

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la
Producción**

Construcción de un modelo para la fundición de un impulsor utilizando
la tecnología de Manufactura Aditiva FDM (impresión 3D)

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero Mecánico

Presentado por:

Alfonso Isaías Gómez Tapia

José Luis Velasco Burgos

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2019

AGRADECIMIENTOS

Agradezco infinitamente a Dios, por su misericordia aun en mis momentos más oscuros siempre me fortaleció, me levanto, me dio la convicción de seguir y triunfar, a mis amados padres Luis y Fanny son el tesoro más valioso que Dios me obsequio.

Finalmente, agradezco a mis amigos y profesores que fueron parte de esta gran etapa de mí vida.

Alfonso Isaias Gómez Tapia

El primer agradecimiento es a Dios por la ayuda desinteresada que siempre me dio. Agradezco a mi papá José Velasco y a mi mamá magdalena Burgos por apoyarme en esta etapa de mi vida. A mi hermano Ronaldo Velasco por estar junto a mí en el proceso y a mis hermanas por ser un ejemplo que seguir

José Luis Velasco Burgos

DEDICATORIA

Este proyecto de investigación se lo dedico a mis padres, son el pilar fundamental para mi vida me han ensañado a construir mi camino al éxito con pasión, a disfrutar al máximo lo que hago, a ser perseverante, valiente, a inspirar a los que me rodean y siempre ser luz en la oscuridad de alguien más.

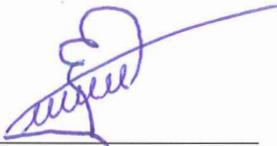
Alfonso Isaias Gómez Tapia

Se lo dedico con mi más sincero amor a mi papá José Velasco y a mi mamá Magdalena Burgos.

José Luis Velasco Burgos

DECLARACIÓN EXPRESA

"Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; Alfonso Isaías Gómez Tapia y José Luis Velasco Burgos y damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"



Alfonso Isaías
Gómez Tapia



José Luis
Velasco Burgos

EVALUADORES



MSc Jorge Marcial Hernández

COORDINADOR DE LA MATERIA



MSc. Efraín Terán

PROFESOR TUTOR

RESUMEN

La obtención de piezas fundidas dentro de la metalúrgica requiere de réplicas exactas del modelo a fundir, lo cual limita la realización de geometrías complejas. El presente proyecto se ha llevado a cabo en un taller donde se fabrican impellers de alabes rectos, mediante fundición en moldes de arena, pero con el limitante para la realización de impellers de alabes curvos. El objetivo de este proyecto es fabricar modelos impresos en 3D de impellers de alabes curvos, que puedan ser utilizados para obtener las cavidades para verter el material fundido y de esta manera implementar esta metodología en el taller.

Para el desarrollo del objetivo se reemplazó el molde de arena por un molde de yeso, en el cual se introdujo un impeller de alabes curvos impreso en 3D, el cual se dejó dentro de la mezcla de yeso para quemarlo y así obtener las cavidades donde se vertió el material fundido, obteniendo un impeller de bronce con la geometría del impreso.

Mediante un análisis termogravimétrico se determinó que el material plástico se degrada hasta un 99,9% para el PLA y 98,7 para el ABS. Con los ensayos de dureza para la probeta de bronce se obtuvo un valor de 70.5 HB, según la norma ASTM E10 – 12. Además, a través de la metalografía se observaron porosidades y un tamaño de grano definido. Acorde a los objetivos planteados, se logró establecer un proceso para poder fabricar impulsadores con alabes curvos.

Palabras clave: Fundición, Impresión 3D, Impeller, PLA, ABS.

ABSTRACT

Obtaining castings within the metallurgical industry requires exact replicas of the in-depth model, which limits the realization of complex geometries. The present project has been carried out in a higher place where straight blade impellers are manufactured, by casting in sand molds, but with the limitation for the realization of curved blade impellers. The objective of this project is to manufacture 3D printed models of impellers of curved blades, which can be used to obtain the cavities to pour the molten material and thus implement this methodology in the workshop.

For the development of the objective the sand mold was replaced by a plaster mold, in which a 3D printed curved blade impeller was introduced, which was left inside the plaster mixture to burn it and thus obtain the cavities where it was poured the molten material, obtaining a bronze impeller with the geometry of the form.

By means of a thermogravimetric analysis it was determined that the plastic material degrades up to 99.9% for the PLA and 98.7 for the ABS. With the hardness tests for the bronze probe, a value of 70.5 HB was obtained, according to ASTM E10-12. In addition, porosities and a defined grain size were observed through metallography. According to the objectives set, select to establish a process to be able to manufacture impellers with curved blades.

Keywords: *Casting, 3D Printing, Impeller, PLA, ABS.*

ÍNDICE GENERAL

EVALUADORES.....	V
RESUMEN.....	I
ABSTRACT	II
ÍNDICE GENERAL	III
ABREVIATURAS	VII
SIMBOLOGÍA.....	VIII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	IX
ÍNDICE DE TABLAS.....	XII
CAPÍTULO 1.....	1
1. Introducción.....	1
1.1 Definición del Problema.....	2
1.2 Justificación del proyecto	3
1.3 Objetivos.....	3
1.3.1 Objetivo General	3
1.3.2 Objetivos Específicos.....	4
1.4 Marco teórico.....	4
1.4.1 Proceso de fundición	4
1.4.2 Clasificación de las fundiciones:	5
1.4.3 Manufactura Aditiva (Impresión 3D).....	6
1.4.4 Principales tipos de Impresión 3D.....	7
1.4.5 Materiales utilizados por sistemas de deposición fundida	9
1.4.6 Ingeniería Inversa	11
CAPÍTULO 2.....	12
2. Metodología.....	12

2.1	Selección de modelo impeller a fabricar	12
2.1.1	Selección de mejor alternativa	13
2.2	Selección del proceso o método de impresión FDM	13
2.3	Selección de impresora 3D para imprimir el modelo del impeller	13
2.3.1	Alternativa A: Impresora Ultimaker s5.....	13
2.3.2	Características	14
2.4	Alternativa B: Impresora Tevo Little Monster.....	14
2.4.1	Características	15
2.5	Selección de la mejor alternativa para imprimir en 3D el modelo impeller.....	15
2.6	Selección de material para imprimir	17
2.6.1	Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS).....	17
2.6.2	Ácido Poliláctico (PLA).....	18
2.7	Análisis termogravimétrico (TGA).....	19
2.8	Diseño de Mazarota para fundición de impeller basado en el criterio de volumen. 20	
2.9	Proceso de fundición	22
2.10	Contracciones del proceso de fundición, para coladas de Bronce y Aluminio 23	
2.11	Contracción del Material de impresión PLA (Ácido Poliláctico) y ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno).....	24
2.12	Estudio estático del impeller.....	26
2.12.1	Material.....	26
2.12.2	Cálculos para determinar el máximo esfuerzo producido debido a la presión de la arena.....	26
2.13	Proceso de impresión 3D	30
2.13.1	Parámetros de impresión 3D para filamento PLA.....	30
2.13.2	Tipos de relleno y densidad para impresión de modelo Impeller	32

2.14	Proceso de fabricación de modelos impellers	34
2.14.1	Modelo A de impeller	34
2.14.2	Modelo B de impeller	36
2.15	Montaje de modelos en arena verde y yeso con arena de sílice.....	38
2.16	Proceso de fundición del polímero	38
2.17	Fusión y vaciado de metal.....	40
2.18	Piezas finales	40
2.19	Ensayos de dureza.....	41
2.20	Metalografía	41
CAPÍTULO 3.....		43
3.	RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	43
3.1	Comportamiento de experimentos.....	43
3.1.1	Experimento 1:.....	43
3.1.2	Experimento 2:.....	44
3.1.3	Experimento 3:.....	45
3.1.4	Experimento 4:.....	46
3.2	Ensayos de dureza.....	47
3.2.1	Ensayo de dureza Rockwell con Probeta de Bronce	47
3.2.2	Ensayo de dureza Rockwell con Probeta de Aluminio	49
3.2.3	Ensayo de dureza Brinell con Probeta de Bronce.....	50
3.2.4	Ensayo de dureza Brinell con Probeta de Aluminio	51
3.3	Metalografía.....	51
3.4	Temperatura de Descomponían del Ácido Poliláctico	52
3.5	Temperatura de descomposición del Acrilonitrilo Butadieno Estireno	53
3.6	Análisis de Costos	54
CAPÍTULO 4.....		55

4. Conclusiones Y Recomendaciones.....	55
4.1 Conclusiones.....	55
4.2 Recomendaciones.....	56
BIBLIOGRAFÍA.....	58
APÉNDICES.....	60

ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
ASEPLAS	Asociación Ecuatoriana de Plástico
ASTM	American Society of Testing Materials
ISO	International Organization for Standardization
FDM	Fused Deposition Modeling
SLA	Stereolithography
SLS	Selective laser sintering
ABS	Acrilonitrilo butadieno estireno
PLA	Ácido poliláctico
CAE	Computer-aided Engineering
CAD	Computer-aided Design
DMLS	Sinterizado Directo de Metal por Laser
TGA	Thermal Gravimetric Analysis
HB	Hardness Brinell
HR	Hardness Rockwell

