figura 4.12 Cilindro de chapa metálica.....	38
Figura 4.13 Soldadura de chimenea	39
Figura 4.14 Ensamble de horno y la base.....	39
Figura 4.15 Instalación de ladrillos y concreto.....	40
Figura 4.16 Fundición de aluminio	41
Figura 4.17 Vertido de aluminio	44
Figura 4.18 Piezas fundidas.....	44
Figura 5.1 Molde de acero.....	46
Figura 5.2 Molde de arena común	46
Figura 5.3 Reducción de temperatura en el vertido de aluminio.....	48
Figura 5.4 Diámetro de vertido de aluminio.....	49
Figura 5.5 Tiempo de enfriado de aluminio 6061	50
Figura 5.6 Proceso de plantillas comparativas	52
Figura 5.7 Comparación de tiempo de fundición	58
Figura 5.8 Comparación de tiempos de fundición.....	59

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Campos de la Ciencia y Tecnología UNESCO.....	1
Tabla 2.1 Sistema de tareas de plan de titulación.....	5
Tabla 4.1 Características de crisol.....	32
Tabla 4.2 Comparación de materiales plástico para impresión 3D.....	24
Tabla 4.3 Parámetros de impresión 3D.....	27
Tabla 4.4 Modelos de impresión 3D.....	27
Tabla 4.5 Comparación de arenas para fundición.....	29
Tabla 5.1 Análisis de moldes.....	47
Tabla 5.2 Análisis costos de moldes según material.....	47
Tabla 5.3 Medición de componente.....	51
Tabla 5.4 Comparación de medidas de contracción.....	52
Tabla 5.5 Comparación física de las hélice de motor fuera borda parte frontal.....	53
Tabla 5.6 Comparación numérica de las hélice de motor fuera borda parte frontal.....	54
Tabla 5.7 Comparación física de las hélice de motor fuera parte posterior.....	54
Tabla 5.8 Comparación numérica de las hélice de motor fuera parte posterior.....	55
Tabla 5.6 Análisis de acabado superficial.....	56
Tabla 5.7 Comparación de tiempos de producción.....	57
Tabla 5.8 Comparación de costos de producción.....	59
Tabla 5.9 Costo de maquinaria y equipo.....	60
Tabla 5.10 Costos de producción de piezas de aluminio.....	60
Tabla 5.11 Costo total.....	61

1. INFORMACIÓN GENERAL

Tema del proyecto: IMPRESIÓN 3D APLICADA A LA OBTENCIÓN DE PIEZAS DE ALUMINIO FUNDIDO MEDIANTE MOLDES DE ARENA.

Modalidad de Titulación:

Propuestas Tecnológicas

Proyectos de Investigación

Carrera: Ingeniería Electromecánica

Trabajo de Titulación Vinculado al Proyecto:

MODELO DE GESTIÓN DE ACTIVOS EN SISTEMAS ELECTROMECHANICOS EN EL SECTOR MULTISECTORIAL.

Equipo de Trabajo del Trabajo de Titulación:

Villavicencio Erazo Antony Jharot

Navarrete López Luis Miguel Ing.MSc.

Área de Conocimiento:

Tabla 1.1 Campos de la Ciencia y Tecnología UNESCO.

2205 Mecánica	2205 Mecánica	2205.09 Mecánica de Sólidos
---------------	---------------	-----------------------------

Línea de investigación:

Tecnología industrial, gestión de la producción, riesgos y seguridad laboral.

Sublíneas de investigación de la Carrera:

Diseño, construcción y mantenimiento de elementos, prototipos y sistemas electromecánicos.

Automatización, control y protecciones de sistemas electromecánicos.

Energética en sistemas electromecánico y uso de fuentes renovables de energía.

2. INTRODUCCIÓN

La fabricación de modelos para obtener moldes de arena para la fundición de metales es un proceso clave que determina el tiempo de producción. Tradicionalmente, la creación de estos modelos ha dependido de métodos convencionales, como el mecanizado y el tallado manual, los cuales pueden ser costosos, poco precisos y con tiempos de producción prolongados. Sin embargo, la impresión 3D ha surgido como una alternativa innovadora que optimiza este proceso, permitiendo la fabricación de modelos plásticos con mayor precisión, complejidad y rapidez.

La integración de la impresión 3D en la producción de modelos para la fundición de piezas en aluminio ofrece múltiples beneficios. Entre ellos, destaca la reducción significativa de los tiempos y costos de manufactura, la posibilidad de fabricar modelos con geometrías complejas y la mejora en la reproducibilidad de las piezas de aluminio fundido. Esto no solo impulsa la mejora del proceso, sino que también amplía las posibilidades de diseño en sectores que se dedican a la obtención de aluminio fundido.

Este estudio se centra en el desarrollo y análisis de modelos plásticos impresos en 3D como base para la fabricación de moldes de arena en la fundición de aluminio. Se explorará el impacto de esta tecnología en la optimización del proceso, evaluando aspectos como la reducción de costos y tiempos en comparación con los métodos tradicionales. Al demostrar la viabilidad de la impresión 3D en este contexto, se busca fomentar su adopción en la industria manufacturera, promoviendo su uso como una solución buena y accesible para la producción de piezas metálicas.

2.1 Situación problemática

La industria manufacturera en el país enfrenta múltiples desafíos en la producción de modelos para fundición de piezas con geometrías complejas. A pesar de los avances en tecnologías como la impresión 3D, esta no se ha integrado de manera significativa en la ingeniería y manufactura de

componentes, sino que se ha limitado principalmente a la producción de juguetes y otros objetos de menor exigencia técnica.

Particularmente, la fabricación de componentes de aluminio es un proceso ampliamente utilizado en diversas industrias, pero presenta una limitación importante: la creación de modelos para piezas con diseños complejos es un proceso lento y costoso. La falta de implementación efectiva de la impresión 3D en este ámbito ha impedido optimizar tiempos y costos de producción, desaprovechando su potencial en aplicaciones avanzadas dentro del sector manufacturero.

2.2 Formulación del problema

Limitada aplicación de la impresión 3D en la fabricación de moldes de arena para la fundición de aluminio.

2.3 OBJETIVO Y CAMPO DE ACCIÓN

2.3.1 Objeto de Investigación:

Impresión 3D de modelos plásticos para la fabricación de moldes de arena en la fundición de aluminio.

2.3.2 Campo de Acción:

El ámbito del estudio se encuentra especificado en base a la Nomenclatura Internacional de la UNESCO para los campos de Ciencia y Tecnología. El cual está representado mediante el código UNESCO 2205.09 Mecánica de Sólidos.

2.4 BENEFICIARIOS

2.4.1 Directos

Empresas Ecuatorianas que se dedican a la obtención de aluminio fundido.

2.4.2 Indirectos

Los beneficiarios de manera indirecta son estudiantes y técnicos de la Universidad Técnica de Cotopaxi, en el campo de la ingeniería electromecánica que pueden aprovechar los enfoques metodológicos y resultados de la investigación para su formación.

2.5 JUSTIFICACIÓN

La impresión 3D ofrece una solución innovadora para optimizar la producción de piezas de aluminio fundido mediante moldes de arena. Esta tecnología permite la fabricación de modelos plásticos, superando las limitaciones de los métodos tradicionales en la creación de modelos. Al integrar la impresión 3D en este proceso, es posible reducir significativamente los tiempos y costos de manufactura, mejorar la calidad de los modelos y aumentar la producción de piezas de aluminio con diseños complejos.

La fundición de aluminio es un proceso fundamental en industrias como la automotriz, aeronáutica, construcción entre otras, pero enfrenta desafíos en la fabricación de modelos debido a la falta de implementación de tecnologías avanzadas. Tradicionalmente, la creación de modelos para la fundición requiere métodos costosos y de larga duración, lo que limita la competitividad y la capacidad de innovación.

Este estudio busca demostrar el impacto positivo de la impresión 3D en la fundición de aluminio, promoviendo su integración en la industria manufacturera como una alternativa viable.

2.6 OBJETIVOS

2.6.1 Objetivo General

Implementar la impresión 3D en la fabricación de modelos plásticos para la producción de moldes de arena en la fundición de aluminio, con el fin de reducir tiempos de producción.

2.6.2 Objetivos Específicos

- Establecer un método para desarrollar modelos plásticos impresos en 3D para la elaboración de moldes de arena en la fundición del aluminio.
- Determinar las ventajas y limitaciones de los modelos plásticos obtenidos mediante impresión 3D para la fundición de piezas en aluminio.
- Evaluar las variaciones dimensionales y geométricas de las piezas fundidas.

2.6.3 Sistemas de tareas

Tabla 2.1 Sistema de tareas de plan de titulación

Objetivos específicos	Actividades(tareas)	Resultados esperados	Técnicas, Medios e Instrumentos
Establecer un método para desarrollar modelos plásticos impresos en 3D para la elaboración de moldes de arena en la fundición del aluminio.	Práctica de proceso de fundición de aluminio aplicando un molde Toma de datos del proceso durante todas sus fases.	Control eficiente de la temperatura y estabilidad durante la fundición del aluminio. Variación de temperatura y estabilidad en el horno y el proceso de moldeado.	Horno de fundición de aluminio, moldeado 3D y fundición con arena. Toma de temperatura con termómetro.
Determinar las ventajas y limitaciones de los modelos plásticos obtenidos mediante impresión 3D para la fundición de piezas en aluminio.	Visualización del tiempo del proceso de fundición. Evaluación de los acabados de las piezas fundidas con este proceso.	Mejora de tiempos en la producción de componentes en aluminio. Selección de las técnicas más eficientes y tiempos adecuados para la manufactura de estos componentes.	Método experimental.
Evaluar las variaciones dimensionales y geométricas de las piezas fundidas.	Realizar mediciones de componentes. Visualizar acabados superficiales.	Obtener piezas con las medidas presentadas en los planos. Mejorar el acabado superficial de las piezas fundidas.	Método experimental.

3. MARCO TEÓRICO

3.1 ANTECEDENTES

El mundo ha evolucionado de tal manera que las nuevas tecnologías se ha logrado optimizar un sin número de procesos industriales, en este caso la fundición de metales se ha ayudado de la impresión 3D para creación de modelos plásticos para la fundición de piezas de aluminio ya que estos modelos impresos permiten obtener modelos más complejos sin ayuda de equipos costos lo que reduce el costo y tiempo de construcción de los moldes.

El uso de tecnologías avanzadas como la impresión 3D y la ingería inversa ha cambiado significativamente el diseño y la fabricación de impulsores de bombas centrifugas hasta ahora los modelos de cimientos se fabricaban a mano en metal, lo que provocabas un desperdicio de material y largos tiempos de producción, estudios anteriores han demostrado que le uso de modelos informáticos y la impresión 3D pueden optimizar el `proceso de cimentación, mejorando la precisión de los componentes y reduciendo los gastos de fabricación. También se ha comprobado el uso de materiales como el aluminio y latón en lugar del hierro debido a sus cualidades mecánicas superiores y resistencia a la corrosión.

La técnica de fundición en moldes de arena, es una de las más utilizadas debido a su versatilidad, bajo costo y capacidad para producir piezas de gran tamaño y complejidad geométrica. Este método ha sido usado desde el comienzo de la metalurgia sin embargo este proceso se favorece de las nuevas tecnologías como la impresión 3D que ya se han probado que son más eficientes.

3.2 FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

3.2.1 Fundición de metales

La fundición es un proceso en el que metal derretido fluye por gravedad u otra fuerza hacia un molde en el que se solidifica con la forma de la cavidad de éste. El término fundición también se aplica al objeto que se fabrica por medio de este proceso. Es uno de los procesos más antiguos de conformación, pues se remonta a hace 6 000 años. El principio de la fundición parece sencillo se derrite metal, se vierte en un molde y se deja enfriar y solidificar; no obstante, hay muchos factores y variables que deben considerarse a fin de lograr una operación de fundido exitosa[1].

El proceso de fundición comienza con la creación de un patrón o modelo, el cual puede elaborarse con diversos materiales como metal, madera o plástico, según su uso. Este modelo se coloca en un molde de arena para darle forma a la misma. Una vez que la arena ha adoptado la forma deseada, se retira el modelo, dejando así su impresión en la arena.

Paralelamente, se prepara el metal fundido, este se calienta en un horno hasta alcanzar su punto de fusión y posteriormente, se vierte cuidadosamente sobre la superficie del molde. Después de que el metal se enfría y solidifica, se procede al desmolde, retirando la pieza fundida del molde. Finalmente, se realiza una limpieza de la pieza y se realiza los acabados necesarios para obtener el producto final.

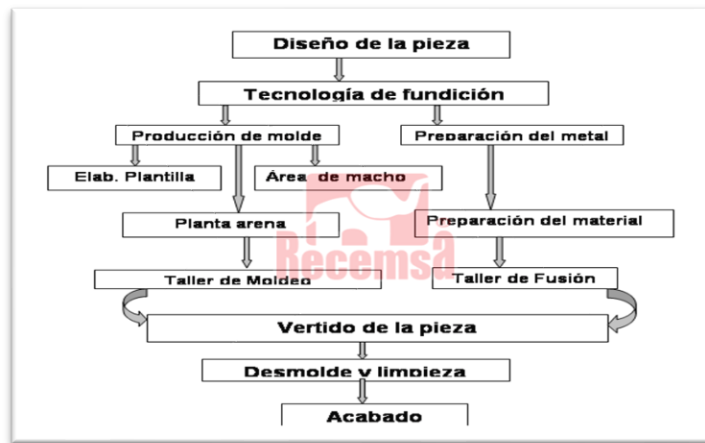


Figura 3.1 Diagrama de flujo para fabricación de piezas por Fundición [2].

3.2.2 Modelo para fundición

El proceso de fundición requiere un modelo, es decir, un “patrón” de tamaño real de la pieza, aunque más grande para que se tome en cuenta las tolerancias por contracción y maquinado en el fundido final. Los materiales que se usan para fabricar modelos incluyen madera, plásticos y metales. La madera es un material común para hacer modelos debido a la facilidad para darle forma. Sus desventajas son que tiende a deformarse y la arena que se compacta alrededor de ella la erosiona, lo que limita el número de veces que puede volver a utilizarse. Los modelos de metal son más caros, pero duran mucho más. Los plásticos representan un acomodo entre la madera y el metal. La selección del material apropiado para el modelo depende mucho de la cantidad total de fundidos por hacer[8].

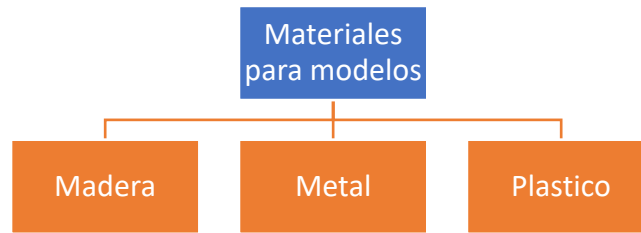


Figura 3.2 Materiales para moldes[8].

Hay varios tipos de modelos el más simple está hecho de una sola pieza y recibe el nombre de modelo sólido, tiene la misma forma que el fundido y su tamaño están ajustado para la contracción y el maquinado. Los modelos deslizantes consisten en dos piezas, que dividen la parte a lo largo de un plano que coincide con la línea divisoria del molde. En los modelos de placas ajustadas, las dos piezas del modelo deslizante están sujetas a los lados opuestos de una placa de madera o metal [8].

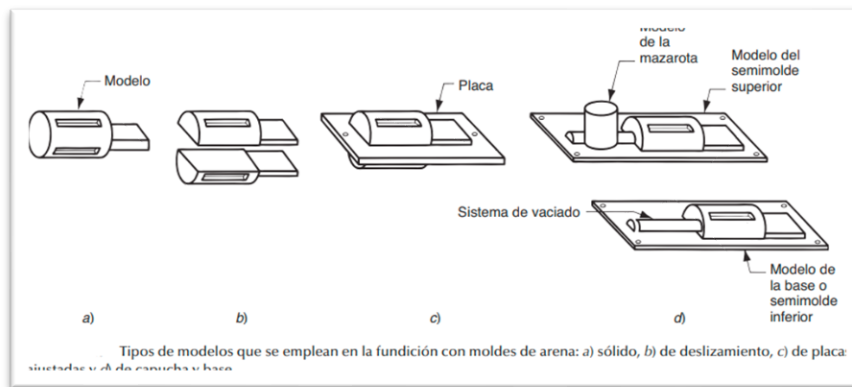


Figura 3.3 Tipos de modelo para molde[8].

Los modelos plásticos son diseñados a través de un software CAD para posteriormente ser creados con una impresora 3D según las especificaciones del modelo.