SIMBOLOGÍA

d_1	Diámetro de polea 1 (máquina centrífuga).
d_2	Diámetro de polea 2 (motor)
\dot{m}	Flujo másico.
RPM _c	Revoluciones por minuto (velocidad angular) de máquina centrífuga.
RPM _m	Revoluciones por minuto (velocidad angular) de motor.
ω_c	Revoluciones de la máquina centrífuga [rad/s].
ω_m	Revoluciones del motor [rad/s].
F_c	Fuerza centrífuga.
F_m	Fuerza de motor.
W	Fuerza peso de polipropileno.
r_c	Radio del filtro de la máquina centrífuga centrífuga.
r_m	Radio de árbol de transmisión del motor.
P_m	Potencia motor.
v_m	Velocidad tangencial del motor.
m_l	Masa líquida de la mezcla.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Secuencia de operaciones para la fundición en arena	5
Figura 1.2 Fundición de Metal	6
Figura 1.3 Ultimaker fabricantes reconocidos de impresoras 3D profesionales con sistemas Fused Deposition Modeling	7
Figura 1.4 Impresora 3D sistema de fundición de polímeros.....	8
Figura 1.5 Sistema de Sinterización por laser	8
Figura 1.6 Rollo de Filamento ABS	9
Figura 1.7 Rollo de Filamento PLA.....	10
Figura 1.8 Rollo de Filamento Nylon.....	10
Figura 1.9 Ingeniería Inversa para Diseño Mecánico	11
Figura 2.1 Impresora Ultimaker s5	14
Figura 2.2 Impresora Tevo Little Monster	15
Figura 2.3 Análisis TGA del Filamento Acido Poliláctico	19
Figura 2.4 Análisis TGA del Filamento Acrilonitrilo Butadieno Estireno.....	20
Figura 2.5 Dimensiones de la mazarota de acuerdo al criterio del volumen.....	21
Figura 2.6 Sección del molde de arena en el momento que se realiza el vertido de la colada.....	22
Figura 2.7 Probetas impresas en 3D para determinar la contracción por solidificación.....	24
Figura 2.8 Dimensiones del impeller impreso en 3D	25
Figura 2.9 Mallado del Modelo CAD.....	29
Figura 2.10 Cargas en el Impeller	29
Figura 2.11 Deformaciones	30
Figura 2.12 Parámetros de Capa	30
Figura 2.13 Parámetros de Velocidad	31
Figura 2.14 Parámetros de Material	31
Figura 2.15 Parámetros de desplazamiento	32
Figura 2.16 Parámetros de perímetro.....	32
Figura 2.17 Relleno tipo líneas con una densidad del 20%.....	33
Figura 2.18 Relleno tipo rejilla con una densidad del 20%	33
Figura 2.19 Relleno tipo triángulos con una densidad del 20%.....	33
Figura 2.20 Modelo de hierro fundido de impeller en mesa de escáner	34

Figura 2.21 Obtención de modelo en Shining 3D de impeller.....	34
Figura 2.22 Dimensionamiento del impeller en base a los datos obtenidos gracias al escaneo 3D	35
Figura 2.23 Modelo Final Procesado Con Solidworks	35
Figura 2.24 Proceso de impresión 3D de moldes en la impresora Ultimaker s5	36
Figura 2.25 Escaneo 3D del modelo impeller B.....	37
Figura 2.26 Mallado del impeller B para obtener el CAD final	37
Figura 2.27 Pieza configura con los parámetros definidos	38
Figura 2.28 Fundición del modelo plástico con directo con soplete.....	39
Figura 2.29 Fundición del modelo plástico con estufa	39
Figura 2.30 Fusión de colada de bronce	40
Figura 2.31 Vertido de colada de bronce dentro de los moldes.....	40
Figura 2.32 Secuencia de pasos para la obtención de impeller por fundición en arena con implementación de manufactura aditiva	42
Figura 3.1 Impeller de PLA	44
Figura 3.2 Impeller de aluminio	45
Figura 3.3 Molde de yeso después de estar en horno.....	46
Figura 3.4 Impeller de Bronce	47
Figura 3.5 Metalografía a 200x.....	52
Figura 3.6 Metalografía a 500x.....	52
Figura 3.7 Temperatura de descomposición del Ácido Poliláctico.....	53
Figura 3.8 Temperatura de descomposición del Acrilonitrilo Butadieno Estireno	53
Figura 4.1 Moldeo en arena.....	61
Figura 4.2 Cierre del molde de arena	61
Figura 4.3 Fundición del metal Bronce	61
Figura 4.4 Vertimiento de la colada fundida	62
Figura 4.5 Modelo de impeller cerrado	62
Figura 4.6 Impeller impreso en 3D	63
Figura 4.7 Colocación del vertedero y mazarota	63
Figura 4.8 Molde final en yeso.....	63
Figura 4.9 Solidificación del metal fundido	64
Figura 4.10 Retiro de exceso de yeso	64
Figura 4.11 Pieza fundida.....	64

Figura 4.12 Modelo impreso en 3D	65
Figura 4.13 Estufa horno de sinterización	65
Figura 4.14 Molde elaborado con yeso.....	65
Figura 4.15 Cristalización del molde por transferencia de calor	66
Figura 4.16 Modelo CAD impeller.....	67
Figura 4.17 Proceso de derretimiento del material plástico	67
Figura 4.18 Vaciado del Metal fundido	68
Figura 4.19 Impeller Fundido.....	68
Figura 4.20 Impeller Maquinada	68
Figura 4.21 Ensayo de Pieza final Fundida Impeller	69
Figura 4.22 Probetas de bronce	69
Figura 4.23 Probeta Lista para el correspondiente ensayo basado en la Norma ASTM E10	69
Figura 4.24 Ensayos con Norma ASTM E10	70

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Alternativas de Impeller	12
Tabla 2.2 Ventajas y Desventajas del Sistema de impresión 3D Modelado por Deposición Fundida (FDM)	13
Tabla 2.3 Parámetros y ponderación para matriz de selección	16
Tabla 2.4 Matriz de Decisión para la selección de alternativas	16
Tabla 2.5 Propiedades Mecánicas del ABS en impresión 3D.....	17
Tabla 2.6 Propiedades Mecánicas del PLA en impresión 3D	18
Tabla 2.7 Tabla de proporción de partes de mezcla.....	23
Tabla 2.8 Contracciones Volumétricas para bronce fundido	24
Tabla 2.9 Dimensiones del modelo impeller con porcentaje de corrección	25
Tabla 2.10 Dimensiones finales con las cuales se imprime en 3D el modelo impulsor .	25
Tabla 2.11 Propiedades del PLA.....	26
Tabla 2.12 Propiedades volumétricas del impeller	27
Tabla 2.13 Cargas y sujeciones	28
Tabla 2.14 Combinación de materiales e impresor	36
Tabla 2.15 Descripción de equipo y parámetros de ensayo de Dureza Rockwell	41
Tabla 2.16 Descripción de equipo y parámetro de ensayo de Dureza Brinell	41
Tabla 3.1 Ensayo de dureza Rockwell con Bronce	48
Tabla 3.2 Ensayo de dureza Rockwell con Aluminio.....	49
Tabla 3.3 Ensayo de Dureza Brinell (Bronce).....	50
Tabla 3.4 Ensayo de Dureza Brinell (Aluminio)	51
Tabla 3.5 Detalles de costos	54
Tabla 3.6 Evaluación económica de proyecto	54

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

El proceso de fundición de metales, conjuntamente con la fabricación de piezas de máquinas juega un rol muy importante en el sector industrial, doméstico y minero. De acuerdo con un análisis realizado por la Superintendencia de Compañías en el Ecuador, hasta el 2016 se registraron 60 empresas dedicadas a la fabricación de productos primarios y acabados de hierro y acero, la mayor concentración de estas empresas se encuentra en las provincias de Pichincha y Guayas (Superintendencia de Compañías, 2017). Sin embargo, existe una gran cantidad de pequeños talleres que se dedican a la fundición de piezas de manera artesanal y que no constan dentro de la Superintendencia de Compañías.

Para realizar un proceso de moldeo en arena y fabricar una pieza por fundición, es necesario disponer de una réplica del modelo a fundir, a la cual se le denomina matriz o núcleo, éste sirve como modelo para colocarse dentro de cajas que contienen arena y así ajustar la arena a la forma de la matriz, posteriormente se vierte la colada del metal fundido dentro del molde y se obtiene una pieza fabricada por la fundición del metal. Dentro de este proceso los moldes de arena y matrices se construyen de manera artesanal y en base a la experiencia empírica, debido a esto, es usual que existan problemas como baja calidad de las piezas fundidas y una baja productividad.

Hoy en día gracias al proceso de manufactura aditiva (Impresión 3D), es posible fabricar prototipos y piezas funcionales exactas, tomando como referencia un archivo CAD (Computer Aided Design) e imprimirlas en 3D en diferentes materiales, gracias a esta tecnología, se está revolucionando las formas tradicionales de construcción y manufactura de objetos.

1.1 Definición del Problema

Actualmente en el taller de fundición se fabrican impulsores (impeller) por fundición con moldes de arena, los cuales presentan bajas propiedades mecánicas y causan problemas de productividad, ya que en la mayoría de los casos se tiene que repetir el proceso de moldeo y fundición en un promedio de 3 veces por pieza, para obtener un impulsor funcional.

Además, se tienen restricciones a la hora de diseñar y fabricar el modelo del impulsor ya que éste se lo construye en madera y de forma empírica, estando limitado a las habilidades del maestro. Por otra parte, al momento de realizar los moldes de arena, no se toman en cuenta un buen control de calidad. Al metal líquido se adicionan fundentes y otros materiales según conocimientos empíricos.

En general no se realizan controles de las propiedades (Ensayos de dureza, compresión y tracción) de los impulsores obtenidos y su control es netamente visual.

Debido a esto los impulsores fabricados presentan problemas de porosidades, sopladuras, grietas, inclusiones de escoria y rugosidad.

Las principales características que se busca implementar con el presente proyecto son:

- Buenas propiedades mecánicas de la pieza fundida.
- Diseños de impulsores acordes a la necesidad del cliente
- Optimización en los tiempos de construcción del modelo base para la fundición.

En base a estas características, se busca implementar la tecnología de impresión 3D para la fabricación de los modelos de impulsores, este proceso debe ser implementado con materiales amigables con el medio ambiente y disponibles en el mercado local, para garantizar su sostenibilidad en el tiempo.

1.2 Justificación del proyecto

Debido al gran cambio que está sufriendo la industria metalúrgica se debe adoptar nuevas tecnologías que conlleven a la optimización y mejora de procesos de construcción y fundición.

La tecnología de manufactura aditiva (Impresión 3D) se ha democratizado a un nivel bastante amplio, debido a esto las impresoras 3D de sistemas FDM (Fused Deposition Modeling) se encuentran a costos accesibles para el usuario. De acuerdo con la problemática que presenta el taller Velasco se busca implementar esta tecnología para la fabricación de modelos de impulsores (Impeller) para fundición, para lo cual se diseñará en un programa CAD el modelo deseado y se lo imprimirá en 3D en un polímero biodegradable amigable con el medio ambiente, posteriormente este modelo será usado como matriz para la fabricación del molde en arena y así se procederá a la fundición y obtención del impulsor (impeller) requerido, de esta manera el taller Velasco podrá adquirir la capacidad de fabricar impulsores de acuerdo con las especificaciones técnicas que el cliente requiera, lo cual era imposible con los modelos fabricados en madera ya que este es un proceso netamente artesanal lo cual limita su diseño y carece de exactitud.

Los beneficios fundamentales con la implementación de esta tecnología se verán reflejados en reducir las iteraciones al momento de fundir los impulsores, además disminuirán los costos de operación de la empresa.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Fabricar modelos impresos en 3D de impellers de alabes curvos y utilizarlos para obtener cavidades para verter material fundido.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Determinar los parámetros de resistencia del modelo impulsor (impeller) impreso en 3D mediante un software de modelado (simulación CAE)
- Construir modelos impresos en 3D para obtener impulsores (impellers) por fundición
- Determinar los parámetros de impresión óptimos para la construcción de modelos impresos en 3D.
- Analizar la microestructura del material fundido.

1.4 Marco teórico

1.4.1 Proceso de fundición

El proceso de fundición es el desarrollo para obtener piezas en donde se funde un material que entra en un molde el cual se solidifica. Este proceso de fundición es mayormente caracterizado por la variedad de moldes complejos que se pueden producir usando cualquier tipo de metal, con pesos entre menos de una onza hasta piezas que pesan cientos de toneladas.

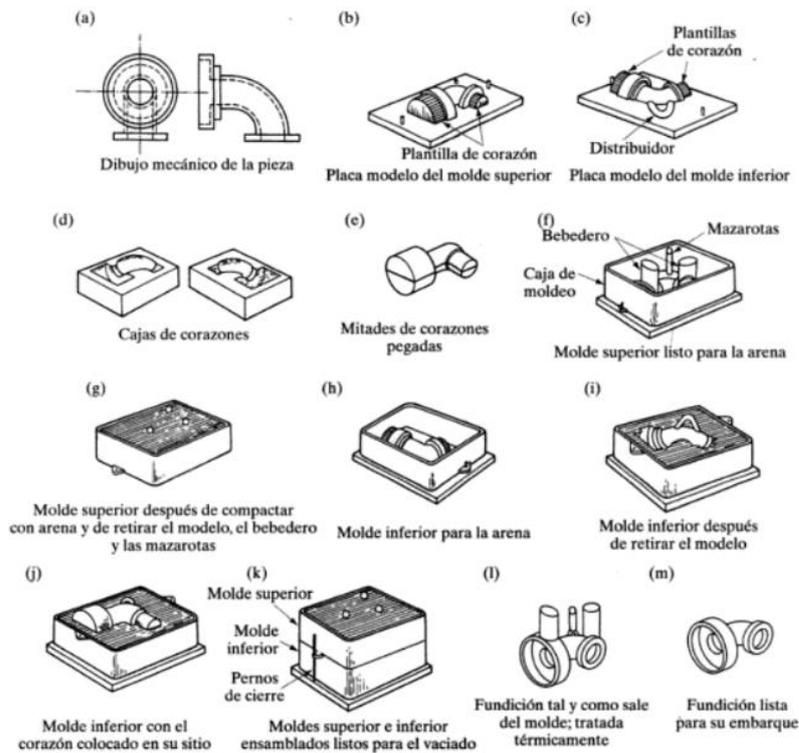


Figura 1.1 Secuencia de operaciones para la fundición en arena [Steel Founder's Society of America]

1.4.2 Clasificación de las fundiciones:

Según el metal fundido existen varios tipos de fundiciones por metal fundido entre estos los más importantes se consideran:

- Fundiciones de hierro
- Fundiciones de acero: Aceros aleado y al carbón
- Fundiciones de metales no ferrosos: Bronce y latón, aluminio y aleaciones, magnesio y aleaciones.

Según el método de moldeo existen los siguientes:

Fundición en arena: Es un proceso de moldeo desechable en el cual se utiliza una mezcla de arena, aglomerante y agua el cual es uno de los métodos de vaciado de metales más usados para la obtención de piezas. Este proceso consiste en los siguientes pasos: En primer lugar, se debe plasmar un modelo en la arena con la forma de la pieza que se desea obtener; luego, se crea un sistema de alimentación para vaciar la mezcla del material fundido; después, se espera que el material enfrié para que solidifique;

finalmente, se procede a romper este molde y se obtiene la pieza fundida (Kalpakjian & Schmid, Manufactura, ingeniería y tecnología, 2008).

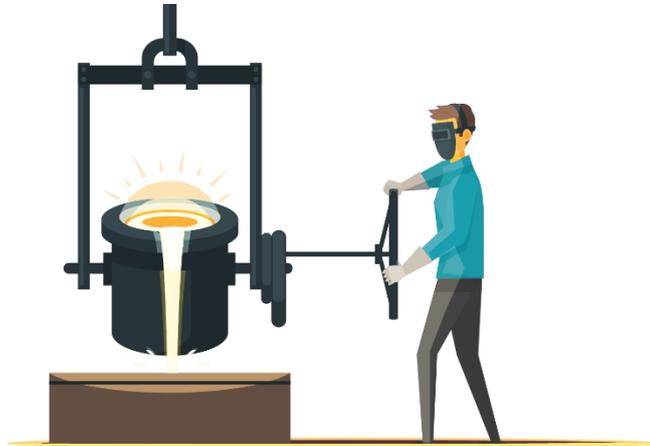


Figura 1.2 Fundición de Metal [Elaboración propia]

Fundición en molde permanente: En este proceso de fundición por gravedad se usa mayormente moldes de material metálico para poder reusarlos. Este método es caracterizado por una alta precisión y por realizarse en bajos tiempos y costes (Kalpakjian & Schmid, Manufactura, ingeniería y tecnología, 2008).

Fundición por revestimiento: Este proceso también se lo conoce como a la cera perdida, su modelo es fabricado en cera o plástico realizado con una técnica de moldeo rápido (Kalpakjian & Schmid, 2008).

Fundición centrifuga: En este proceso se utiliza la fuerza de la inercia para la distribución del material fundido en el molde (Kalpakjian & Schmid, Manufactura, ingeniería y tecnología, 2008).

1.4.3 Manufactura Aditiva (Impresión 3D)

Es un proceso de fabricación el cual consiste en generar un objeto desde un archivo CAD, este objeto se construye de manera aditiva agregando material capa por capa, hasta formar el volumen diseñado, de acuerdo con el tipo de impresión 3D el material base de construcción puede ser metal, polímero, células madre, resinas, concreto, entre otros.



Figura 1.3 Ultimaker fabricantes reconocidos de impresoras 3D profesionales con sistemas Fused Deposition Modeling, (Ultimaker , 2011)

Actualmente Manufactura Aditiva es un pilar fundamental en la cuarta revolución industrial, debido a sus múltiples aplicaciones en las industrias aeroespacial, automovilística, medica, etc. El uso de esta tecnología conlleva mejoras en los tiempos de producción y bajo costo de fabricación (Chauraya, y otros, 2013).

1.4.4 Principales tipos de Impresión 3D

1.4.4.1 Modelado por deposición fundida (FDM)

Este tipo de impresión 3D utiliza un filamento termoplástico como material base el cual es calentado hasta su temperatura de fusión y derretido, posteriormente es depositado capa por capa en el área previamente programada (Prithviraj, Bhalla, Vashisht, Sounderraj, & Prithvi, 2014).