Diseño asistido por computadora (CAD)

El diseño asistido por computadora, abreviado habitualmente a CAD, consiste en el uso de computadores para ayudar en la creación de diseño y modelos en 3D. Este proceso es indispensable para la construcción de modelos plásticos impresos en 3D para la fundición[9].

Impresión de plástico 3D

La impresión 3D es un proceso por medio del cual se pueden producir objetos tridimensionales sólidos a partir de un modelo digital, a través de una PC. La impresión en 3D es proceso que constituye una tecnología de fabricación por adición, o sea, con aporte de material, donde el objeto tridimensional se crea mediante la superposición de capas sucesivas de material[9].

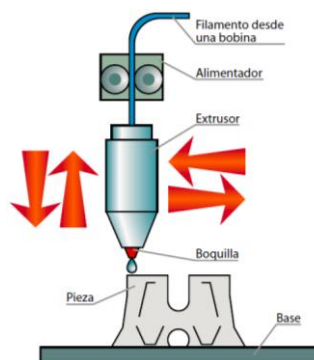


Figura 3.4 Impresión de plástico 3D[10].

Materiales utilizados en impresión de plásticos 3D

En el mercado actual hay una gran gama de materiales que son utilizados para realizar los trabajos de impresión, cada materia presenta ciertas características específicas, así como ventajas y desventajas que deben ser evaluadas en el momento que se va a realizar la impresión[11].

Material	Siglas	Temperatura de fusión	Biodegradable	Reciclable	Aspectos interesantes
Acrilonitrilo butadieno estireno	ABS	215-250 °C	NO	SI	Económico
Ácido poliláctico	PLA	160-230 °C	SI	SI	Proviene del maíz y la papa
Alcohol polivinílico	PVA	180-200 °C	SI	SI	Soluble en agua
Polycarbonato	PC	280-305 °C	NO	SI	
Ácido poliláctico flexible	Soft PLA	200-220 °C	SI	SI	
Polietileno de alta densidad	HDPE	225-230 °C	NO	SI	Económico. Resiste variedad de solventes
Nailon	-	240-250 °C	NO	SI	Tendencia a encogerse

Figura 3.5 Materiales de impresión [11].

Etapas de la impresión 3D

Diseño y modelado.-La impresión 3D consta de superficies virtuales de diseño asistido por ordenador (CAD) o animación de software de modelado, como guías para la impresión.

Dependiendo de la máquina que se utiliza, el material o aglutinante se deposita sobre el lecho de compilación o de la plataforma hasta que la capa de material y aglutinante se completa y el modelo 3D final se "imprime"[9].

Impresión.- Para hacer una impresión, la máquina lee el diseño y configura las capas sucesivas de líquido, polvo o material de lámina, para construir el modelo a partir de una serie de secciones transversales[9].

Terminado.- La resolución de la impresión es suficiente para gran parte de las aplicaciones, no obstante, una mayor resolución se puede lograr imprimiendo una versión algo sobredimensionada del objeto en resolución estándar, y luego retirar el material excedente con un proceso sustractivo de mayor resolución[9].



Figura 3.6 Etapas de impresión 3D[9].

3.2.3 Moldes para fundición

Un molde para fundir es un recipiente que contiene una cavidad en la que se vierte metal líquido para que solidifique y tome la forma del modelo, los procesos de moldeo son diferentes según la naturaleza del molde y el método de vertido. Así, según la naturaleza del molde pueden ser: de

molde permanente (de hierro colado, acero o grafito) o de molde perdido (arena y arcilla); y según el método de vertido, puede ser por gravedad o por presión[6].

La selección de molde depende de la complejidad de la pieza, grado de tolerancia respecto a las medidas establecidas, número de piezas a fabricar, coste del molde, acabado[6].

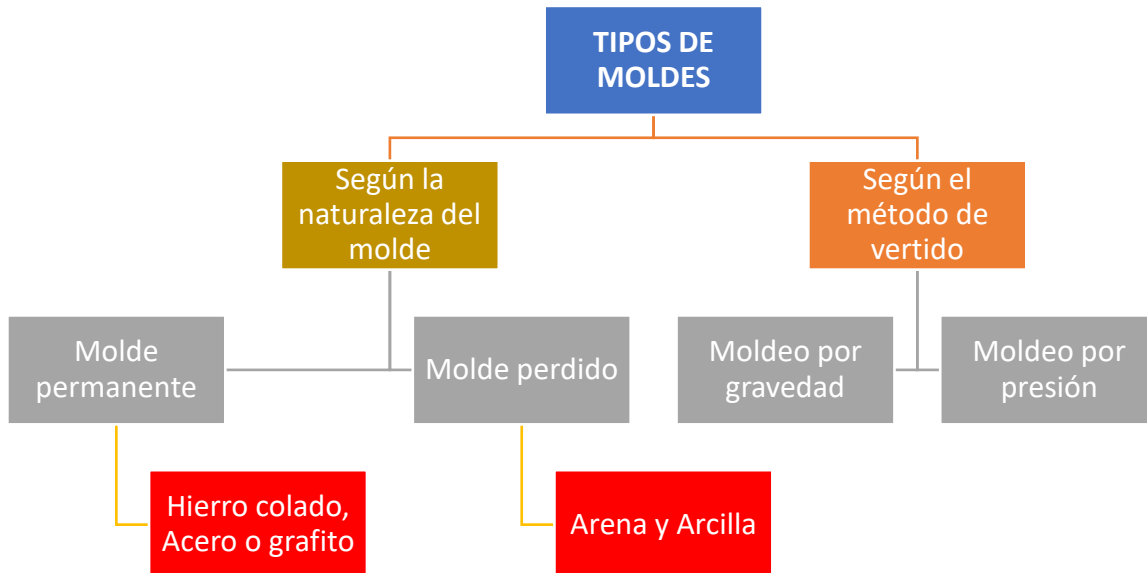


Figura 3.7 Tipos de molde[6].

Los componentes principales de un molde de arena se pueden visualizar en la siguiente figura.

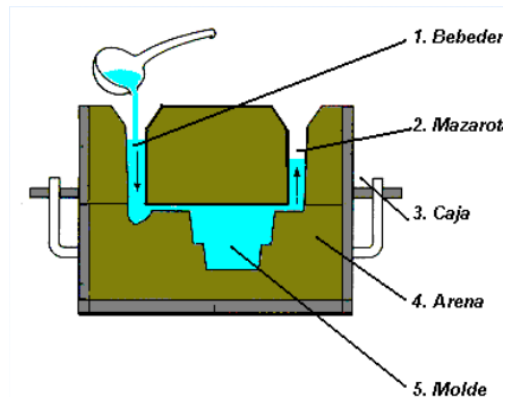


Figura 3.8 Partes de un molde de arena [7]

3.2.3.1 Arena para molde

El molde de arena se fabrica con la llamada mezcla de moldeo, que consiste en una mezcla de materiales inorgánicos (arena de sílice y aglutinante arcilloso), con cierta cantidad de agua[13].

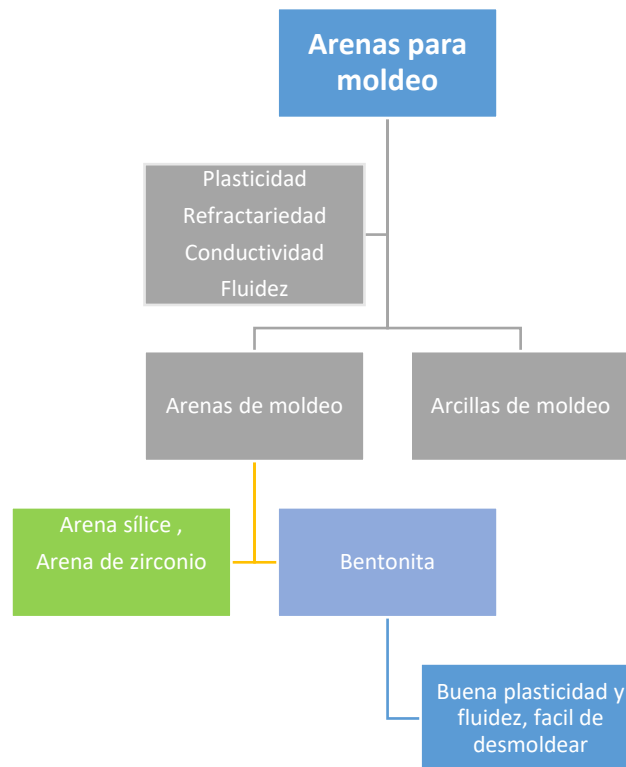


Figura 3.9 Arenas de moldeo [13].

Bentonita sódica.- Es una arena utilizada para la fundición de diferentes metales, es una arena natural que contiene sodio en su estructura cristalina. Se caracteriza por su capacidad de hincharse y absorber grandes cantidades de agua lo que permite manipularla de una manera más sencilla para crear moldes.



Figura 3.10 Bentonita sódica [4].

La bentonita tiene una excelente plasticidad para reproducir con fidelidad los detalles de la superficie del modelo. Los moldes conserven su forma cuando se retire el modelo por lo que cuenta

con buena cohesión, este tipo de arena tiene capacidad para fluir en el molde hacia todas sus partes en función, además cuenta con una buena desmoldeabilidad[4].

Además, la bentonita cuenta con muchas más propiedades las cuales se puede visualizar en el Anexo 3 de este proyecto.

Desmoldante para fundición

Los desmoldantes en moldes de arena se clasifican en función de su composición y método de aplicación. Su función principal es facilitar la extracción de los modelos sin dañar la superficie del molde de arena, reduciendo la fricción y evitando defectos en las piezas fundidas. Los desmoldantes más utilizados son Talco, Silicatos, Grafito[4].



Figura 3.11 Desmoldantes para fundición[3].

Grafito. - Cuenta con excelentes propiedades para el desmolde de piezas fundidas tiene una muy buena lubricación sólida, alta resistencia térmica, no contamina la superficie de la fundición, además de ser muy comercial y tener un costo razonable[3].

3.2.3.2 Cajas de moldeo

Contiene y soporta la arena durante el moldeo y permite la apertura del molde para la extracción del molde, las cajas de alinean con pasadores y guías, cuando se requieren más de una línea de partición se usan los “cohetes” que no son más que otra caja externa, normalmente son de madera, si la pieza es grande se deja la caja puesta, pero esta deberá ser de metal. Cuando se trata de una fabricación en serie se emplean cajas de dimensiones y formas especiales, conforme con las piezas vaciadas. Por lo general se trata de ajustar, en lo posible las cajas a la forma del modelo, con el objeto de reducir espacios para la arena con el consiguiente ahorro de mano de obra y de tiempo en el apisonado y en el desecado. Lo más sencillo es el moldeo en cajas de dos partes; sin embargo, en muchas ocasiones hay que recurrir a la acumulación de bastidores en mayor número,

especialmente tratándose de modelos de formas complicadas, se llama caja inferior y caja superior, si es caja de dos partes. Si se necesitan varias cajas se las designa así: caja inferior, caja intermedia, o cajas intermedias y caja superior. Para su ensamble correcto se utilizan espigas dispuestas en la caja superior, previendo las orejas correspondientes en la caja inferior. [14].

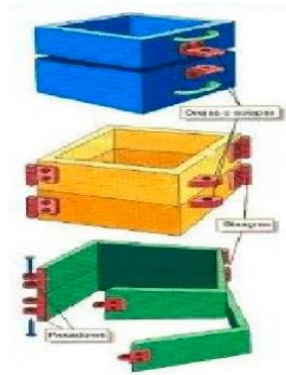


Figura 3.12 Cajas de molde [6].

Las cajas también se pueden clasificar de acuerdo con sus dimensiones existen cajas de pequeñas dimensiones, estas se manejan con las manos con ayuda de manijas mientras que las cajas de mayores dimensiones llevan muñones o empañaduras por los cuales es posible tomarlas con ayuda de un balancín y dos cuerdas o cadenas colgantes, de gran resistencia [6].

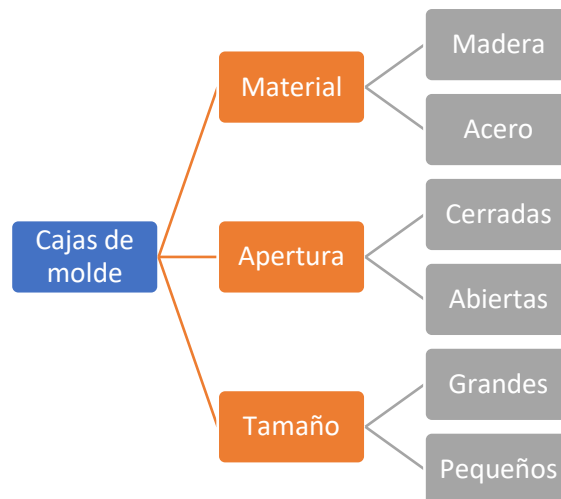


Figura 3.13 Tipos de cajas de molde[6].

3.2.4 Hornos de fundición

Un horno de fundición es una máquina que convierte el metal sólido en metal fundido, el cual utiliza una fuente de calor para aumentar la temperatura en su interior para llegar al punto de fundición del metal y estos equipos se utilizan para fabricar piezas metálicas.

Existen diferentes tipos de hornos utilizados para la fundición de metales, entre los más comunes se encuentran los hornos de inducción, los hornos de crisol y los hornos de reverbero. Cada tipo de horno tiene sus ventajas y desventajas dependiendo de la cantidad de material a fundir, el control de temperatura necesario y las características deseadas en el proceso. Existen diversos tipos de hornos utilizados en la fundición cada uno con características particulares que los hacen adecuados para diferentes aplicaciones

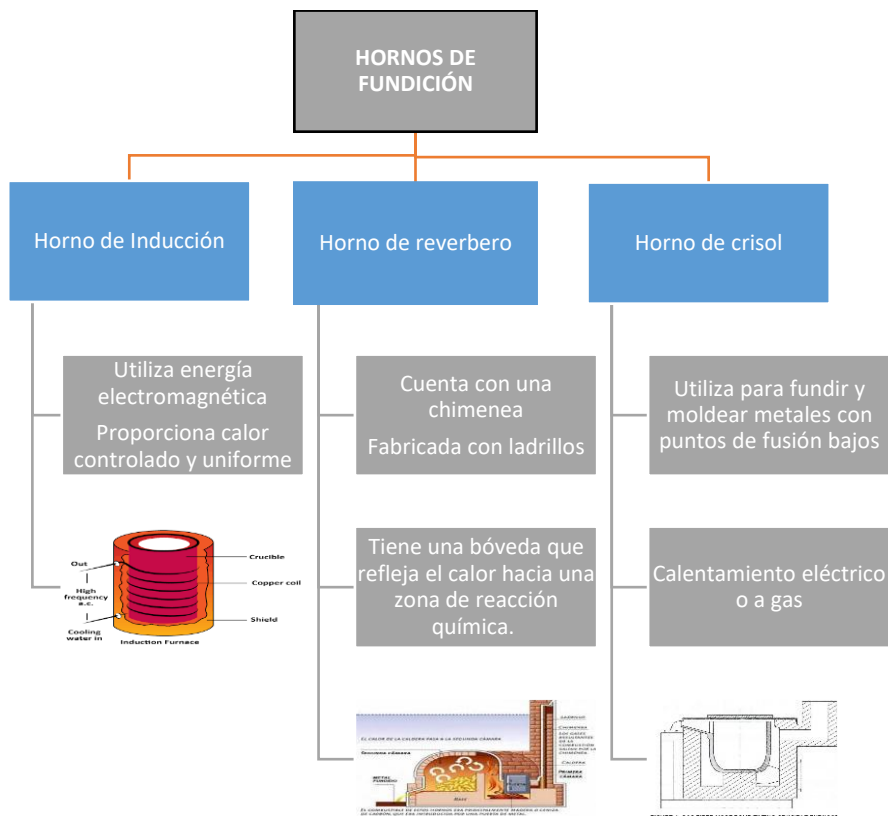


Figura 3.14 Tipos de hornos de fundición[2].

3.2.4.1 Hornos de Crisol para fundición de Aluminio

Un horno de crisol es una recámara a la cual se le suministra energía, almacena calor y promueve la transferencia de este a un metal contenido en un recipiente conductor del calor y resistente a la

acción del metal y a las altas temperaturas denominado crisol, el cual permite fundir el metal en su interior para luego ser vertido a un molde previamente preparado[3].