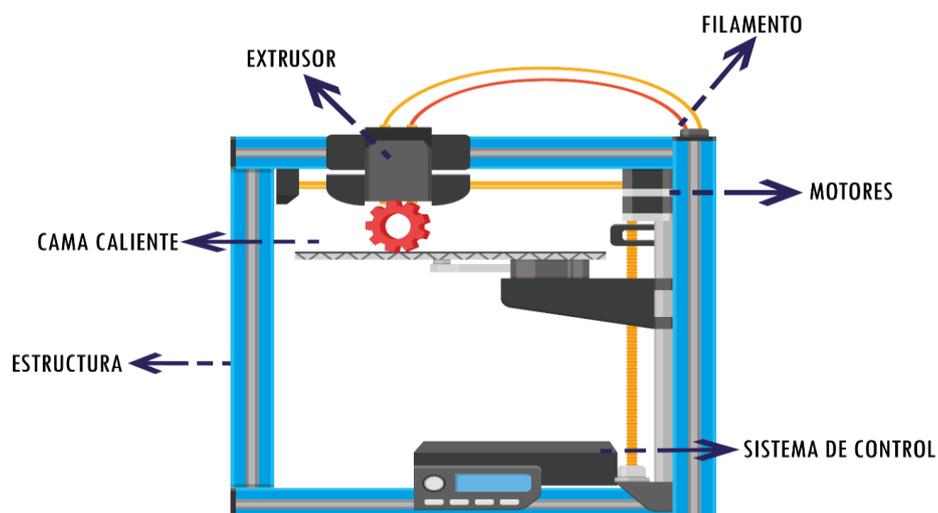


Figura 1.4 Impresora 3D sistema de fundición de polímeros [Elaboración propia]

1.4.4.2 Estereolitografía (SLA)

Consiste en la solidificación y polimerización de resina foto sensible mediante un haz de luz, este método fue uno de los primeros en utilizarse.

1.4.4.3 Sinterización Selectiva por Laser (SLS)

Proceso de sinterizado de polvos generalmente, este método consiste en sinterizar polvos (metálicos, cerámicos, vidrio) con aglutinante, un rodillo coloca capa a capa los polvos y el aglutinante después un láser de alta potencia endurece la mezcla formando el objeto tridimensional.

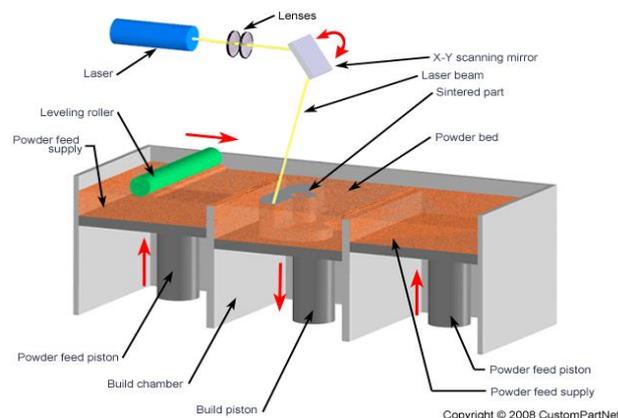


Figura 1.5 Sistema de Sinterización por laser, (Custompart.Net, 2008)

1.4.4.4 Sinterizado Directo de Metal por Laser (DMLS)

Dicho proceso fue patentado por ERD y EOS (Alemania) en 1994 aunque las primeras investigaciones comenzaron en los años 70 (Asociación Española de Tecnologías de Fabricación Aditiva y 3D , 2019).

En este método se utiliza directamente polvo metálico, sin base de plástico o cerámico, al igual que el sistema SLS se utiliza un láser de alta potencia para sinterizar y fundir el metal, este sistema es ampliamente utilizado en la industria para producción en serie.

1.4.5 Materiales utilizados por sistemas de deposición fundida

1.4.5.1 *Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS)*

El ABS es un termoplástico muy utilizado en diversos sectores en todo el mundo y es conocido por sus excepcionales propiedades mecánicas. No es adecuado para aplicaciones en contacto con alimentos (ULTIMAKER, 2019).



Figura 1.6 Rollo de Filamento ABS (Ultimaker , 2011)

Este termoplástico se lo utiliza en impresión 3D para fabricar prototipos y piezas funcionales, es un polímero con un grado medio de complejidad para ser impreso en 3D pues tiende a deformarse mientras se solidifica, causando lo que en impresión 3D se conoce como warping, su punto de fusión se encuentra entre (230 – 240 ° C) al ser fundido en el extrusor de la impresora 3D emite un gas nocivo por lo cual se recomienda, que la máquina se encuentre en un lugar ventilado y abierto mientras se encuentra operando.

1.4.5.2 *Ácido Poliláctico (PLA)*

Es un polímero biodegradable, fabricado con materiales orgánicos y renovables como almidón de maíz. Dentro de impresión 3D se lo utiliza para realizar herramientas domésticas, juguetes, proyectos educativos, objetos de exposición, prototipado, modelos arquitectónicos y también métodos de fundición a la cera perdida para crear piezas de metal es muy popular entre los makers debido a su fácil uso al momento de ser impreso en 3D, no necesita cama caliente por lo que puede ser impreso en cualquier impresora 3D básica (Ultimaker , 2017).



Figura 1.7 Rollo de Filamento PLA (Ultimaker , 2011)

Su temperatura de fusión se encuentra entre (205°C – 225°C), actualmente es uno de los polímeros más versátiles dentro de impresión 3D ya que se lo puede combinar con polvos metálicos y así formar filamentos para impresión de metal en sistemas FDM.

1.4.5.3 Poliamina (Nylon)

El nylon es utilizado por muchos fabricantes a escala mundial y es conocido por su impresionante durabilidad, alta relación entre resistencia y peso, flexibilidad, baja fricción y resistencia a la corrosión. Resistencia a impactos y abrasiones de calidad industrial, duradero, alta relación entre resistencia y peso, bajo coeficiente de fricción y buena resistencia a la corrosión por álcalis y compuestos orgánicos (ULTIMAKER, 2019).



Figura 1.8 Rollo de Filamento Nylon (Ultimaker , 2011)

Este termoplástico tiene un punto de fusión que se encuentra entre (260°C - 280°C), actualmente se utiliza el nylon como base para ser mezclado con fibras como carbono, aramida, vidrio y así obtener filamentos extremadamente duros y muy resistentes.

1.4.6 Ingeniería Inversa

Es un proceso que tiene como fin utilizar un código fuente de un sistema software o cualquier otro producto y así poder identificar sus relaciones y construir o mejorar una nueva implementación del sistema (Breuer & Lano, 1991).

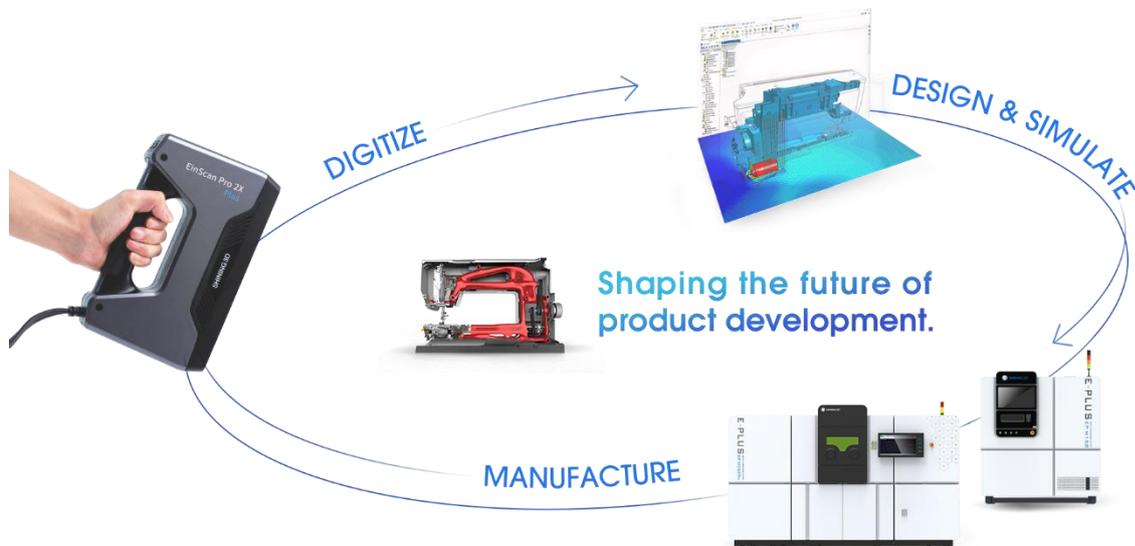


Figura 1.9 Ingeniería Inversa para Diseño Mecánico, (EinScan , 2019)

1.4.6.1 Escaneo 3D

Es una tecnología que permite digitalizar un objeto físico, mediante diferentes procesos como fotogrametría, luz estructurada y laser gracias a estos procesos se obtiene un modelo digital del objeto con sus respectivas medidas largo, ancho y alto, el cual además se puede procesar y editar con diferentes softwares (Sitver, 2014).

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

La problemática se enfoca en la capacidad de fabricar modelos de impeller fundidos sin importar su geometría, respetando los parámetros de diseño (carga total, rotación y caudal) para obtener el mejor rendimiento en la operación de estos. Los impellers se fabricaron en el taller de fundición del taller de metal mecánica, ya que este se dedica a la fabricación y comercialización de bombas centrífugas. En este capítulo se explicará la metodología utilizada y aplicada para la obtención de los impellers de las bombas centrífugas.

2.1 Selección de modelo impeller a fabricar

Tabla 2.1 Alternativas de Impeller [Elaboración propia]

Alternativa A: Impeller para bomba centrífuga de 5 Hp	Alternativa B: Impeller para bomba centrífuga de 7,5 Hp
Características	Características
Impulsor abierto	Impulsor semi abierto
Mayor capacidad de aspiración	Utilizado con fluidos que tienen solidos
Ausencia de empuje axial	
Alta eficiencia	Media eficiencia

2.1.1 Selección de mejor alternativa

Para la elección de la mejor alternativa se entrevistó al encargado del proceso de fundición en el taller, el que mencionó que el mayor problema con la obtención de impellers, es que trabaja con la bomba de 5 Hp por su compleja geometría; es decir, el impeller abierto ya que en este caso los alabes son curvados siendo de mayor complejidad para la fabricación.

2.2 Selección del proceso o método de impresión FDM

De acuerdo con el marco teórico desarrollado, hay varios métodos de impresión, uno de los más comunes, como ya se mencionó es el Sistema de Modelado por Deposición Fundida (FDM), siendo actualmente uno de los más utilizados en el Ecuador por su bajo costo. De acuerdo con la siguiente tabla se escogió este método por ser el más conveniente para la impresión del impeller del proyecto.

Tabla 2.2 Ventajas y Desventajas del Sistema de impresión 3D Modelado por Deposición Fundida (FDM) [Elaboración propia]

Ventajas	Desventajas
Código Abierto	Velocidad de impresión
Costo Accesible	Área de impresión
Niveles de temperatura aceptables para materiales termoplásticos	De acuerdo con el material las piezas necesitaran un post proceso
Variedad de Filamentos (PLA, ABS, TPU, NYLON, PVA)	Límite de espesor en paredes, además dependiendo de la geometría se necesita soportes

2.3 Selección de impresora 3D para imprimir el modelo del impeller

2.3.1 Alternativa A: Impresora Ultimaker s5.

Es una impresora 3D de escritorio fácil de usar con un gran volumen de construcción que ofrece piezas precisas de grado industrial, una y otra vez. Con una configuración simple, un alto tiempo de actividad y una extrusión dual confiable.

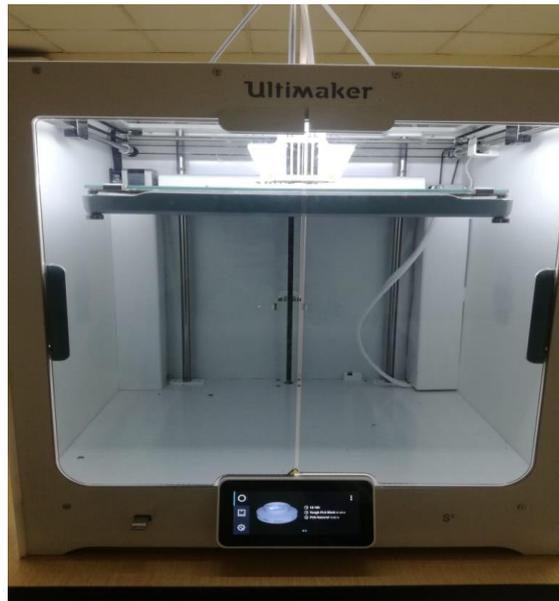


Figura 2.1 Impresora Ultimaker s5 [Elaboración propia]

2.3.2 Características

- Gran volumen de construcción: 330 x 240 x 300 mm (13 x 9.4 x 11.8 pulgadas)
- Compatible con filamentos de fibra de carbono y vidrio de alta resistencia.
- Resolución de capa de hasta 20 micras (0.001 pulgadas)
- Sistema de filamento abierto: imprima con cualquier material de 2,85 mm
- Interfaz de pantalla táctil de 4.7 pulgadas: ganador del iF Design Award 2019.

2.4 Alternativa B: Impresora Tevo Little Monster

Es una impresora fabricada en china, fácil de usar con gran volumen de impresión. Su versatilidad se basa en su sistema delta, debido a esto alcanza velocidades de impresión bastantes altas, su costo es accesible cuenta con sistema de filamentos de abierto.



Figura 2.2 Impresora Tevo Little Monster [Elaboración propia]

2.4.1 Características

- Impresión de filamentos múltiples
- Velocidad máxima de impresión 300 mm/s
- Gran tamaño de construcción 340 x 500 mm
- Calibración automática
- Cama caliente
-

2.5 Selección de la mejor alternativa para imprimir en 3D el modelo impeller.

Se selecciona la mejor alternativa en función de una matriz de selección, basada en las condiciones óptimas para el proyecto.

El método consistió en evaluar las alternativas en un rango de 1 a 100 con su respectiva interpretación como se muestra en el cuadro siguiente:

Tabla 2.3 Parámetros y ponderación para matriz de selección [Elaboración propia]

Criterio	Parámetros	Factor de ponderación (%)
Operación	Mantenimiento	10
	Funcionalidad	15
	Proceso	5
	Operación	30
Seguridad ocupacional	Ruido	5
	Seguridad	10
Económico	Costo de inversión	15
Ambiental	Contaminación ambiental	10
Total		100

Tabla 2.4 Matriz de Decisión para la selección de alternativas [Elaboración propia]

Cacacterísticas	Ponderación	A	B
		Operación	10
Funcionalidad	15	15	10
Mantenimiento	5	5	5
Proceso	30	30	25
Ruido	5	5	2
Seguridad	10	10	10
Costo de inversión	15	7	15
Contaminación ambiental	10	10	10
TOTAL	100	92	85

Una vez realizada la comparación de las alternativas en función de los parámetros de selección, la mejor alternativa fue la A. De acuerdo con los requerimientos del cliente se escogió la impresora ultimaker s5, debido a que se cuenta con la facilidad de uso, además es una impresora de grado industrial, lo cual garantizo que el modelo impreso en ella sea 100% confiable.

2.6 Selección de material para imprimir

2.6.1 Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS)

El ABS se puede mecanizar, pulir, lijar, limar, agujerear, pintar, pegar etc., con extrema facilidad, y el acabado sigue siendo bueno (Macas & Pilco, 2016).

2.6.1.1 Características:

- Prototipos funcionales
- Herramientas de fabricación
- Piezas de encaje a presión para su uso a altas o bajas temperaturas
- Piezas y tapas del motor.
-

Tabla 2.5 Propiedades Mecánicas del ABS en impresión 3D, (Technical Data Sheet Ultimaker ABS) [Elaboración propia]

Propiedades Mecánicas	Impresión 3D	
Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS)	Valor típico	Método de Ensayo
Módulo de elasticidad a la tracción	1681,5 MPa	ISO 527 (1 mm/min)
Esfuerzo de tracción a la deformación	39,0 MPa	ISO 527 (50 mm/min)
Esfuerzo de la tracción a la rotura	33,9 MPa	ISO 527 (50 mm/min)
Alargamiento a la deformación	3,5 %	ISO 527 (50 mm/min)
Alargamiento a la rotura	4,8 %	ISO 527 (50 mm/min)
Resistencia a la flexión	70,5 MPa	ISO 178
Módulo de flexión	2070,0 MPa	ISO 178
Resistencia a la prueba de impacto IZOD con mella (a 23°C)	10,5 kJ/m ²	ISO 180
Dureza	76 (Shore D)	Durómetro

2.6.2 Ácido Poliláctico (PLA)

Es un termoplástico biodegradable de origen vegetal, con el paso del tiempo puede perder sus propiedades iniciales hasta su descomposición en elementos químicos finitos (Macas & Pilco, 2016).

2.6.2.1 Características:

- No necesita plataforma caliente.
- Los colores son en su mayoría transparentes y brillantes.
- Se utiliza comparativamente mucho menos en la industria.
- Se empieza a descomponer a partir de 50-60° C

Tabla 2.6 Propiedades Mecánicas del PLA en impresión 3D, (Technical Data Sheet Ultimaker PLA) [Elaboración propia]

Propiedades Mecánicas	Impresión 3D	
Ácido Poliláctico (PLA)	Valor típico	Método de Ensayo
Módulo de elasticidad a la tracción	2346,5 MPa	ISO 527 (1 mm/min)
Esfuerzo de tracción a la deformación	49,5 MPa	ISO 527 (50 mm/min)
Esfuerzo de la tracción a la rotura	45,6 MPa	ISO 527 (50 mm/min)
Alargamiento a la deformación	3,3 %	ISO 527 (50 mm/min)
Alargamiento a la rotura	5,2 %	ISO 527 (50 mm/min)
Resistencia a la flexión	103,0 MPa	ISO 178
Módulo de flexión	3150,0 MPa	ISO 178
Resistencia a la prueba de impacto IZOD con mella (a 23°C)	5,1 kJ/m ²	ISO 180
Dureza	83 (Shore D)	Durómetro

Para la impresión del molde del impeller se usaron ambos materiales para experimentar cuál fue el más factible en el proceso de fundición para la obtención del impeller.

2.7 Análisis termogravimétrico (TGA)

Se realizó el respectivo análisis termogravimétrico para determinar la temperatura de descomposición y el tiempo de degradación del material PLA y ABS utilizado en la impresión 3D del impeller.

Este análisis consistió en calentar la muestra de filamento, hasta obtener la máxima cantidad de pérdida de masa en un determinado tiempo.