El crisol es la parte más importante de estos hornos, el crisol tiene una resistencia extremadamente alta a la temperatura, el punto de fusión debe ser por lo menos superior al del metal que se va a usar, también tiene que ser químicamente estable de lo contrario se corre el riesgo de que existan reacciones entre las paredes del crisol y el metal fundido, lo que puede deteriorar rápidamente el crisol[3].

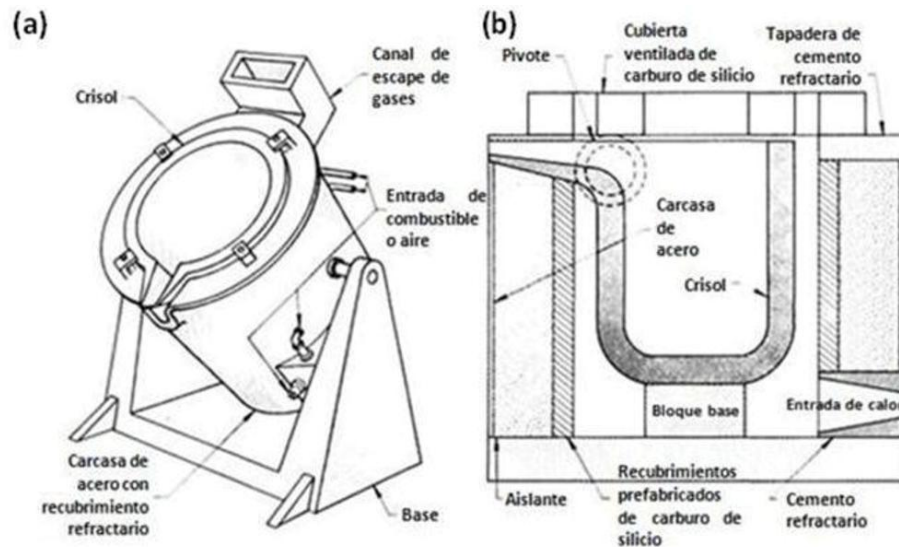


Figura 3.15 Sección de partes de horno de crisol[3].

Componentes principales de un horno de fundición de aluminio

- Crisol.- Es un recipiente diseñado para recibir y manipular el metal fundido[3].
- Tapadera.- La tapadera contendrá el crisol y estará elaborada de un material refractario ligero y poroso, ayuda a evitar las pérdidas de calor por las paredes del horno está fabricada de Grava refractaria, Arena refractaria y ladrillo refractario[4].
- Cubierta.- La cubierta es la encargada de evitar la salida de gases producto de una combustión [2].
- Base.- Es la encargada de brindar equilibrio al horno, seguridad y estabilidad.
- Carcaza, estructura o marco.- es el armazón exterior, esqueleto del horno de crisol[5].

Fuentes de energía para horno de crisol

Los hornos de crisol utilizan varias fuentes de energía para aumentar la temperatura en el crisol la elección de la fuente de energía depende del diseño del horno y la aplicación del mismo entre las más comunes tenemos la utilización de energía eléctrica o algún tipo de gas de combustible fósil[3].

Hornos calentados a base de energía eléctrica utiliza resistencia eléctrica para generar calor y fundir metales, son energéticamente eficientes proporcionan un control preciso de la temperatura además son adecuados para aplicaciones que requieren un calor constante, utilizados desde pequeña escala hasta grandes sistemas industriales.

Los hornos de crisol fijo a gas o a gasoil son utilizados para la fundición de materiales no ferrosos como el aluminio, bronce o el latón. El gas se utilizan a menudo en instalaciones industriales más grandes los cuales producen grandes cantidades de calor y son de fácil acceso y económicos[3].

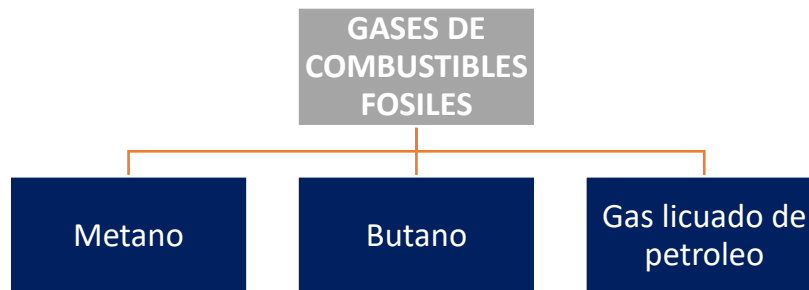


Figura 3.16 Gases para calentar hornos[3]

Gas licuado del petróleo (GLP)

Es una mezcla de hidrocarburos, principalmente propano y butano, que se obtiene del petróleo crudo o del gas natural. Se utiliza como combustible en la industria y para cocinar. Este tipo de gas es el más utilizado además tiene un bajo costo y es de fácil adquisición[3].

Calentamiento de crisol

La combustión para el calentamiento del crisol es un proceso fundamental para elevar la temperatura en el crisol, y puede generarse a través de dos tipos principales de llamas: llama directa y llama indirecta. Cada una tiene funciones y características específicas que las hacen más adecuadas para diferentes procesos de calentamiento y fusión[3].

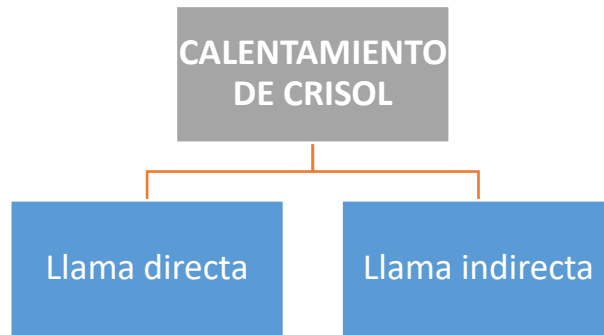


Figura 3.17 Calentamiento de hornos[3].

La llama directa es aquella en la que la combustión tiene contacto directo con la superficie del crisol que se desea calentar. En este proceso, el calor se transfiere principalmente por radiación y convección, lo que permite alcanzar temperaturas más altas de manera rápida y eficiente además optimiza el consumo de combustible y tiene mayor uniformidad en el calentamiento del crisol[3].

3.2.5 Proceso de fundición de metales

Los procedimientos comienzan fundiendo el metal y vertiéndolos en moldes que reproduzcan la forma de la pieza. Se aplica esencialmente para metales, plásticos, vidrio, cemento.

Un molde es un recipiente que presenta una cavidad en la que se introduce un material en estado de fusión que, al solidificarse, adopta la forma de la cavidad. Luego se deja enfriar el tiempo necesario hasta que se solidifique y se extrae del molde.

Los moldes, en general, constan de dos piezas, perfectamente acopladas. Por medio de este método podemos fabricar y obtener piezas de formas muy diversas, siendo ampliamente utilizado en el campo de los recipientes de productos y carcasas de máquinas[6].

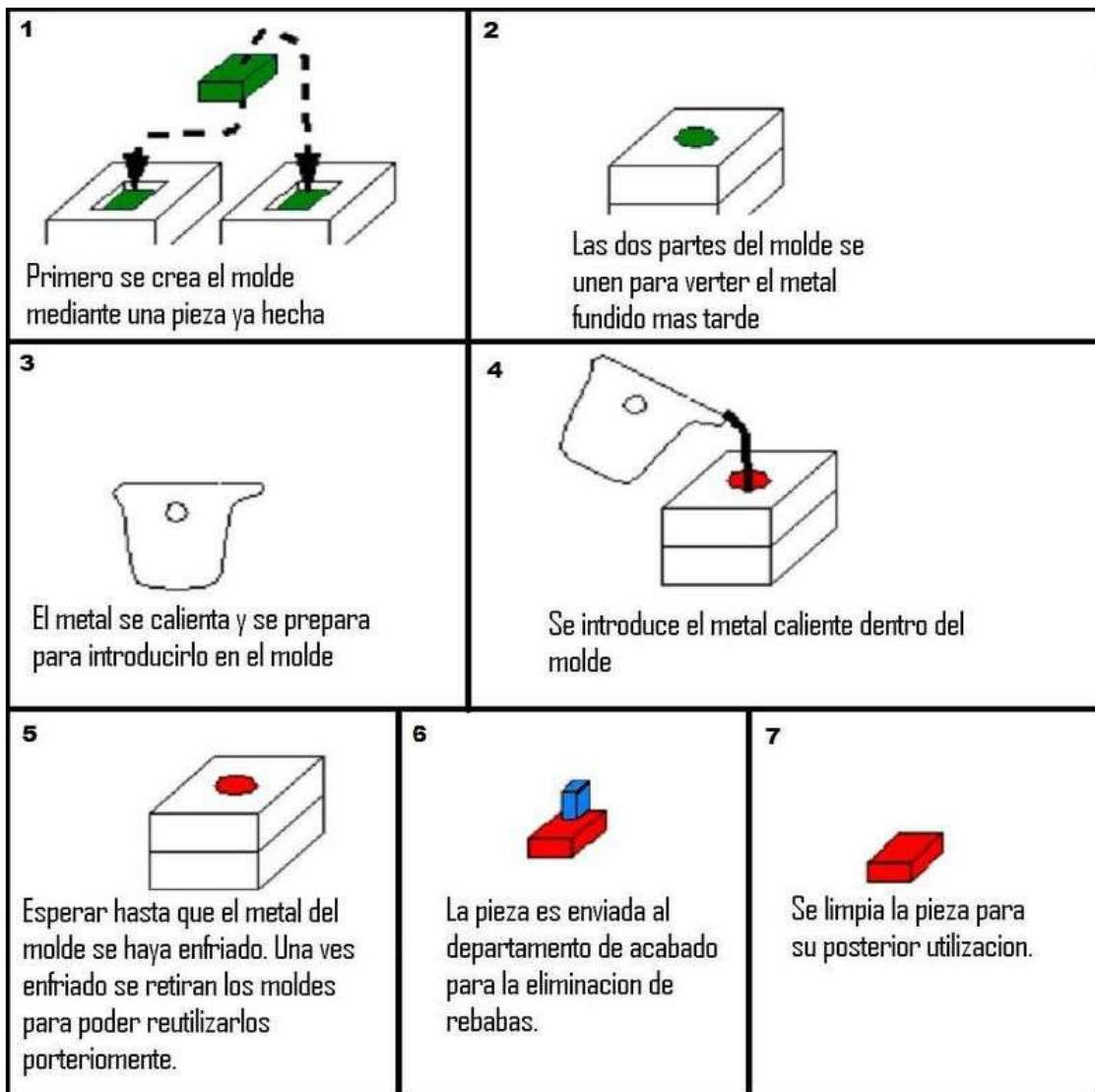


Figura 3.18 Proceso de fundición.[4].

3.2.6 Proceso de fundición de aluminio

El aluminio es un metal ligero, de color blanco plateado, con gran resistencia a la corrosión. Su símbolo químico es Al y tiene una densidad baja, lo que lo convierte en un material ideal para aplicaciones donde el peso es un factor importante, como en la industria aeroespacial, automotriz y de construcción. Este metal es muy dúctil y maleable, lo que permite su fundición en diferentes formas sin perder sus propiedades [15].

Los pasos para la fundición de aluminio en moldes de arenas se describen a continuación:

1. DISEÑO DEL MODELO: Se crea un patrón o modelo que representa la forma final de la pieza que se desea obtener. Este modelo puede estar fabricado de materiales como madera, plástico o metal, para la creación de modelo comienza con el diseño de modelo en algún programa CAD para darle las dimensiones de construcción posterior seleccionar el material de construcción del modelo [15].

2. PREPARACIÓN DEL MOLDE: El modelo se coloca en un material refractario, para crear una cavidad con la forma del modelo. Una vez que el material se compacta alrededor del modelo, este se retira, dejando una impresión exacta en el molde[15].

Moldeo en arena: Consiste en copiar un modelo, empleando arenas o tierras de moldeo, las cuales contienen material arcilloso dándole a estas propiedades de plasticidad, elasticidad y maleabilidad para poder obtener así la forma del mismo a través de la compactación de dicho material.

Una vez finalizado el moldeo, se extrae el modelo, quedando así el molde en el cual luego se vierte el metal fundido, esta técnica permite obtener piezas que requieren una buena calidad superficial, este es un proceso económico, apto para temperaturas altas y todo tipo de metales, pero tiene el inconveniente de tener que realizar un molde para cada pieza[15].

3. FUNDISIÓN DEL METAL: El aluminio se calienta en un horno de crisol hasta alcanzar su punto de fusión 660°C , convirtiéndolo en líquido. Durante este proceso, es importante controlar la temperatura y la composición del metal para garantizar su calidad[15].

4. VACIADO DEL METAL: Una vez fundido, el metal líquido se vierte cuidadosamente en el molde preparado. Este paso debe realizarse de manera controlada para evitar turbulencias y evitar defectos en la pieza final. El moldeo por gravedad se realiza vertiendo el metal fundido sobre un molde, de manera que éste se desplace por su propio peso este proceso es idóneo para fundir aluminio y otros metales[15].

5. ENFRIAMIENTO Y SOLIDIFICACIÓN: El metal se deja enfriar dentro del molde hasta que se solidifica por completo, adoptando la forma de la cavidad.

6. DESMOLDE: Una vez que el metal se ha enfriado y solidificado, se retira del molde. Esto puede implicar la rotura del molde, especialmente si se utiliza arena. Las superficies del modelo deben diseñarse de forma que en su extracción no se produzcan desprendimientos de las paredes del

molde. Por ello, se deben respetar ángulos mínimos en la dirección de desmolde así como áreas óptimas de los canales de alimentación que provoquen velocidades razonables del fluido metálico en el interior del molde. El ángulo de salida para el desmolde para moldes de madera se encuentra entre 3° y 0,5°[15].

Al verter el metal líquido y este ocupar la cavidad del molde, se produce contracción en el enfriamiento hasta la temperatura ambiente provocando que la pieza final tenga dimensiones algo menores a las deseadas. Teniendo en cuenta este fenómeno, el modelo se debe generar de acuerdo al grado de contracción del metal de trabajo[15].

7. ACABADO Y LIMPIEZA: La pieza de aluminio fundida se somete a procesos de limpieza para eliminar restos del molde y cualquier imperfección superficial. Además, se realizan acabados como lijado, pulido o mecanizado para obtener las dimensiones y el aspecto deseados[15].

4. MÉTODOS Y PROCEDIMIENTO

4.1 ALCANCE

Este proyecto se enfoca en desarrollar piezas de aluminio fundido mediante procesos técnicos utilizando un horno artesanal de fundición de crisol calentado por gas licuado de petróleo (GLP), con modelos plásticos impresos en 3D y arenas de moldeo para el vertido del metal fundido. Este enfoque no solo tiene el potencial para desarrollar productos de aluminio virgen y reciclado de una manera más eficiente si no también poder obtener un mejor acabado en los componentes fundidos, y de este modo ayuda a la reducción de tiempo y costos en la producción.

El primer paso es la elaboración de modelos de una hélice para motor fuera de borda mediante impresión 3D utilizando plástico. Las dimensiones detalladas de estos modelos se encuentran especificadas en el Anexo 1. Para la creación de los moldes, se emplea arena y cajas de moldeo, siguiendo las técnicas tradicionales de fundición en arena. Una vez preparados los moldes, se procede al proceso de fundición. Para esto se utiliza un horno artesanal de crisol el cual calienta el aluminio hasta su punto de fusión. El metal fundido se vierte en los moldes mediante la técnica de vertido por gravedad. Después del llenado, se deja enfriar la pieza hasta que solidifica por completo. Finalmente, se retira el molde para obtener la pieza fundida de aluminio.

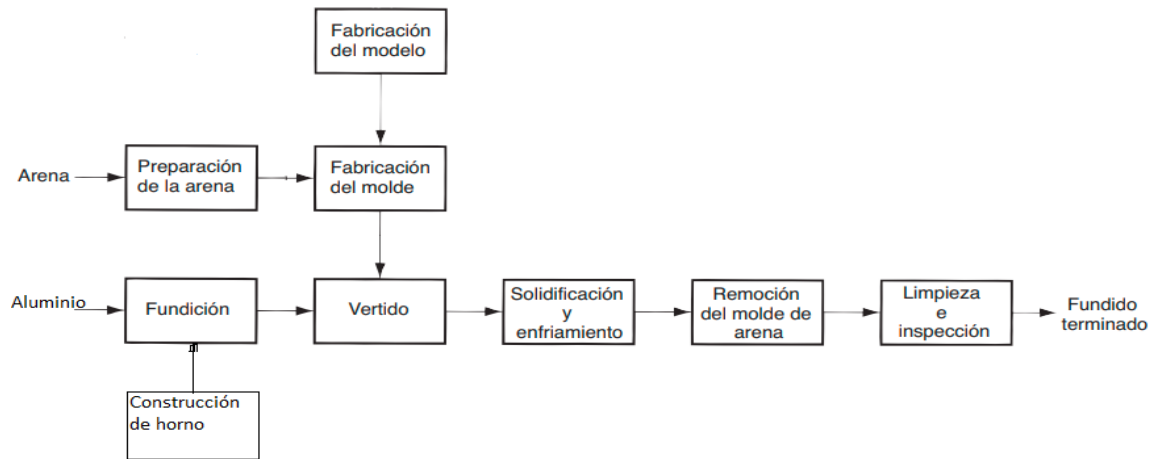


Figura 4.1 Organigrama de proyecto [8].