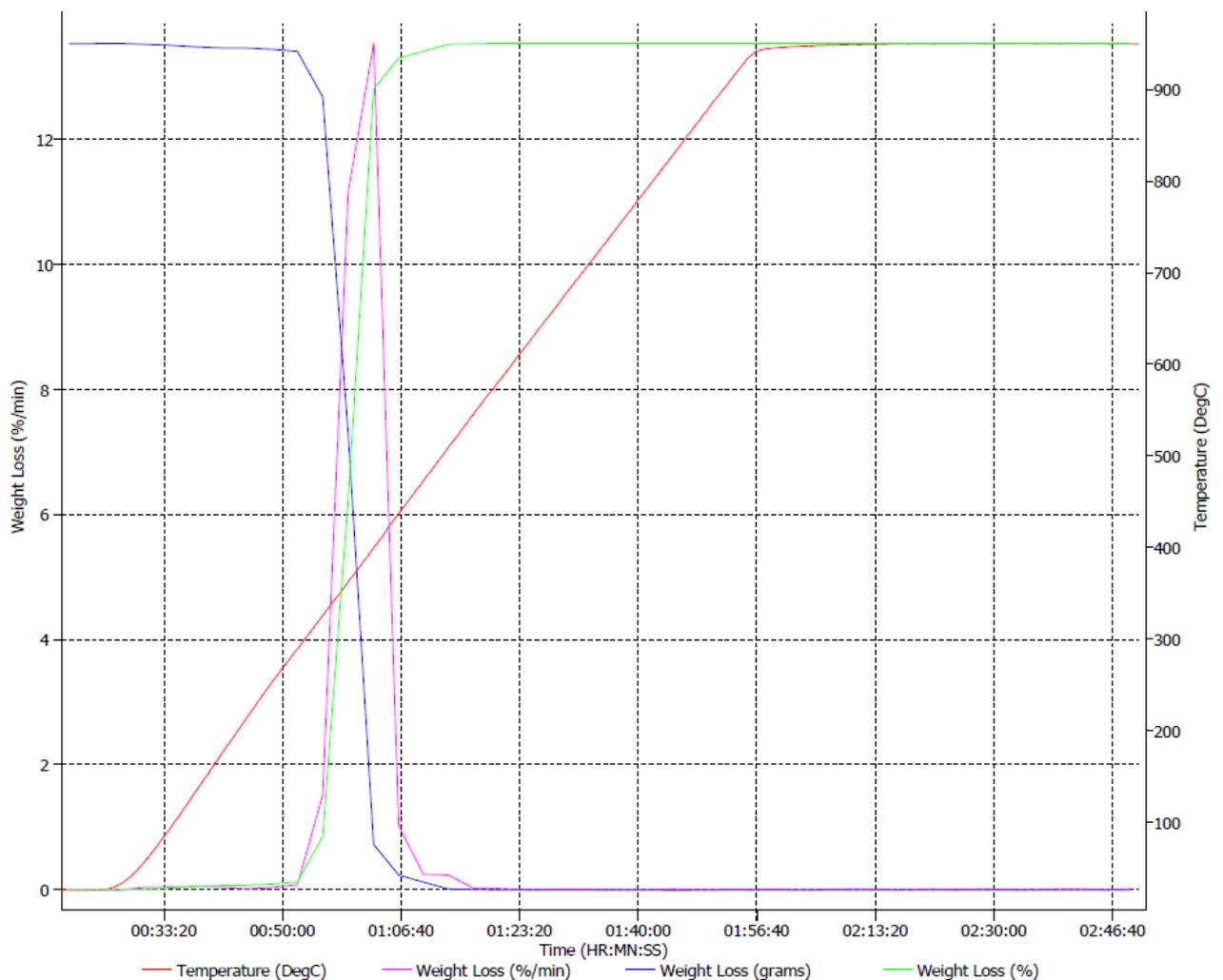


Figura 2.3 Análisis TGA del Filamento Acido Poliláctico [Elaboración propia]

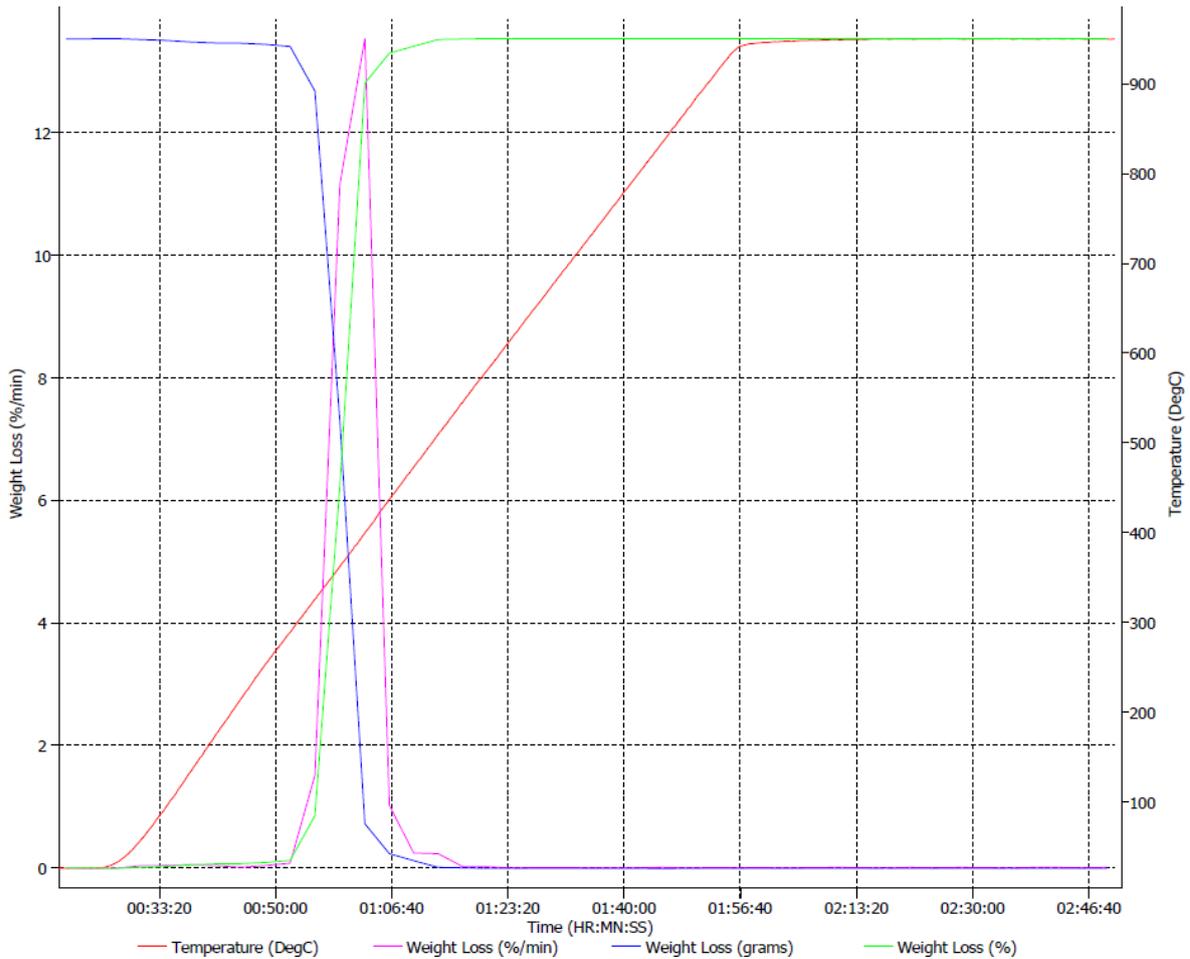


Figura 2.4 Análisis TGA del Filamento Acrilonitrilo Butadieno Estireno [Elaboración propia]

2.8 Diseño de Mazarota para fundición de impeller basado en el criterio de volumen.

La mazarota es la parte del molde que tiene por objetivo asegurar el completo llenado del molde y permitir la evacuación óptima de gases de su interior.

$$V_{maz} = V_{pieza} * c * k \tag{2.1}$$

Donde:

C es el coeficiente de contracción del metal

K es el coeficiente de seguridad que se encuentra entre 1 y 3

$$V_{maz} = 84441.35 \text{ mm}^3 * 0.56 * 2$$

$$V_{maz} = 94574.3 \text{ mm}^3$$

La mazarota elegida es mixta con las siguientes dimensiones:

$$V_{maz} = \left[\frac{3}{2}\right] D \left[\frac{D}{2}\right]^2 + \frac{1}{2} * \frac{4}{3} \pi * \left[\frac{D}{2}\right]^3 \quad (2.2)$$

$$V_{maz} = \frac{11}{24} \pi D^3$$

Se obtiene h reemplazando el volumen de V_{maz} en la ecuación (2.2)

$$94574.3 \text{ mm}^3 = \frac{11}{24} \pi D^3$$

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

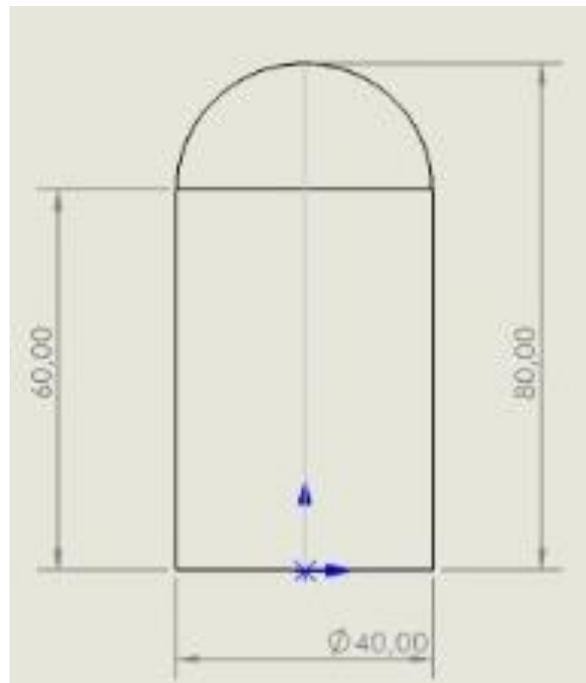


Figura 2.5 Dimensiones de la mazarota de acuerdo al criterio del volumen [Elaboración propia]

$$h = 2D = 2 * 40 \text{ mm} = 80 \text{ mm}$$

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

$$L = \frac{3}{2}D = \frac{3}{2} * 40 \text{ mm} = 60 \text{ mm}$$

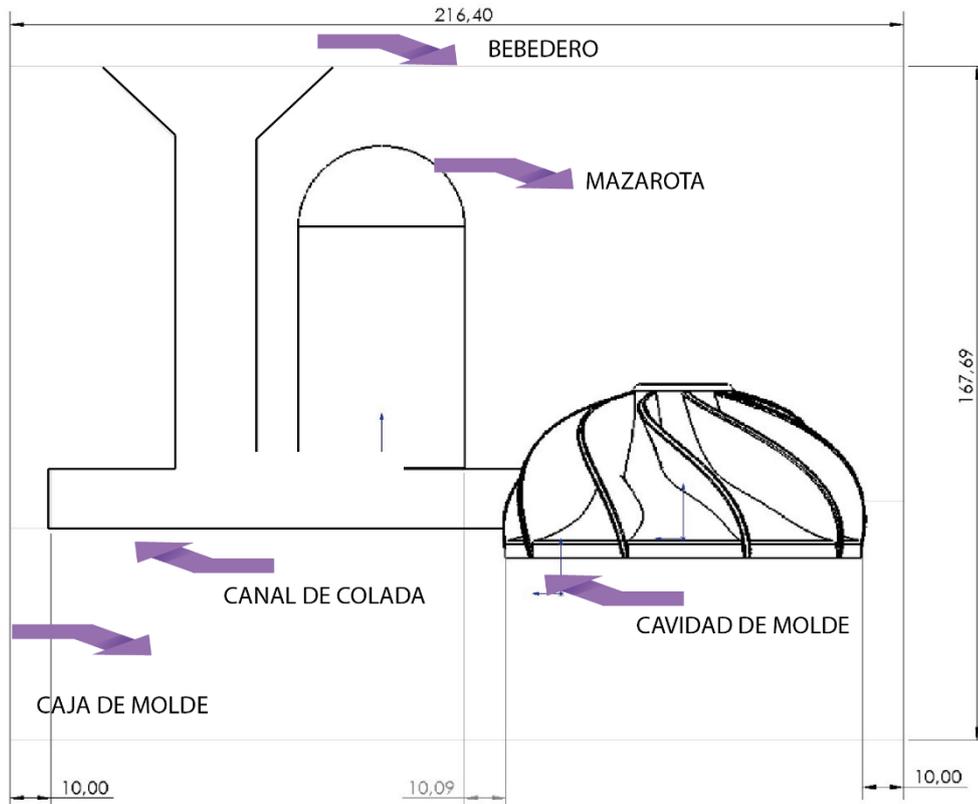


Figura 2.6 Sección del molde de arena en el momento que se realiza el vertido de la colada [Elaboración propia]

2.9 Proceso de fundición

Alternativa A: Fundición en molde de Arena

Características: La fundición en molde de arena se escogió debido que este método resiste a altas temperaturas y por el gran uso en variedades de metales y aleaciones; además, este método se usó en la elaboración de los impellers de bronce y aleaciones en el taller fundición.

Alternativa B: Fundición en molde de yeso

Características: La fundición en molde de yeso se escogió debido que este método reduce los agrietamientos y esta toma poco tiempo en fraguar. En este tipo de fundición se usa arena de sílice y yeso. Para lograr la mezcla de este molde se utilizan los materiales en la misma proporción; es decir, la misma cantidad de yeso, de arena de sílice y de agua tal como se muestra en la tabla. Luego de mezclar estos tres componentes se procede a colocarlos alrededor del modelo impreso. Finalmente, esta mezcla fragua en un tiempo aproximado de 8 horas para asegurar el secado de la mezcla.

Tabla 2.7 Tabla de proporción de partes de mezcla [Elaboración propia]

Yeso	Arena de Sílice	Agua
1	1	1

2.10 Contracciones del proceso de fundición, para coladas de Bronce y Aluminio

Cuando se realiza la fundición del respectivo metal este al enfriarse se contrae y al calentarse se dilata. Para el modelo experimental, se toma en cuenta la contracción térmica del metal, determinada por el coeficiente de expansión térmica, al final la pieza fundida fue afectada por la contracción por solidificación lo cual causó que el impeller se vea afectado en sus dimensiones finales.

Por esto para la prueba final se tomó en consideración esta contracción y al momento de imprimir el modelo en 3D se aumenta el porcentaje de contracción en los parámetros de configuración.

Tabla 2.8 Contracciones Volumétricas para bronce fundido, (Steel Founder's Society of America)

Contracción volumétrica para Bronce en un proceso de fundición debida a la contracción por solidificación y contracción del solido		
Metal	Contracciones Volumétricas debido a:	
	Contracción Térmica del solido [%]	Contracción por solidificación [%]
Bronce (Cu - Sñ)	5,5	6
Aluminio	1,3	5,6

2.11 Contracción del Material de impresión PLA (Ácido Poliláctico) y ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno)

De forma experimental se determinó que el porcentaje de contracción del filamento PLA y ABS, para ello se imprimió probetas, las cuales se compararon con las medidas originales del CAD y se obtuvo una diferencia de 0,5% para el ABS y 0,3% para el PLA.



Figura 2.7 Probetas impresas en 3D para determinar la contracción por solidificación
[Elaboración propia]

Tomando en cuenta estos valores y los del metal a fundir se sobredimensiono el modelo para compensar las contracciones que se presentaron en la fundición.

Tabla 2.9 Dimensiones del modelo impeller con porcentaje de corrección [Elaboración propia]

Representación	Medida normal [mm]	Porcentaje de corrección [%]
L	86	1,3% metal + %0.5 polímero
A	43	1,3% metal + %0.5 polímero
W	24	1,3% metal + %0.5 polímero

Tabla 2.10 Dimensiones finales con las cuales se imprime en 3D el modelo de impulsor [Elaboración propia]

Representación	Medida normal [mm]	Dimensiones finales [mm]
L	86	87,8
A	43	44,77
W	24	24,43

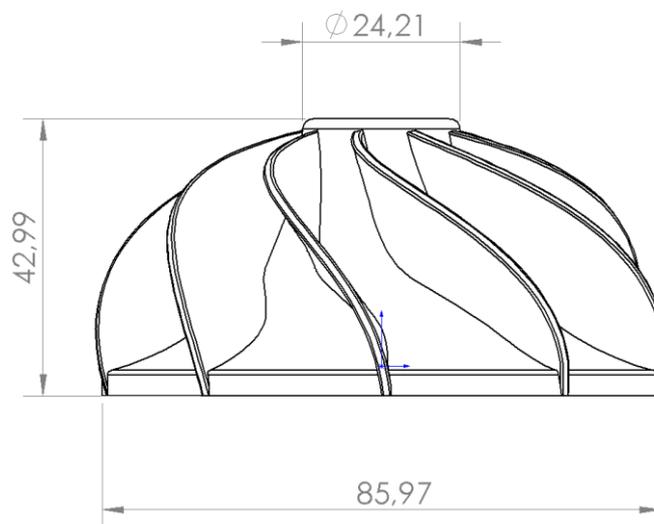


Figura 2.8 Dimensiones del impeller impreso en 3D [Elaboración propia]

2.12 Estudio estático del impeller

Se analizan las fuerzas que actúan sobre la geometría del impeller, cuando el modelo estaba dentro del molde.

2.12.1 Material

Las partes con menor espesor son los alabes del impeller, el material es Ácido Poliláctico (PLA).

Tabla 2.11 Propiedades del PLA [Elaboración propia]

Material	Límite de Tracción	Límite de Elasticidad	Densidad
PLA	24 MPa	32Mpa	$1020 \frac{kg}{m^3}$

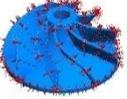
2.12.2 Cálculos para determinar el máximo esfuerzo producido debido a la presión de la arena

El modelo impreso del impeller fue colocado en la caja del molde que contiene arena por lo cual la carga estará determinada por el peso de esta.

Las dimensiones del contenedor para la fundición son 140 mm x 182 mm x 182 mm, el peso de la arena es 27,6 N.

Se calcula la presión en la arena, para esto se utilizan las herramientas de un software de Diseño y se calcula el área del impeller.

Tabla 2.12 Propiedades volumétricas del impeller [Elaboración propia]

 <p>Nombre del modelo: Impeller Configuración actual: Default</p>			
Nombre de documento y referencia	Tratado como	Propiedades volumétricas	Ruta al documento/Fecha de modificación
<p>Escala1</p> 	Sólido	<p>Masa:0,0860995 kg Volumen:8,44113e-05 m³ Densidad:1.020 kg/m³ Peso:0,843775 N</p>	<p>C:\Users\alfgomez\Downloads\Impeller (3).SLDPRT Jan 26 10:21:10 2020</p>

Se simuló con un programa CAD las condiciones a las cuales estará sometido el modelo impreso en 3D dentro de la caja con arena, para verificar que este no se vea afectado o se fracture.

$$\text{Área} = 46527,8 \text{ mm}^2$$

$$\text{Peso de la arena} = 27,6 \text{ N}$$

$$P = \frac{F}{A}$$

$$P = \frac{27,6 \text{ N}}{46527,8 \text{ mm}^2}$$

$$P = 0,0006 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Tomando en cuenta que el modelo fue impreso con un infill del 20%, se corrige la presión multiplicándolo por un factor de 0,8 para que el análisis en el software CAD sea más realista.

$$P = 0,0006 \frac{N}{mm^2} * 0,8 = 0,00048 \frac{N}{mm^2}$$

Como el modelo impreso se encontrara sumergido dentro del molde de arena, todas las superficies que esten en contacto con la arena estaran sometidas a la presión que ejerce la arena.