4.2 DISEÑO DE MODELO PLÁSTICO

Para la creación de moldes plásticos impresos en 3D el primer paso es el diseño, esto se puede realizar en varios tipos de software de diseño asistido por computadora (CAD), en este caso se utiliza el programa SOLIDWORKS, este programa ofrece una gran variedad de herramientas para crear, simular, administrar datos y proyectos de ingeniería. Todas estas funciones ayudan a diseñar productos mejores, de forma más rápida y de manera más rentable. Esto favorece para la creación del modelo del molde que estamos buscando, mediante diferentes comandos construimos el modelo deseado según las medidas y especificaciones que se encuentran en los planos, un factor de gran importancia en el diseño es la contracción volumétrica del aluminio por el cambio de estado líquido a sólido el cual se debe tomar en cuenta para sobre dimensionar la pieza, esto evita procesos adicionales posteriores a la fundición. Esta es una de las ventajas de la impresión plástica 3D en la fundición, se puede variar rápidamente los modelos y en cuestión de horas tener listo en nueva pieza para el molde reduciendo así costos y tiempos de producción.

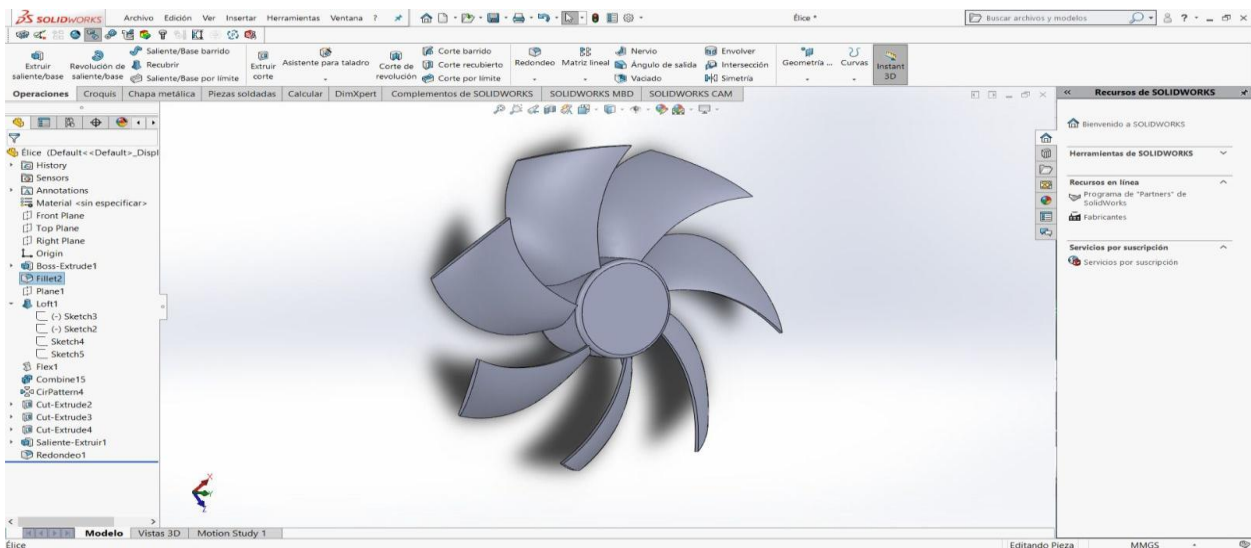


Figura 4.2 Diseño de componentes

4.2.1 Construcción de moldes

La creación de moldes es una de las partes más importantes en el proceso de fundición de cualquier metal, debido a que estos moldes son los encargados de dar la forma al metal que está fundido, existen varias formas de crear un molde así como se puede utilizar diferentes materiales para los mismos, tomando en cuenta estos precedentes se busca optimizar este proceso con la ayuda de la tecnología, la impresión 3D se ha convertido en una herramienta muy versátil y útil en diferentes ámbitos debido a su adaptabilidad, en la actualidad esta tecnología se ha vuelto más accesible, por lo que se ha considerado una excelente opción para la creación de moldes, ya que permite conseguir mejores acabados y se puede diseñar los moldes con detalles más complejos y reducir los tiempos de creación de moldes en comparación a moldes tradicionales.

4.2.2 Selección del material para impresión 3D

Después de diseñar el modelo para el molde en el programa SolidWorks, es necesario evaluar qué tipo de impresora usar y qué material de impresión 3D es óptimo para este proyecto, se debe tomar en cuenta las características que tiene cada uno previo a la selección.

Se utilizó una impresora 3D por inyección de polímeros, este tipo de impresoras usan filamentos de termo-plástico como son el PLA, ABS, TUVALLU, Nailon entre otros, el funcionamiento básico de estas consiste en fundir el plástico construyendo con él capas muy finas superpuestas para crear el objeto. El termoplástico fundido necesita ser pulido posterior a la fabricación de la pieza. La

ventaja en estas impresoras es que las piezas son más resistentes, aunque el proceso suele ser más lento en comparación a otras tecnologías de impresión 3D. La tecnología de inyección de polímero es la más extendida y son las que mayor presencia tienen en el mercado.

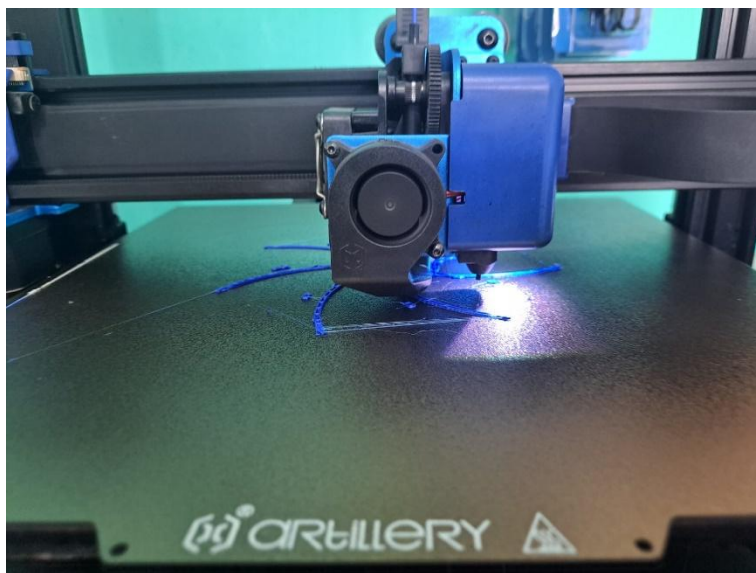


Figura 4.3 Impresora por inyección de polímeros

Los parámetros tomados en cuenta en este proyecto son un acabado suave, y debe tener una buena resistencia mecánica, para que ayude con la creación del molde y que no se deforme durante su manipulación en el proceso de moldeo, debido a esto se realizó la tabla comparativa para buscar la mejor opción.

Tabla 4.1 Comparación de materiales plástico para impresión 3D

MATERIAL DE IMPRESIÓN	VENTAJAS	DESVENTAJAS
ÁCIDO POLILÁCTICO (PLA)	Fácil y rápida impresión. No es necesario el uso de cama caliente. Material muy estable. Biodegradable bajo condiciones adecuadas, ya que se obtiene de recursos renovables.	Resistencia térmica baja (a partir de los 60 °C pierde consistencia) Más frágil que otros materiales de impresión 3D (poca resistencia mecánica). No aguanta la humedad. Debes mantenerlo en un lugar seco.
ACRINOLITO BUTADIENO ESTIRENO (ABS)	Tiene una gran gama de colores y es reciclable.	Puede desprender olor intenso a plástico, y es recomendable usarlo en zonas con ventilación.

	<p>Muy estable a temperaturas altas (Aprox. 80 °C – 90 °C) Se puede lijar, pulir, perforar Resistente a químicos. Alta resistencia a los impactos.</p>	<p>Contracción entre capas más rápida que el PLA, si el entorno es demasiado frío. Pudiendo quedar las capas dañadas.</p>
<p>NYLON (POLIAMIDA)</p>	<p>No necesita ventilador de capa Calidad de la impresión: con un acabado suave. Presenta una muy buena adherencia de capa. Muy resistente. Tiene un coeficiente de fricción bajo, es decir, se puede utilizar para impresiones de engranajes, o piezas que giren alrededor de un eje.</p>	<p>Este material absorbe la humedad con mucha facilidad, complicando su conservación. Cambios bruscos de temperatura durante la impresión pueden deformar el material. Puede ocurrir Warping (torceduras durante la impresión), usa algún método de adhesión para evitarlo.</p>
<p>PET (TEREFTALATO DE POLIETILENO)</p>	<p>Alta transparencia, incluso siendo el filamento de color. Flexible e impermeable. Permite cocción en micro-ondas. Muy útil para crear cobertores resistente a la humedad. Alta transparencia, incluso siendo el filamento de color. Alta resistencia al desgaste y corrosión. Resistencia química y térmica Resistente a impacto.</p>	<p>Levemente tóxico. No es biodegradable. Pierde consistencia a partir de 70°C</p>

Durante este estudio se determinó que el NYLON (POLIAMIDA) es el material que mejor se acopla al proyecto, este material presenta una superficie menos rugosa que los otros materiales lo cual ayuda al acabado final de la pieza de aluminio a demás detener un coeficiente rozamiento bajo que es ideal para este proyecto.

Posterior a la selección del material se procede a la impresión en 3D para esto se utilizó un programa llamado Ultimaker Cura el cual permite controlar la velocidad, acabado y plataformas para la impresión, un punto a tomar en cuenta es que los archivos creados en Solidworks debe ser guardado en una extensión de archivo llamado .STL para que el programa de la impresora lo pueda

leer sin ningún problema. Además se realiza un análisis que es necesario cuando se trata de piezas complejas, o simplemente puede realizarse si se necesita asegurarse totalmente que el objeto este apto para imprimirse en 3D. Un buen análisis permite detectar errores en la malla que surge de la conversión a STL.

Se realiza varios prototipos de una hélice de motor fuera de borda que fue el diseño creado para este proyecto, estos prototipos si bien tienen la misma forma varían en su densidad y velocidad de impresión para saber si influye en el tiempo y acabado final del componente.

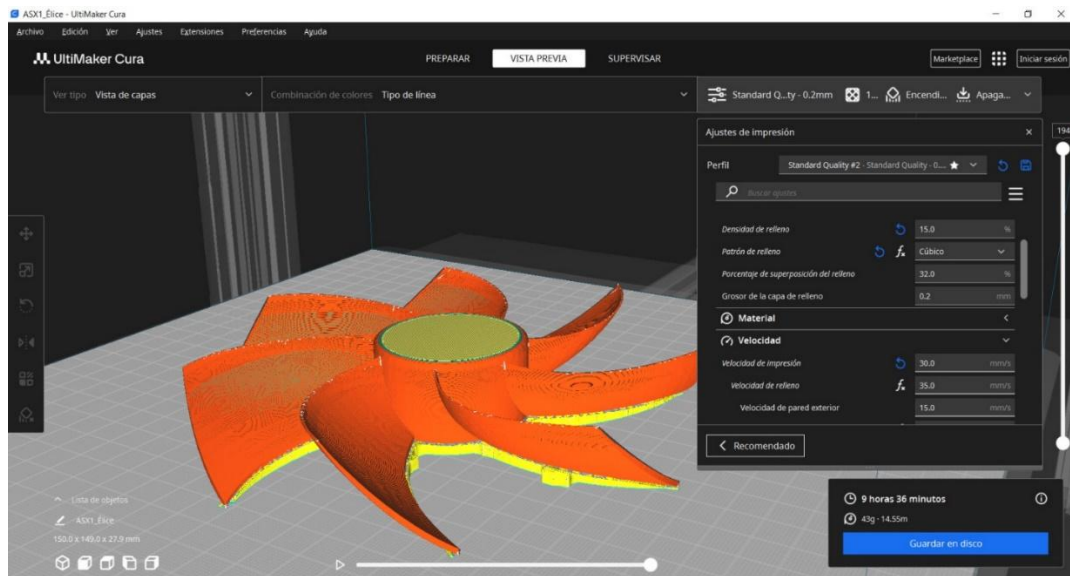


Figura 4.4 Interface Ultimaker Cura

La impresión 3D es un proceso que adhiere material en capas para crear el objeto diseñado en 3 dimensiones, por este motivo este proceso suele durar varias horas dependiendo de las dimensiones y acabados, para estos prototipos se busca la mayor eficiencia por lo que se usó diferentes configuraciones en velocidad y densidad en la impresión o también conocido como relleno como se muestra a continuación en la Tabla 4.2 Cuando se habla del relleno se habla de la estructura que es impresa por dentro del objeto. Un ejemplo sería un cubo si bien por fuera las 6 caras del cubo serian solidas por dentro no tendría una estructura completamente sólida como se muestra en la Figura 4.4.

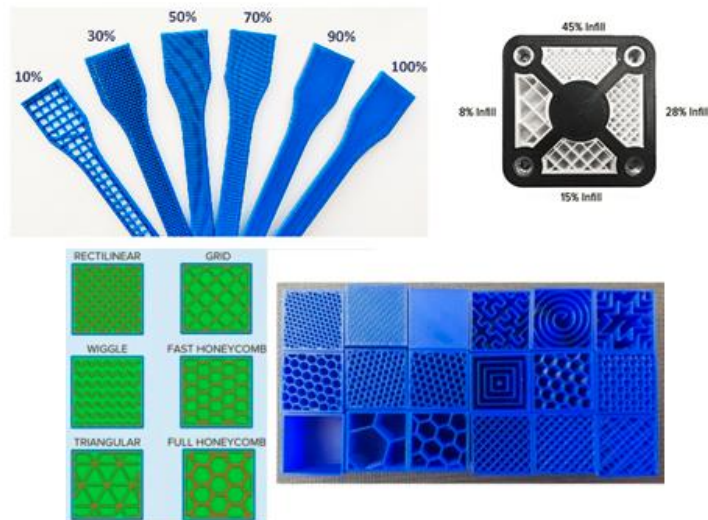


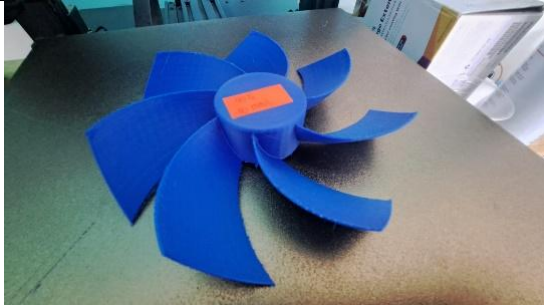
Figura 4.5 Relleno para Impresión 3D[10]

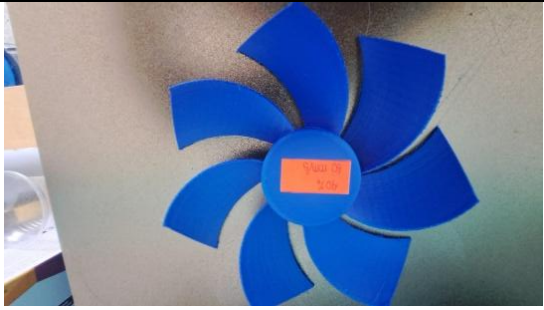

Tabla 4.2 Parámetros de impresión 3D

VELOCIDAD DE IMPRESIÓN	DENSIDAD DE RELLENO	TIEMPO DE IMPRESIÓN(Horas)	PESO DE IMPRESIÓN(gr)
30 mm/s	Relleno: 15%	9,00	43,00
60 mm/s	Relleno: 40%	7,00	46,00
90 mm/s	Relleno: 80%	6,00	51,00

Con las piezas impresas en 3D es necesario revisar las superficies de cada uno de estas y si es el caso realizar un post procesado para mejorar su acabado para evitar defectos al momento de realizar la fundición del metal las piezas impresas se pueden observar en la Tabla 4.3 .En la cual se muestra y se describe las características de cada pieza impresa.

Tabla 4.3 Modelos de impresión 3D

IMPRESIÓN	HÉLICE	CARACTERÍSTICAS
30 mm/s -Relleno: 15%		<p>Mayor tiempo de impresión.</p> <p>Buen acabado superficial y sin defecto en la superficie.</p> <p>Menor peso y rigidez.</p>

60 mm/s- Relleno: 40%		<p>Buen tiempo de impresión.</p> <p>Buen acabado superficial pero con algunas discontinuidades.</p> <p>Buen peso y rigidez.</p>
90 mm/s- Relleno: 80%		<p>Menor tiempo de impresión.</p> <p>Acabado superficial rugoso.</p> <p>Mayor peso y rigidez.</p>

4.3 CREACIÓN DEL MOLDE Y SELECCIÓN DE ARENA

Con las piezas para la fundición impresas en 3D el siguiente paso es construir las cajas para los moldes estos ayudan a mantener la arena en su lugar durante el proceso de fundición, esta caja se construye de madera debido a que no soportan cargas demasiado fuertes y su superficie no es muy extensa, su construcción es relativamente sencilla y en caso de algún daño en las mismas se puede reparar con facilidad.



Figura 4.6 Caja de molde para fundición

Después de tener la pieza impresa y construida la caja para el molde el siguiente paso es seleccionar la arena para la fundición, por lo cual se realiza una tabla comparativa de las características de las

arenas de fundición disponibles en el mercado, la Tabla 4.4 muestra las ventajas y desventajas de las arenas seleccionadas.

Tabla 4.4 Comparación de arenas para fundición

ARENA	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Arena Verde	<p>Se puede decir que la arena verde es el material menos costoso de moldear.</p> <p>Minimizando la amenaza de desgarro por calor que otros materiales para moldear.</p> <p>Como no experimenta horneado, es menos probable que la arena verde se deforme durante la fabricación de un molde.</p>	<p>La superficie del producto elaborado a partir de arena verde no suele ser lisa y, en otras palabras, áspera y tosca.</p> <p>El brillo superficial de los productos de arena verde sufrirá daños a medida que aumente su peso.</p> <p>Al ser blando, puede dar lugar a más defectos de fundición, es decir, restos de arena, agujeros de arena.</p>
Resina de fundición de arena	<p>La arena de resina presenta una buena fluidez y fácil compactación. La característica anterior abre la oportunidad de ajustar el tiempo de eyección.</p> <p>Después del endurecimiento, la arena de resina presenta un alto grado de resistencia. Tal profesional asegura que la arena de resina no se deforme fácilmente en el siguiente proceso.</p>	<p>La arena de resina desprende un olor irritante en el proceso de moldeo y fundición.</p> <p>En comparación con la arena verde, la arena de resina es mucho más costosa.</p>
Bentonita	<p>Es resistente a altas temperaturas</p> <p>No pierde su estructura química con el calor excesivo</p> <p>Proporciona cohesión y plasticidad a la mezcla</p> <p>Ayuda a mantener la precisión dimensional de los moldes</p> <p>Garantiza que las piezas no se deformen al enfriarse.</p>	<p>Necesita ser preparada</p> <p>Generación de residuos como arena, grava y desechos</p> <p>Inexactitudes dimensionales en las piezas fundidas</p> <p>Errores de vertido</p>

La bentonita es un tipo de arena usada para la fundición de diferentes metales, Garantiza que las piezas no se deformen al enfriársela, este tipo de arena debe ser mezclada con agua y debido a esto se puede crear una superficie menos rugosa, la proporción de mezcla es de por cada libra de bentonita se necesita 0,25 lt de agua aproximadamente hasta obtener una masa con un a consistencia maleable, esta mezcla se coloca sobre una marco de madera de modo que cubra toda la superficie del marco.



Figura 4.7 Mezcla de bentonita

Con la mezcla colocada sobre el marco se debe aplica una presión sobre toda la superficie de la bentonita para compactar la mezcla, esto con el fin de evitar que existan burbujas de aire dentro de la arena, evitando discontinuidades al momento del fundido del aluminio, con la mezcla lista y compactada se coloca una capa de bentonita en polvo sobre la mezcla para evitar que la pieza impresa en 3D se pegue al molde, se coloca la pieza impresa en el molde luego se completa el molde con otra capa de bentonita hasta cubrir totalmente el marco del molde superior como se muestra en la imágenes de la Figura 4.14 .



Figura 4.8 Creación de molde

Después de cubrir los moldes de arena se deja unos minutos para que la bentonita se compacte para posteriormente desmoldar y realizar los agujeros para el ingreso del metal (bebedero) estos se realizan para que pueda ingresar el metal fundido, se levanta el molde superior con cuidado para mostrar la forma de la pieza, de este modo el molde para la fundición está listo.



Figura 4.9 Desmoldaje de pieza 3D

4.3 METODOLOGIA PARA FUNDIR EL ALUMINIO

Debido a la ausencia de un horno de fundido para la realización de este proyecto es necesario la construcción e implementación de un horno artesanal de crisol, esto permite fundir el metal y alcanzar la meta de este trabajo, ya que este nos permite trabajar de una mejor manera el aluminio.

4.3.1 Diseño en software CAD del horno

El primer paso para el desarrollo de este proyecto es la construcción del horno para lo cual se usó un software CAD muy utilizado en varios ámbitos industriales llamado SolidWorks, este es un programa muy versátil permite diseñar, ensamblar y probar los componentes según cada uno de nuestras necesidades.

Para comenzar con el diseño se debe buscar las dimensiones que requerimos y esto depende principalmente de la cantidad de aluminio que se pretende manejar en cada proceso de fundición la cual según el estudio previo a la realización del proyecto es de 5,4 litros. Por esta razón se buscó un crisol que se ajuste a este proyecto, en el mercado existe un sin número de opciones de crisoles para horno de fundición que son la parte central de las mismas, al realizar un estudio de mercado para comparar calidad, precio y disponibilidad se seleccionó el crisol de la marca “SIGMA” en su modelos pequeños Al 20.

Red Diamond “Sigma” Al Shape (Small Crucibles)

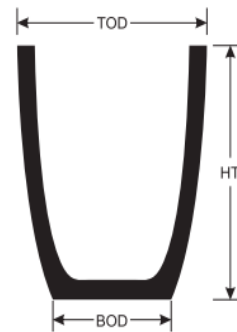


Figura 4.10 Dimensiones de crisol[3]

Tabla 4.5 Características de crisol

TYPE SIZE	PART DESCRIPTION	HT mm	TOD mm	BOD mm	BRIMFUL CAPACITY WATER LITER
Al 20	AX0230H0265	265	230	140	5,4

4.3.2 Determinación del espesor de las paredes cilíndricas del horno.

Al seleccionar los espesores se debe tomar en cuenta criterios de diseño, montaje y operatividad.

El diámetro total (D_{TOTAL}) del horno dentro del cálculo se representa en la siguiente ecuación (4.1).

$$D_{TOTAL} = D_{CRISOL\ EXTERNO} + 2ESP_{LADRILLO} + 2ESP_{CEMENTO} + 2AISLANTE_{TER} + 2ESP_{PLACA} \quad (4.1)$$

Donde

D_{TOTAL} : Diámetro total

$D_{CRISOL\ EXTERNO}$: Diámetro externo del crisol

$ESP_{LADRILLO}$: Espesor ladrillo refractario

$AISLANTE_{TER}$: Espesor manta cerámica

ESP_{PLACA} Espesor Chapa metálica

4.3.3 Altura del horno.

La altura del horno está estrechamente vinculada con la ubicación que debe de tener el quemador, que con respecto a bibliografía consultada en la investigación se sugiere una altura entre 6 a 12 cm, tomando como referencia la base del horno. Mediante esta evaluación se procedió a construir la base que soporta el crisol a 8 cm, de donde obtenemos la siguiente ecuación:

La altura del horno dentro del cálculo se representa en la siguiente ecuación (4.2):

$$ALTURA\ DEL\ HORNO = L\ CILINDRO + L\ TAPA\ DEL\ HORNO \quad (4.2)$$

Donde:

$ALTURA\ DEL\ HORNO$: Altura total del horno

$L\ cilindro\ horno$: longitud del cilindro del horno

$L\ tapa\ del\ horno$: longitud de tapa del horno

Posterior al dimensionamiento de los componentes del horno se procede a la realización del diseño en un software CAD ayudados de planos que se encuentran en los Anexos. SolidWorks nos ayuda a

visualizar de una manera clara y realista la forma y proporciones de nuestro proyecto y cambiar cualquier aspecto en el diseño de ser necesario tal como se muestra en la Figura 4.3.

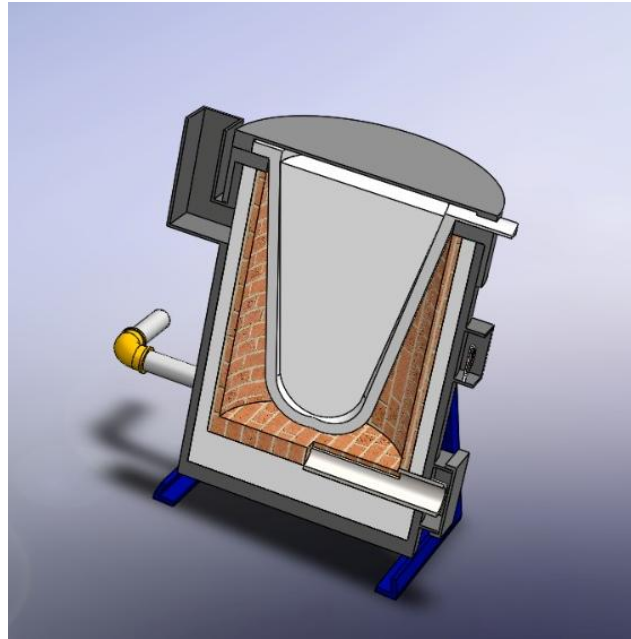


Figura 4.11 Modelado de horno 3D

Al tener las dimensiones del horno debemos realizar un estudio termodinámico para poder continuar con la selección de los diferentes materiales para el horno, este estudio está guiado a la cantidad de calor necesario que se debe utilizar para llevar a cabo la fundición del aluminio de una manera técnica y segura.

4.3.4 Cálculo del calor

El cálculo del calor en hornos de fundición de aluminio es un proceso esencial para garantizar la eficiencia energética y la calidad del metal fundido. A continuación, se presenta una guía general para realizar este cálculo:

Se realizó el proceso de fundición con 14,5 kg de aluminio (5,4 L) que es la capacidad máxima del crisol empezando desde una temperatura inicial de 25°C hasta su punto de fusión de 660°C, con una eficiencia del horno del 70%.

1. Determinar la cantidad de aluminio a fundir

Durante la selección del crisol las características de la masa se muestran en unidades de litro así que procedemos a cambiarla a kg mediante la siguiente ecuación (4.3)

$$\begin{aligned} masa_{aluminio} &= volumen_{crisol} * densidad_{aluminio} & (4.3) \\ masa &= 0,0054m^3 * 2700 \text{ kg}/m^3 \\ masa &= 14,5 \text{ kg} \end{aligned}$$

Donde:

m : La cantidad de aluminio (kg).

T_1 : Temperatura inicial ($^{\circ}C$).

T_2 : Punto de fusión del aluminio ($^{\circ}C$)

2. Calcular el calor sensible

El calor sensible es el calor necesario para elevar la temperatura del aluminio desde T_1 hasta T_2 sin cambiar su estado. Se calcula mediante la ecuación (4.4).

$$\begin{aligned} Q_{sensible} &= m * c_p (T_2 - T_1) & (4.4) \\ Q_{sensible} &= 14,5kg * 0,897 \text{ J}/g^{\circ}C * (660^{\circ}C - 25^{\circ}C) \\ Q_{sensible} &= 14500g * 0,897 \text{ J}/g^{\circ}C * (635^{\circ}C) \\ Q_{sensible} &= 8259127,5 \text{ J} \end{aligned}$$

Donde:

m : Masa de aluminio (kg).

$densidad_{aluminio}$: Densidad de aluminio $2700kg/m^3$

$volumen$: En m^3

3. Calcular el calor latente de fusión

El calor latente es el calor necesario para cambiar el estado del aluminio de sólido a líquido sin cambiar su temperatura. Se calcula mediante la ecuación (4.5)

$$Q_{latente} = m * L \quad (4.5)$$

$$Q_{latente} = 14,5Kg * 397KJ/Kg$$

$$Q_{latente} = 5756500J$$

Donde:

$Q_{latente}$: Calor latente (en joules o calorías).

m : Masa de aluminio (kg).

L : Calor latente de fusión del aluminio (aproximadamente 397 kJ/kg o 94.6 cal/g).

4. Calor total requerido

El calor total necesario para fundir el aluminio es la suma del calor sensible y el calor latente como se especifica en la ecuación (4.6).

$$Q_{total} = Q_{sensible} + Q_{latente} \quad (4.6)$$

$$Q_{total} = 8259127,5 J + 5756500J$$

$$Q_{total} = 14015627,5 J$$

5. Calor real

Eficiencia del horno: Utiliza la ecuación (4.7). No todo el calor generado por el horno se transfiere al aluminio. La eficiencia del horno (η) debe tenerse en cuenta, por lo que el calor total requerido por el horno será:

$$Q_{horno} = \frac{Q_{total}}{\eta} \quad (4.7)$$

$$Q_{horno} = \frac{14015627,5 J}{0,7}$$

$$Q_{horno} = 20022325 J$$

Donde η es la eficiencia del horno (un valor entre 0 y 1).

Este valor representa la energía térmica que el horno debe generar para fundir el aluminio, considerando las pérdidas y la eficiencia del horno.

4.3.5 Consumo de combustible.

El consumo de combustible se valora en proporción al gasto de la energía calórica del horno, y el poder calorífico inferior del combustible, por lo que utilizamos la ecuación (4.8) para determinar el consumo de combustible.

$$mc = \frac{Q_{TOTAL}}{H_I} \quad (4.8)$$

Dónde:

mc = Gasto de combustible en Kg/h

QT = Consumo calórico del horno $20022325 \frac{J}{h}$ o $478545 Kcal/h$

H_i = Poder Calórico inferior del gas GLP $10,900 Kcal/Kg$

$$mc = \frac{Q_{TOTAL}}{H_I}$$
$$mc = \frac{478545 Kcal/h}{10900Kcal/Kg}$$
$$mc = 0,45Kg/h$$

4.3.6 Construcción de cilindro metálico

Construcción del cilindro metálico la fabricación de la carcasa exterior del horno se realiza con acero AISI 1020 de 3 mm de espesor, la cual se procedió a cortar según las dimensiones de los planos. Con la plancha metálica con las dimensiones adecuadas se procede a utilizar la baroladora para darle a la plancha una forma cilíndrica, posteriormente se realiza una suelda con electrodo 6010 en los puntos de unión de los borde de la placa para formar una pieza sólida. Con el cilindro de metal para el horno listo, se procede a realizar los cortes para la instalación del quemador y la chimenea de acuerdo con los planos, se realiza unos trazos para señalar la ubicación exacta de los cortes y luego utilizando un disco de corte para sacar el material necesario.



Figura 4.12 Cilindro de chapa metálica

Después de realizar los cortes en el cilindro metálico se instala la chimenea, la misma que fue fabricado de tubo cuadrado y fue soldada a la estructura cilíndrica, la chimenea servirá para la evacuación de los gases producidos por la combustión del GLP, además de la chimenea se procede a la instalación de los ejes que ayudaran al vertido del aluminio derretido en lo moldes y también se suelda la parte inferior del horno todo esto acorde con las medidas de los planos. Para la construcción de la base porta horno utilizamos tubo cuadrado de acero, el cual procedió a cortar según especificaciones de los planos. Este acero tiene grandes propiedades para soportar los esfuerzos de los pesos de la estructura del horno así como los esfuerzos de la temperatura, adicional procedemos a instalar las chumaceras en cada una de las bases del horno las cuales ayudaran al movimiento del cuerpo de horno



Figura 4.13 Soldadura de chimenea

Luego de completar la construcción de los soportes y el cuerpo del horno de fundido se ensambla todos los componentes para revisar su correcto funcionamiento y que cumpla con las medidas establecidas. Después de revisar el funcionamiento de la estructura del horno se aplica un tratamiento anti corrosivo mediante la aplicación de varias capas de pintura



Figura 4.14 Ensamble de horno y la base

Para la instalación del material refractivo se cortan los bloques por su sección longitudinal para poder conseguir crear una sección semicircular en el momento de su instalación en la parte interior del cilindro del horno, luego de cortar bloques se instala en el cilindro con una mezcla de concreto para crear la pared aislante de ladrillo refractivo como se ve en las imágenes a de más de eso se

instaló el quemador de gas licuado de petróleo el cual es activado con un encendido electrónico para evitar accidentes por el contacto con el fuego, y es controlado desde la parte exterior del horno. Después de crear la pared refractaria de bloques y concreto se debe dejar secar por al menos 24 horas para continuar con la instalación de los demás componentes faltantes, el siguiente paso es instalar el aislante térmico que va entre la pared refractaria y el diámetro interior del cilindro metálico para evitar que el calor emitido por el quemador se transfiera al exterior a través de las paredes del mismo, el aislante térmico tiene que cubrir toda la superficie para que tenga una mejor eficiencia como se visualiza en la figura. El paso final de la construcción es la instalación del crisol al interior de la cámara de concreto y bloques, la instalación de la tapa del crisol para continuar y proceder con las pruebas del horno para evitar cualquier incidente durante su uso con alumnos.



Figura 4.15 Instalación de ladrillos y concreto

4.4 FUNDICIÓN DE ALUMINIO

4.4.1 Calentamiento de aluminio

El siguiente paso para la creación de componentes de aluminio es la utilización del horno que se construyó para este proyecto, previo a la utilización del horno se debe seguir las instrucciones que se muestran en el manual de operación del horno para realizar los procedimientos con total seguridad. Comenzamos con el encendido del horno de aluminio el cual debe alcanzar una temperatura aproximada de 700°C , al encender el horno el crisol debe calentarse previo a colocar

el aluminio esto tarda alrededor de dos hora para evitar el choque térmico por el cambio de temperatura abrupto.

Para este proyecto se utiliza una aleación de aluminio ASTM 6061 se trata de una aleación endurecida con elementos de silicio y de magnesio, es uno de los tipos de aluminio de la serie 6xxx. Es una de las aleaciones de aluminio más comunes en la actualidad, ya que es resistente a la corrosión, no es contaminante y es sencillo de manipular, además esta aleación es ideal para la elaboración de piezas maquinadas con excelente calidad y es utilizada para trabajos que requieran buen acabado superficial, este metal está presente en block de motores de los automóviles de donde se adquirió para este proyecto. La temperatura de fusión del aluminio 6061 se encuentra entre 588°C a 652°C.

Después de la selección del aluminio y del tiempo de calentamiento del horno se coloca el aluminio 6061 en el interior del crisol y se procede a sellar el horno para que la temperatura del horno aumente y llegue al punto de fusión del aluminio aproximadamente 660 °C, esto dependerá de la cantidad de aluminio que se funda, es importante no excederse en la temperatura de fundición ya que esto puede comprometer la estructura interna del aluminio y sus propiedades, estos procesos se pueden visualizar en la Figura 4.16 .



Figura 4.16 Fundición de aluminio

4.4.2 Vertido del aluminio

Este proceso es especialmente delicado no solo por el riesgo al operario, también se debe cuidar el tiempo de vaciado después de llegar al punto de fundición del aluminio debido a que este puede

enfriarse en cuestión de pocos segundos y alterar la maleabilidad del aluminio a momento de llenar los moldes produciendo de este modo fallas en la pieza fundida, otro parámetro a tomar en cuenta es la velocidad de vaciado esta debe ser muy precisa para que llene el molde totalmente sin producir turbulencias, esta turbulencia debe evitarse pues puede producir la degradación del molde y el desprendimiento del mismo afectando directamente a la forma final de la pieza. Además, la turbulencia tiende a la generación de óxidos metálicos que dificultan la solidificación y degradan la calidad de la fundición, la velocidad y tiempo de vaciado del aluminio en el molde se calcula mediante las ecuaciones (4.9) y (4.12).

$$v_{vaciado} = \sqrt{2 * g * h} \quad (4.9)$$

$$v_{vaciado} = \sqrt{2 * 9,8 \text{ m/s}^2 * 0,2\text{m}}$$

$$v_{vaciado} = 1,98 \text{ m/s}$$

Donde:

$v_{vaciado}$: Velocidad de vaciado del aluminio (m/s)

g : Gravedad (m/s²).

h : Altura de vertido de aluminio (m)

$$A_{vaciado} = \pi * r^2 \quad (4.10)$$

$$A_{vaciado} = \pi * 0,075\text{m}^2$$

$$A_{vaciado} = 0,017\text{m}^2$$

Donde:

$A_{vaciado}$: Área de vaciado del aluminio (m²)

π : Constante 3,14

r : Radio del área de vaciado (m)

$$Q = v_{vaciado} * A_{vaciado} \quad (4.11)$$

$$Q = 0,0177\text{m}^2 * 1,98 \text{ m/s}$$

$$Q = 0,035m^3/s$$

Donde:

Q : Gasto volumétrico (m^3/s)

$$T_{llenado} = \frac{V_{llenado}}{Q} \quad (4.12)$$

$$T_{llenado} = \frac{3,11 * 10^{-2}m^3}{0,035m^3/s}$$

$$T_{llenado} = 1,8 s$$

Donde:

$T_{llenado}$: Tiempo de llenado del molde (s)

V : Volumen de molde (m^3)

Con el aluminio 6061 en el horno se espera que el metal llegue a su punto de fusión y se derrita totalmente, una vez en este estado el aluminio debe ser vertidos en el molde según los parámetros calculados, el vaciado del metal fundido dentro de la cavidad del molde se realiza por gravedad a través de una abertura en la parte superior de estos (bebedero), esto esta mostrado en el la figura 4.17. El volumen aproximado de aluminio fundido necesario para la hélice es $3,11 * 10^{-2}m^3$ según los diseños creados en Solidwords.



Figura 4.17 Vertido de aluminio

4.4.3 Desmoldaje de la pieza

Como paso final el aluminio fundido en el molde se enfría a temperatura ambiente, esto tomara algunos minutos hasta que el aluminio se solidifique y se enfríe para poder proceder al desmoldaje del componente fundido mediante vibración. La pieza fundida resultante requiere una limpieza inicial en la que se elimine la posible arena adherida a las paredes del componente y los posibles residuos. Además, se hace necesario separar los conductos de alimentación, así como posibles rebabas y excesos de material ahora podemos visualizar nuestra pieza forjada en aluminio. De este modo se realiza el proceso de fundición de aluminio con molde 3D en arenas de fundición.

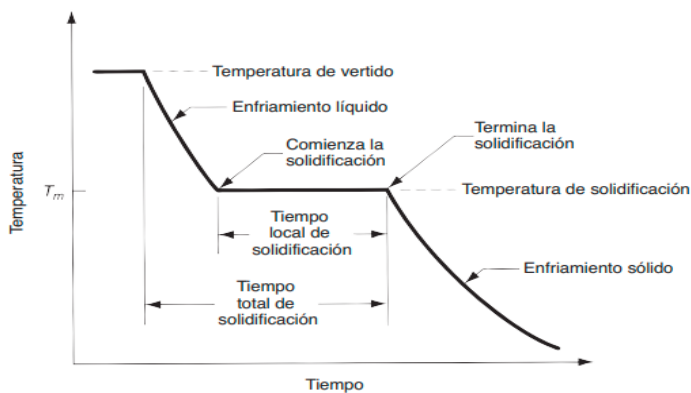


Figura 4.18 Piezas fundidas

5 ANÁLISIS DE RESULTADOS

En búsqueda de obtener los mejores resultados en el proceso de fundición se procede a la variación de diferentes parámetros como son tiempos de vertido del metal, proporciones en la mezcla de bentonita, diámetro, tiempo y costos de producción en comparación de métodos tradicionales, los cuales están mostrados en los gráficos del presente capítulo.

5.1 ANÁLISIS DE CONSTRUCCIÓN DEL HORNO

Durante las pruebas de fundición de aluminio el horno fabricado para este proyecto cumplió su funcionamiento de una manera satisfactoria llegando al punto de fusión del aluminio sin ningún inconveniente superando fácilmente los 700°C, los cálculos realizados para su dimensionamiento y funcionamiento de horno se acoplaron a la realidad del proyecto lo que permitió realizar varias fundiciones de aluminio sin ningún inconveniente, la selección de materiales para la construcción fue la correcta ya que se realizó una investigación previa a la construcción para seleccionar los mejores materiales, gracias a la construcción del horno de fundición los tiempos de producción de las piezas se redujeron y además se pueden realizar las fundiciones de aluminio con un menor riesgo para el operario.

5.2 ANÁLISIS DE FUNDICIÓN DE ALUMINIO SEGÚN MATERIAL DE MOLDE

En busca de encontrar los mejores resultados se realizó varias pruebas en el proceso de fundido, se realizó una comparativa entre moldes, utilizando moldes de metal, arena común y bentonita para ver cuál presenta mejor eficiencia y mejores acabados

El primer fundido se realizó en un molde metálico creado únicamente para esta prueba el cual nos mostró un problema durante su fabricación ya que no se puede obtener superficies con muchos detalles sin la utilización de equipos especializados que son muy costosos, también durante el desmoldaje la remoción es muy compleja lo que termina en daños en la pieza, no se puede disipar bien el calor porque no existe mucha superficie de contacto, pero el acabado superficial es de buena calidad aunque no se puede controlar la cantidad de vertido.



Figura 5.1 Molde de acero

El segundo fue el fundido en arena común el cual presento ventajas como desventajas, entre sus ventajas está el fácil desmoldaje y la disipación de calor, además de esto se puede crear superficies complejas pero la creación de los modelos para la fundición suele ser muy demorosos y caros, aunque en su principal desventaja es la presencia discontinuidades en la superficie por la propia estructura de la arena.



Figura 5.2 Molde de arena común

El último caso probado fue la utilización de bentonita el cual uno de sus desventajas es que se debe mezclar con agua en una proporción adecuada lo que puede aumentar el tiempo de fabricación, sin embargo tiene ventajas notables por ejemplo se acopla mejor al modelo en el molde, Ayuda a

mantener la precisión dimensional de los moldes, garantiza que las piezas no se deformen al enfriarse y produce una mínima cantidad de defectos en la superficie de la pieza.

Tabla 5.1 Análisis de moldes

MATERIAL DE MOLDE	ACABADO SUPERFICIAL	POROSIDAD	COMPLEJIDAD DE FORMA	PRECISIÓN DIMENSIONAL
Acero	2	2	5	4
Arena común	4	4	2	3
Bentonita	2	2	2	1

*Calificación relativa 1 es el mejor, 5 es el peor

Al analizar los datos se observó que los moldes de bentonita tienen una ventaja en comparación con los otros moldes de otros materiales, tomando en cuenta que lo que se busca en este proyecto es reducir tiempos en la producción ya que tiene menos defectos superficiales y se reduce los tiempos de post procesados.

5.2.1 Análisis de costo de fabricación de modelo

Al realizar una investigación se recopiló información acerca de costos y tiempos de producción de modelos para fundición en diferentes materiales, como se muestra en la siguiente tabla comparativa, en esta tabla se muestra que el modelo impreso en 3D es más económico y rápido de producir.

Tabla 5.2 Análisis costos de moldes según material

MATERIAL DE MOLDE PARA FUNDICIÓN	TIEMPO DE FABRICACIÓN (Horas)	COSTO (USD)
Acero	16,00	100,00
Aluminio	15,00	100,00
Yeso	15,00	90,00
Madera	18,00	90,00
Impresión 3D	6,00	20,00

5.3 ANÁLISIS DE TIEMPO DE VERTIDO DEL ALUMINIO 6061 EN EL MOLDE

El proceso de vertido del aluminio desde el crisol hasta el molde es uno de los pasos más importantes en el proceso de fundición, no solo por el uso de material a alta temperatura sino porque existe un lapso de tiempo muy corto para realizarlo, este afecta directamente a la fluidez del aluminio fundido en el molde y por consiguiente en la forma y calidad de la pieza fundida.

Durante la fabricación de este proyecto se realizó varias pruebas buscando el tiempo óptimo para este proceso en el horno que se construyó, esto permitió la recolección de datos para poder tabular nuestro avance.

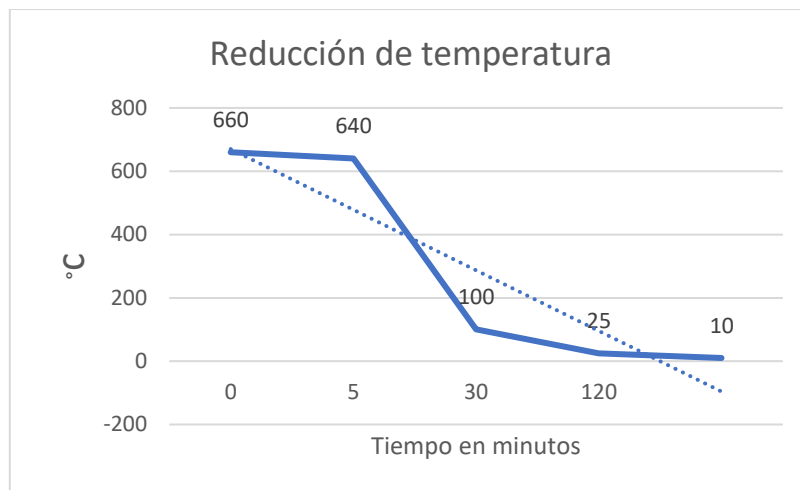


Figura 5.3 Reducción de temperatura en el vertido de aluminio

Durante la búsqueda del tiempo óptimo para el vertido del aluminio fundido se puede constatar que entre menor sea el intervalo de tiempo es más eficiente debido a la pérdida de temperatura en este intervalo lo que afecta la fluidez del metal en el interior del molde, esto puede afectar directamente en la superficie de la pieza fundida provocando que no exista una adecuada distribución del metal dentro de los moldes, al perder temperatura el aluminio comienza a endurecerse por esta razón es un proceso que se debe realizar en un lapso muy corto, máximo en los primeros 60 segundos antes de apagar el horno como se muestra en la figura 5.3.

5.4 ANÁLISIS DE DIÁMETRO DE BEBEDERO DE VERTIDO EN MOLDES

Otro parámetro a tener en cuenta durante la fundición de aluminio es el diámetro que existe en los moldes para el ingreso del aluminio, este proceso se realizó mediante una recolección de datos

experimentales, este parámetro que aunque parece poco relevante influye de una manera muy significativa en el proceso de fundición, esto porque si el material no puede ingresar de manera correcta al molde el aluminio se desperdicia o perdería temperatura lo que evitaría que las piezas sean creadas de manera correcta además, la velocidad de vaciado deberá ser precisa ya que debe llenar la totalidad del molde sin producir turbulencias. La turbulencia necesita ser evitada pues producen el daño del molde y el desprendimiento de sus partes afectando directamente a la forma final de la pieza. Además, la turbulencia tiende a la generación de óxidos metálicos que dificultan la solidificación y degradan la calidad de la fundición.

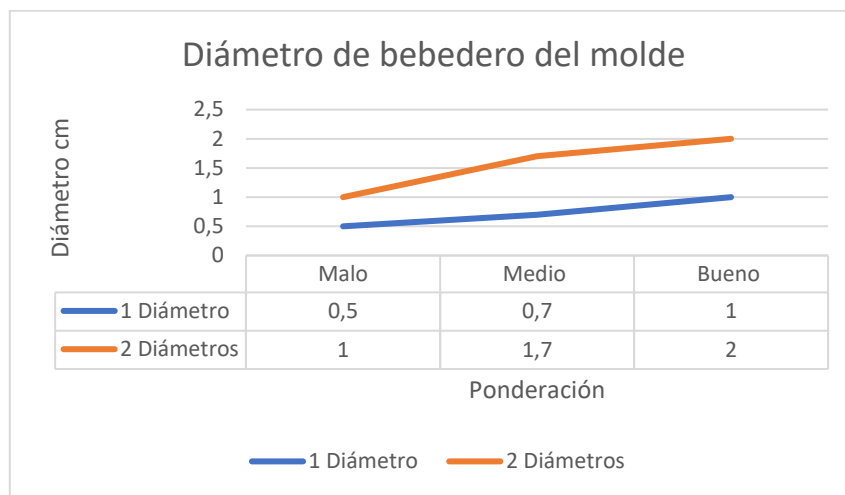


Figura 5.4 Diámetro de vertido de aluminio

Al realizar el proceso práctico se determinó que el mejor diámetro para el ingreso del material es 1 cm con un solo bebedero para verter el aluminio por gravedad, si bien dos bebederos ayudan a un mejor ingreso del aluminio tiende a perder mucho material y temperatura al no ser un componente de grandes dimensiones, por esa razón un solo bebedero de 1 cm de diámetro ayuda a un correcto ingreso y distribución del aluminio fundido al interior del molde de bentonita como se muestra en la gráfica de la figura 5.4.

5.5 ANÁLISIS DEL TIEMPO DE ENFRIADO DEL ALUMINIO 6061

Después de la fundición del aluminio e siguiente paso es sacar el aluminio del molde, ahora si bien la superficie del aluminio se enfría rápidamente no se solidifica de inmediato, esto conlleva un gran inconveniente ya que la pieza fundida se puede dañar si se desmolda y manipula demasiado pronto lo que terminaría cambiando la forma esperada de la pieza después de la fundición, esto con llevaría

más trabajo posterior al desmolde de la pieza. Durante el desarrollo del proyecto se pudo constatar ciertos patrones en el comportamiento del aluminio los cuales ayudaron a determinar el tiempo aproximado óptimo antes de desmoldar y comenzar a trabajar con las piezas que fueron fundidas. Como se muestra en el grafico siguiente.

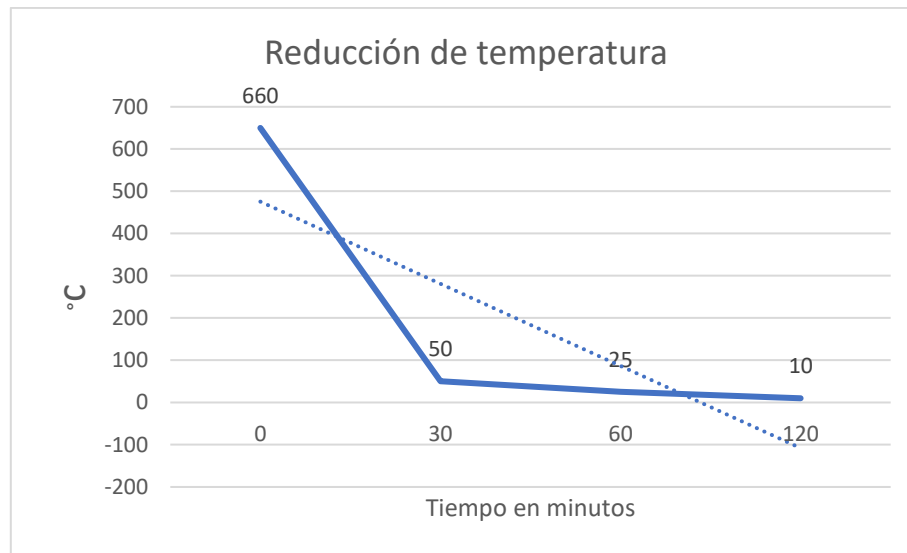


Figura 5.5 Tiempo de enfriado de aluminio 6061

Esto muestra que después de 30 minutos la temperatura se reduce drásticamente en la pieza fundida sin embargo no se encuentra en condición de ser manipulada de manera normal, sin bien la pieza ya puede ser desmoldada se debe realizar con mucho cuidado la mejor opción es dejar que se enfríe en el lapso de dos horas para poder trabajar sin ningún riesgo de daño en la superficie por el cambio abrupto de temperatura.

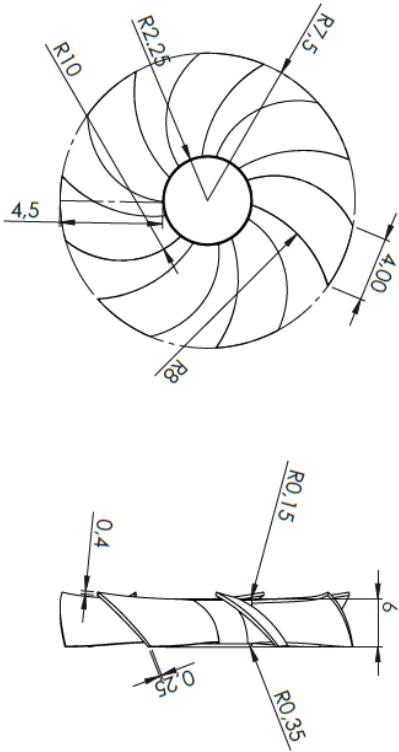
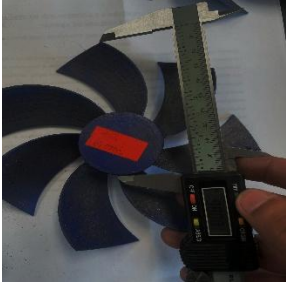
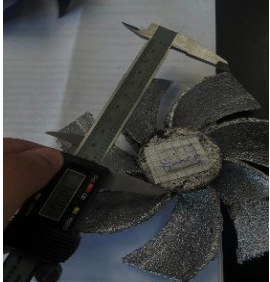
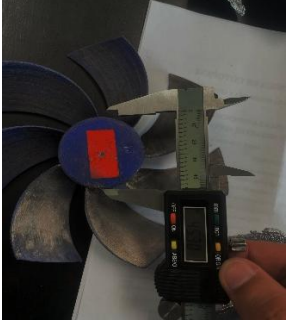



Al verter el metal líquido este ocupará la cavidad del molde aproximadamente $3,11 * 10^{-2} m^3$, se produce contracción en el enfriamiento hasta la temperatura ambiente provocando que la pieza final tenga dimensiones algo menores a las deseadas. Teniendo en cuenta este fenómeno, el modelo se debe generar de acuerdo al grado de contracción del metal de trabajo.

5.6 ANÁLISIS CONTRACCIÓN DEL MATERIAL

Durante el proceso de impresión 3D de la hélice de motor fuera de borda se debe realizar un sobre dimensionamiento del 1,65% que es porcentaje de contracción del aluminio según la bibliografía

consultada, este porcentaje es suficiente para cubrir el fenómeno de contracción del aluminio sin afectar sus dimensiones ni su acabado.

Tabla 5.3 Medición de componente

DISEÑO CAD	IMPRESIÓN 3D	PIEZA FUNDIDA
		
		
		

Las imágenes de los planos muestran las dimensiones de las piezas fundida estas son las medidas final que se debe obtener en su producción, las dimensiones de la imagen de la impresión 3D muestra los valores de finales más un aumento de un 1,65% en sus proporciones para cubrir la contracción del aluminio fundido, y los valores mostrados en la pieza fundida son similares a las dimensiones de los planos. Esto se muestra en la Tabla 5.4 donde esta detallado cada uno de estos valores.

Tabla 5.4 Comparación de medidas de contracción

Nº	DETALLE	MEDIDA PLANOS (mm)	MEDIDA MOLDE 3D (mm)	MEDIDA PIEZA(mm)	CUMPLE LAS DIMENSIONES
1	Diámetro Eje central	45,00	46,00	45,00	SI
2	Diámetro de Longitud total	150,00	152,40	150,50	SI
3	Altura total	60,00	61,00	60,00	SI
4	Ancho de palas	40,00	40,67	40,00	SI
5	Espesor de palas	4,00	4,00	4,00	SI

5.7 ANÁLISIS TOLERANCIAS DE GEOMETRÍA EN HÉLICES DE MOTOR FUERA DE BORDA

Se realizó una comparación física de las hélices impresas en 3D con las hélices fundidas para ver las discontinuidades que se presentan entre ellas. Como se muestra en las imágenes de la figura 5.6, se creó una plantilla en papel para poder visualizar las diferencias de mejor manera, se tomó en cuenta las curvas aerodinámicas de la hélice para crear un patrón en el papel como se muestra en las tablas 5.5 y 5.6 para de este modo poder comparar las piezas fundidas por la parte delantera y posterior

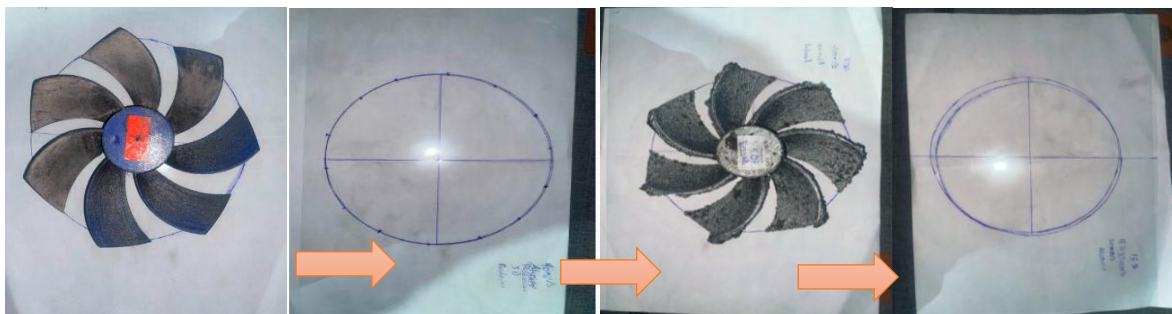


Figura 5.6 Proceso de plantillas comparativas

Tabla 5.5 Comparación física de las hélice de motor fuera borda parte frontal


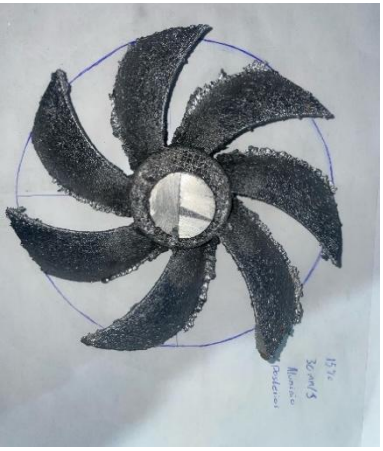
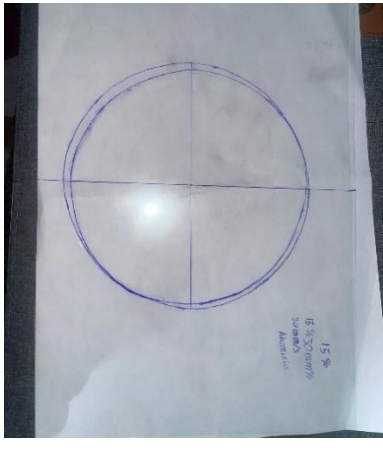


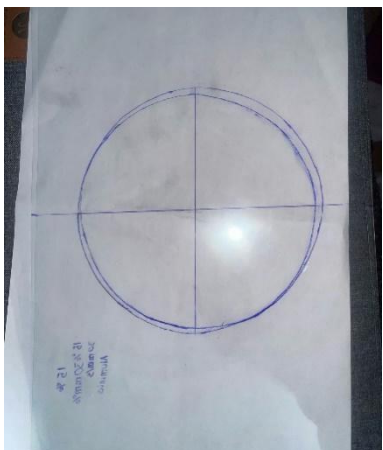

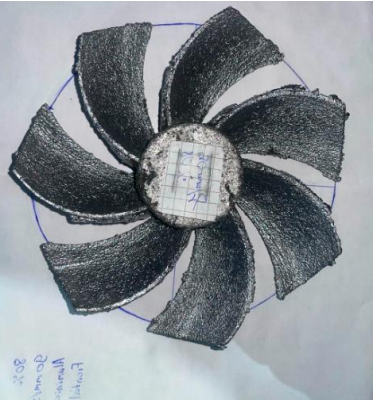
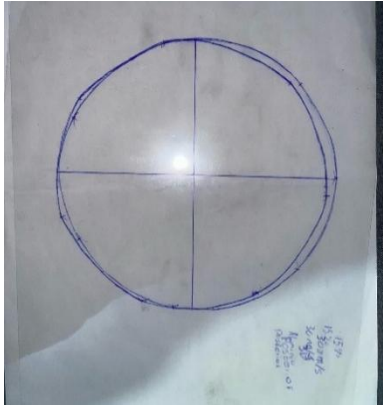

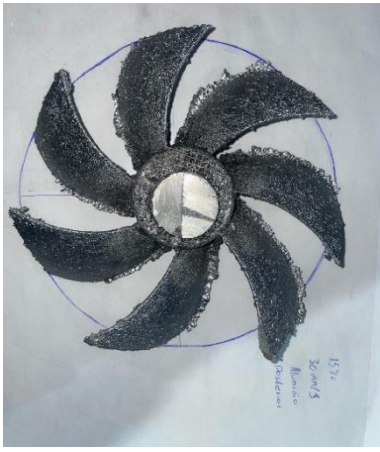

PLANTILLA DE IMPRESIÓN 3D FRONTAL	PLANTILLA DE HÉLICE FUNDIDA FRONTAL	COMPARACIÓN DE HÉLICE FRONTAL
<p>30 mm/s -Relleno: 15%</p> 		
<p>60 mm/s- Relleno: 40%</p> 		
<p>90 mm/s- Relleno: 80%</p> 		

Tabla 5.6 Comparación numérica de las hélice de motor fuera borda parte frontal

Medición				
Modelo	Aluminio (mm)	3D (mm)	Diferencia (mm)	Porcentaje
30 mm/s – Relleno: 15%	14,80	15,50	0,70	4%
60 mm/s- Relleno: 40%	15,20	15,00	0,20	1%
90 mm/s- Relleno: 80%	15,20	14,80	0,40	2%

Tabla 5.7 Comparación física de las hélice de motor fuera parte posterior

PLANTILLA DE IMPRESIÓN 3D POSTERIOR	PLANTILLA DE HÉLICE FUNDIDA POSTERIOR	COMPARACIÓN DE HÉLICE POSTERIOR
30 mm/s -Relleno: 15% 		
60 mm/s- Relleno: 40%		

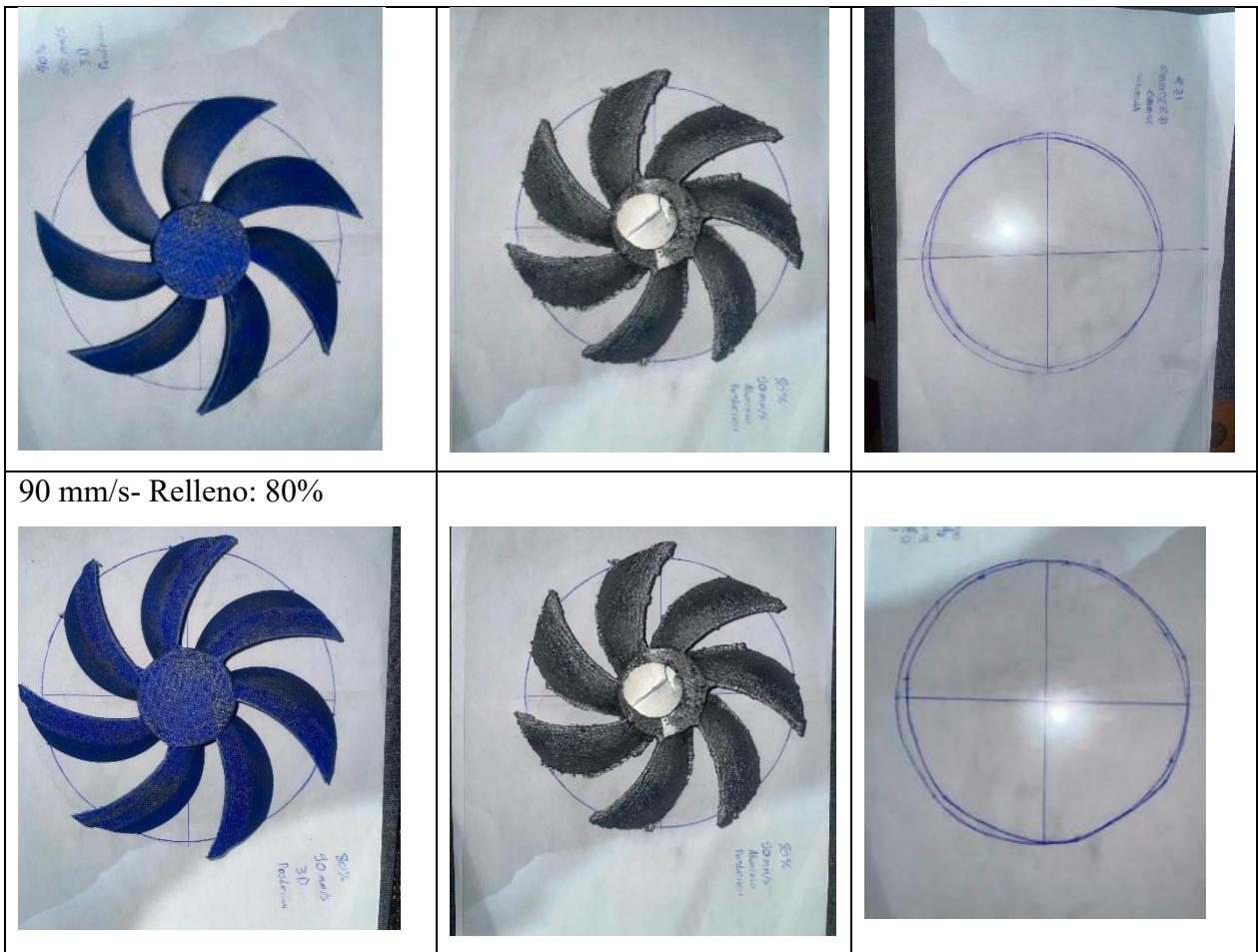


Tabla 5.8 Comparación numérica de las hélice de motor fuera parte posterior

Medición				
Modelo	Aluminio (mm)	3D (mm)	Diferencia (mm)	Porcentaje
30 mm/s – Relleno: 15%	15,50	14,80	0,70	4%
60 mm/s- Relleno: 40%	15,20	15,00	0,20	1%
90 mm/s- Relleno: 80%	15,20	15,00	0,40	1%



Las plantillas creadas en papel muestran que existen pequeñas diferencias en la geometría en la forma de las hélices de motor fuera de borda esto principalmente es por el exceso de material

existentes durante los proceso de fundición, pero esto no afecta al acabado superficial de las hélices fundidas. En las figuras del contorno de la hélice en su parte delantera la diferencia en las líneas aerodinámicas entre las hélices impresas en 3D es mayor, mientras que en los contornos de las imágenes de las hélices en su parte posterior existe una menor diferencia en los contornos de la hélice.

5.6 ANÁLISIS DE ACABADO SUPERFICIAL EN LA FUNDICIÓN DE ALUMINIO 6061

El acabado de la hélice de motor fuera de borda es de gran importancia en este proyecto por lo que se creó varios prototipos en diferentes configuraciones durante la impresión del modelo plástico en 3D para saber cómo esto afecta la parte superficial de las piezas fundidas de aluminio.

Tabla 5.6 Análisis de acabado superficial

N°	IMPRESIÓN	HÉLICES FUNDIDAS	CARACTERÍSTICAS
1	30 mm/s - Relleno: 15%		El acabado superficial es muy bueno y la presencia de imperfecciones es muy baja.
2	60 mm/s- Relleno: 40%		El acabado superficial es bueno pero existe pequeñas discontinuidades, existe presencia de excesos de aluminio.

3	90 mm/s- Relleno: 80%		Existen defectos notorios en el acabado superficial y exceso de aluminio.
---	--------------------------	--	---

Los resultados mostrados en la Tabla 5.6 indican que la velocidad de impresión es el parámetro más importante para crear moldes impresos en 3D ya que estos influyen de manera directa en la superficie de las piezas fundidas con estos modelos.

5.7 ANÁLISIS DE TIEMPO DE PRODUCCIÓN

Al culminar todo el proceso de fundición se necesita realizar un análisis de tiempo de producción en los diseños creados tanto con métodos tradicionales de fundición como el método fundición ayudado con la impresión 3D, de este modo corroborar que la técnica de impresión 3D es mucho más eficiente que la tradicional.

Tabla 5.7 Comparación de tiempos de producción

PROCESOS	FUNDICIÓN TRADICIONAL (Horas)	FUNDICIÓN CON IMPRESIÓN 3D (Horas)
Diseño	5,00	5,00
Creación de modelo	16,00	6,00
Proceso de fundición	3,00	3,00
Post procesado	3,00	2,00
TIEMPO TOTAL	27,00 HORAS	16,00 HORAS

Al realizar la comparación de métodos tradicionales de fundición con los métodos con impresión 3D se visualiza datos relevantes en los tiempos de producción, como por ejemplo, en el proceso de diseño el tiempo es igual en los dos casos debido a que el diseño se realiza en un software CAD en los dos casos, en cuanto al proceso de creación del molde es donde existe la mayor diferencia

en el tiempo, en un método tradicional se debe aplicar procesos complejos como el torneado, perforado, rectificando entre otros para crear los moldes, esto aumentan los tiempos de producción significativamente, la impresión 3D reduce este tiempo de proceso en un 62% en comparación de métodos tradicional. En cuanto al proceso de fundición los lapsos de tiempo son iguales, y el post procesado tiene una mayor ventaja de tiempo en la técnica 3D.

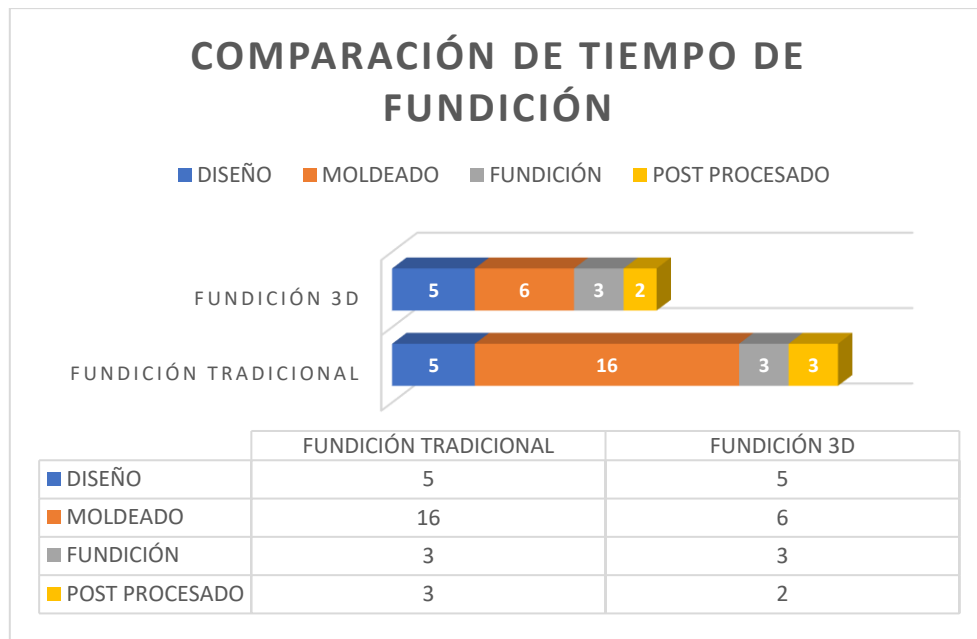


Figura 5.7 Comparación de tiempo de fundición

El proceso de fabricación de piezas de aluminio con ayuda de tecnología 3D tiene una eficiencia mayor que el método tradicional, la fundición con ayuda de la impresión 3D reduce los tiempos de fabricación hasta en un 40% como se muestra en las Figura 5.7 .

5.8 ANÁLISIS DE COSTOS DE PRODUCCIÓN

Los costos de producción son uno de los puntos más importantes en este proyecto, por lo que se realiza la comparación entre los dos métodos de fabricar piezas de aluminio que se aborda en este trabajo. Los costos de la producción de cada una de las hélices del motor fuera de borda se muestran en detalle en la Tabla 5.8 .

Tabla 5.8 Comparación de costos de producción

PROCESOS	FUNDICIÓN TRADICIONAL (USD)	FUNDICIÓN CON IMPRESIÓN 3D (USD)
Diseño	40,00	40,00
Creación de modelo	100,00	20,00
Proceso de fundición	20,00	20,00
Post procesado	20,00	15,00
COSTO TOTAL	180,00 DÓLARES	95,00 DÓLARES

Al realizar el análisis de costos se puede observar claramente la diferencia de costos en cada caso demostrando que los valores de producción con la tecnología 3D reduce los costos hasta en un 47% en comparación a las técnicas tradicionales, esto se debe principalmente a que se reduce procesos mecánicos especializados como el torneado, rectificado, soldado que utilizan equipos costosos y complejos que aumentan los costos de producción.

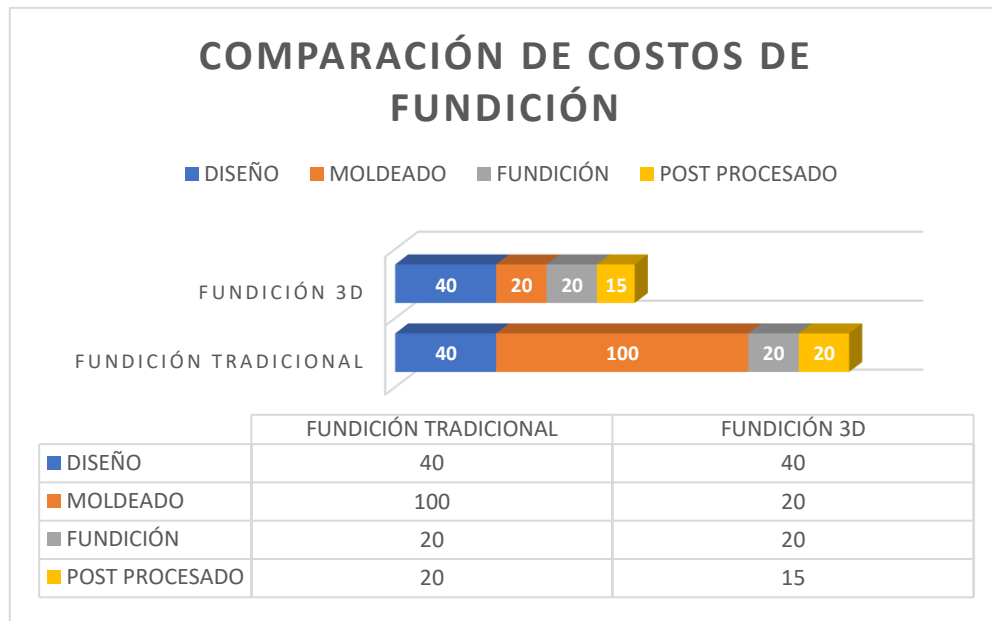


Figura 5.8 Comparación de tiempos de fundición

Los datos recabados a lo largo de esta investigación permitieron buscar el procedimiento y medidas más óptimas para la fabricación de una pieza fundida en aluminio con ayuda de la impresión 3D y arenas de fundición. Los datos más relevantes para obtener una buena eficiencia de tiempo y buenos acabados de la pieza fueron en la impresión 3D utilizar nilón y una velocidad de impresión

menor, usar un molde usar bentonita, tener un solo bebedero para el vertido de aluminio respetar tiempos en este proceso, estos y más datos contribuyeron a la culminación con éxito de este proyecto, reduciendo costos y tiempos de producción en la fundición de aluminio.

5.9 PRESUPUESTO

Acorde a la planificación de materiales, costos y ejecución del proyecto este resulta económicamente factible. Todos los equipos y materiales que se han empleado en este proyecto serán descritos mediante el uso de tablas en las cuales consta la cantidad y el costo de cada uno de ellas. A continuación, se describen los costos que se realizaron durante el desarrollo de este proyecto:

Tabla 5.9 Costo de maquinaria y equipo

N°	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	VALOR UNITARIO (USD)	VALOR TOTAL(USD)
1	Horno de fundición de crisol para la fundición de aluminio.	1	1050,00	1050,00
2	Softwares	1	40,00	40,00
3	Costo de ingeniería	1	300,00	300,00
TOTAL				1390,00 DÓLARES

Tabla 5.10 Costos de producción de piezas de aluminio

N°	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	VALOR UNITARIO (USD)	VALOR TOTAL(USD)
1	Impresión 3D	3	20,00	60,00
2	Bentonita sódica	---	20,00	20,00
3	Grafito desmoldante	1	5,00	5,00
4	Aluminio	1	20,00	20,00
5	Moldes	1	5,00	5,00
TOTAL				110,00 DÓLARES

Tabla 5.11 Costo total

Nº	DESCRIPCIÓN	VALOR(USD)
1	Costos de maquinaria y equipo	1390,00
2	Costos de producción	110,00
TOTAL		1500,00 DÓLARES

5.9.1 Periodo de recuperación de inversión (PRI)

Se refiere al tiempo que le toma a un proyecto recuperar el capital invertido inicialmente, en este proyecto los beneficiados son los estudiantes de la carrera por lo que se realiza una estimación del tiempo para recuperar la inversión. La fundición de aluminio es un proceso especializado por lo que tiene un valor de producción de piezas de aproximadamente 50 dólares por unidad en casos de realizarse independientemente, de la misma manera los estudiantes de la carrera necesitan conocer del proceso de fundición y deben realizar prácticas de este proceso creando un promedio anual de retorno de 500 dólares.

Tomando en cuenta estos datos se divide el costo total del proyecto para el retorno anual como se muestra a continuación.

$$PRI = \frac{COSTO\ TOTAL}{RETORNO\ ANUAL}$$

$$PRI = \frac{1500}{500}$$

$$PRI = 3\ AÑOS$$

El periodo de recuperación de la inversión de este proyecto es aproximadamente 3 años.

6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

- Los avances tecnológicos continúan mejorando los sistemas de metalurgia, permitiendo una mayor precisión en el control de las propiedades de los materiales, uno de los aspectos a mejorar en los sistemas tradicionales de fundición es la creación de moldes, por esta razón se utilizó una tecnología relativamente nueva como es la impresión 3D lo que ayudo a mejor

el acabo, reducir costos de producción en un 40% y mejorar los tiempos en la fundición de aluminio 6061 en un 47%.

- Un desafío continuo en la industria de la fundición es mejorar la calidad de los componentes, especialmente en aplicaciones de alta exigencia, por este motivo se usó la técnica de impresión plástica 3D que ayuda a mejorar notablemente la creación de moldes para piezas fundidas de aluminio y junto al horno de fundición que se implementó se logró realizar la fundición de componentes de aluminio que en este caso fue la hélice de un motor fuera de borda.
- Buscando la mejora continua de los procesos mecánicos se completó el proyecto de fundición de aluminio de una manera satisfactoria lo que arroja datos a tomar en cuenta como por ejemplo los tiempos y velocidades de vertido que son muy importante para evitar discontinuidades por turbulencias creadas durante el vertidos, la selección de arenas que afecta directamente al acabo superficial de la pieza fundida, se debe tener en cuenta coeficientes de contracción de metales y otros parámetros más para obtener mejores resultados.

6.2 RECOMENDACIONES

- Se debe tener cuidado al momento de realizar un proceso de fundición, para evitar accidentes laborales el personal debe de utilizar equipos EPP para realizar trabajos en sitios de elevadas temperaturas.
- Es necesario respetar los tiempos y pasos durante el proceso de fundición para evitar errores que aumenten costos y tiempo.
- Efectuar varios modelos en impresión 3D antes de crear un molde definitivo esto depende principalmente para que aplicación se valla a utilizar.
- Utilizar el equipo implementado solo y únicamente para el material para el cual fue diseñado y construido

7 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] A. D. E. Aluminio y C. C. Fabal, “Escuela Politécnica Superior”, 2017.

- [2] C. S. Calvo, *Hornos Utilizados En La Fabricación De Aleaciones Ferrosas Y No Ferrosas Melting Furnaces Used in the Manufacture of Ferrous and Non-Ferrous Alloys*, vol. 17. 2015.
- [3] B. Cruz, “Hornos de crisol”, *Leso Industrial*, 2018.
- [4] L. G. Silva y E. Gustavo, “La Metalurgia del aluminio”, *Tappi J.*, núm. 8, pp. 1–57, 2017.
- [5] H. P. Fundicion, “Hornos para fundición”.
- [6] R. Intelángelo y A. Benato, “Fundición y Moldeo Taller II”, *Politécnico*, pp. 1–30, 2018.
- [7] A. Ortiz Prado, J. A. Ortiz Valera, y O. Ruiz Cervantes, “Modelado De Procesos De Manufactura - Capítulo 2: Métodos De Fundición o Colada”, *Model. Procesos Manuf.*, pp. 1–267, 2013.
- [8] M. P. Groover, *Fundamnetos de Manufactura Moderna*. 2017.
- [9] A. Galbiati, “Impresión 3D, tecnología y polímeros”, *Aadeca Rev.*, vol. 12, pp. 2–8, 2019.
- [10] C. Europea, “Guía técnica de impresión 3D”, *Co-funded by Erasmus + Program. Eur. Union*, vol. 1, pp. 1–32, 2016.
- [11] “impresión 3D FFF”, vol. 1.
- [12] B. Dumitrita, “La impresión 3D como nuevo modelo de producción”, pp. 1–40, 2023.
- [13] L. Jose, “2. La fundición en moldes de arena”, *Bibing. Us*, pp. 5–16, 2015.
- [14] Eduardo Villacís, “Universidad Técnica de Cotopaxi UNIVERSIDAD TECNICA DE COTOPAXI”, *Repos. Uta*, 2010.
- [15] L. Fernanda y C. Patiño, “Aleaciones de Aluminio”, *31 Met. Actual*, pp. 12–21, 2017.