Tabla 2.13 Cargas y sujeciones [Elaboración propia]

Nombre de sujeción	Imagen de sujeción	Detalles de sujeción			
Fijo-1		Entidades:	1 cara(s)		
		Tipo:	Geometría fija		
Fuerzas resultantes					
Componentes	X	Y	Z	Resultante	
Fuerza de reacción(N)	-0,0970881	2,95973	1,14255	3,17409	
Momento de reacción (N.m)	0	0	0	0	

Nombre del modelo: Impeller (3)
Nombre de estudio: Análisis estático Impeller Tesis(-Default-)
Tipo de malla: Malla sólida

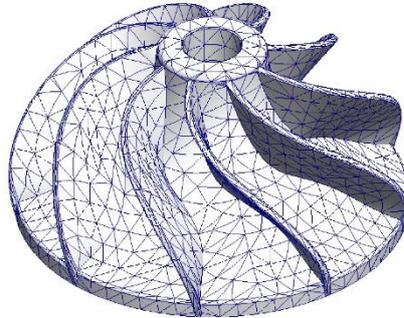


Figura 2.9 Mallado del Modelo CAD [Elaboración propia]

En la figura que se muestra a continuación se observan los resultados del impeller sometido a un esfuerzo de Von Mises, aquí se indica la distribución de los esfuerzos y la tensión máxima es de 0,062 MPa y como este valor es menor a los 32 Mpa que soporta el ABS el modelo no fallará.

Nombre del modelo: Impeller (3)
Nombre de estudio: Análisis estático Impeller Tesis(-Default-)
Tipo de resultado: Análisis estático tensión nodal Tensiones1
Escala de deformación: 3.316,27

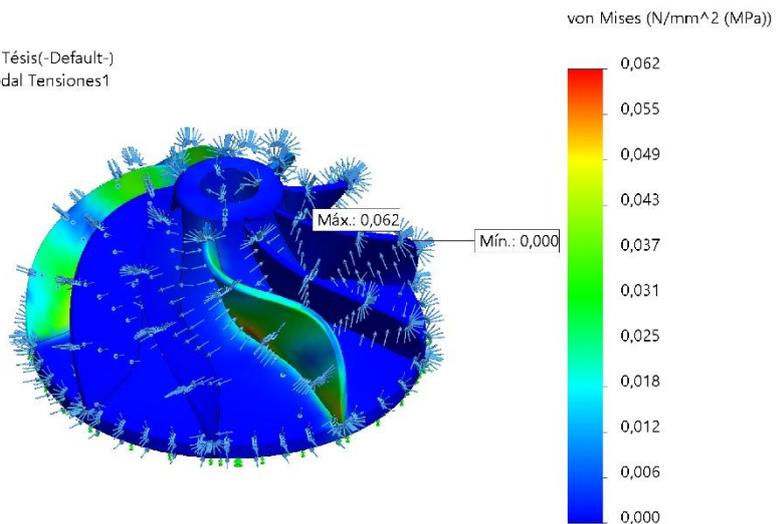


Figura 2.10 Cargas en el Impeller [Elaboración propia]

La deformación máxima que puede sufrir en un caso extremo el impeller debido a la presión de la arena es 0,003 [mm] casi despreciable.

Nombre del modelo: Impeller (3)
 Nombre de estudio: Análisis estático Impeller Tesis(-Default-)
 Tipo de resultado: Desplazamiento estático Desplazamientos1
 Escala de deformación: 3.316,27

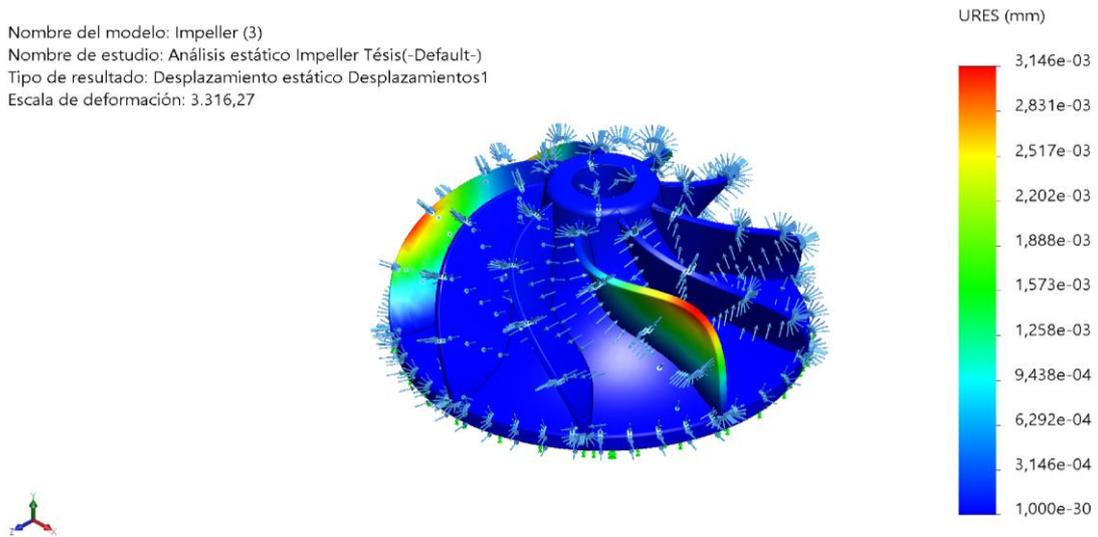


Figura 2.11 Deformaciones [Elaboración propia]

2.13 Proceso de impresión 3D

El software que se utilizó es CURA versión 4.4.1 de código abierto que permite modificar los parámetros de acuerdo con la necesidad del usuario, su interfaz es muy amigable y además trae cargado varios perfiles con configuraciones para el uso de diferentes impresoras 3D.

2.13.1 Parámetros de impresión 3D para filamento PLA

En base a la experiencia y la pruebas que se realizaron se escogieron los siguientes parámetros para la respectiva impresión 3D.

Calidad			
Altura de capa	🔗	0.2	mm
Altura de capa inicial	🔗	0.2	mm
Ancho de línea		0.35	mm
Ancho de línea de pared		0.35	mm
Ancho de línea de la pared exterior		0.35	mm
Ancho de línea de pared(es) interna(s)		0.35	mm
Ancho de línea superior/inferior		0.35	mm
Ancho de línea de relleno		0.45	mm
Ancho de línea de falda/borde		0.35	mm
Ancho de línea de soporte	🔗	0.4	mm
Ancho de línea de interfaz de soporte	🔗	0.35	mm

Figura 2.12 Parámetros de Capa, (Software Ultimaker)

Velocidad		
Velocidad de impresión	50	mm/s
Velocidad de relleno	50	mm/s
Velocidad de pared	36	mm/s
Velocidad de pared exterior	26	mm/s
Velocidad de pared interior	36	mm/s
Velocidad de la superficie superior del forro	30	mm/s
Velocidad superior/inferior	25	mm/s
Velocidad de soporte	25	mm/s
Velocidad de relleno del soporte	25	mm/s
Velocidad de interfaz del soporte	20	mm/s
Velocidad de desplazamiento	150	mm/s
Velocidad de capa inicial	20	mm/s
Velocidad de impresión de la capa inicial	20	mm/s
Velocidad de desplaza...to de la capa inicial	60.0	mm/s

Figura 2.13 Parámetros de Velocidad, (Software Ultimaker)

Material		
Temperatura de impresión	215	°C
Temperatura de impresión de la capa inicial	215	°C
Temperatura de impresión inicial	205	°C
Temperatura de impresión final	200	°C
Modificador de la velo...miento de la extrusión	0.7	°C/s
Temperatura de la placa de impresión	60	°C
Temperatura de la capa...ión en la capa inicial	60	°C
Flujo	100	%
Flujo de pared	100	%
Flujo de pared exterior	100	%
Flujo de pared o paredes interiores	100	%
Flujo superior o inferior	100	%
Flujo de forro de superficie superior	100	%
Flujo de relleno	100	%

Figura 2.14 Parámetros de Material, (Software Ultimaker)

Desplazamiento		
Modo Peinada		Todo
Retracción antes de la pared exterior		
Evitar partes impresas al desplazarse		<input checked="" type="checkbox"/>
Evitar soportes al desplazarse		<input checked="" type="checkbox"/>
Distancia para evitar al desplazarse		3 mm
X de inicio de capa		330.0 mm
Y de inicio de capa		228.0 mm
Salto en Z en la retracción		<input checked="" type="checkbox"/>
Salto en Z solo en las partes impresas		<input checked="" type="checkbox"/>
Altura del salto en Z		2 mm
Salto en Z tras cambio de extrusor		<input checked="" type="checkbox"/>
Salto en Z tras altura de cambio de extrusor		2 mm

Figura 2.15 Parámetros de desplazamiento, (Software Ultimaker)

Perímetro		
Extrusor de pared		No reemplazado
Extrusor de pared exterior		No reemplazado
Extrusor de pared interior		No reemplazado
Grosor de la pared		1.2 mm
Recuento de líneas de pared		3
Distancia de pasada de la pared exterior		0.2 mm
Capas de la superficie superior del forro		2
Extrusor superior/inferior		No reemplazado
Grosor superior/inferior		1.2 mm
Grosor superior		1.2 mm
Capas superiores		6
Grosor inferior		1.2 mm
Capas inferiores		6
Patrón superior/inferior		Líneas
Patrón inferior de la capa inicial		Líneas

Figura 2.16 Parámetros de perímetro, (Software Ultimaker)

2.13.2 Tipos de relleno y densidad para impresión de modelo Impeller

Existen varios tipos de infill de relleno, para este proyecto se seleccionaron 3 tipos (Triángulos, Rejilla y Líneas) con una densidad de relleno de 100 %, 50%, 20%.

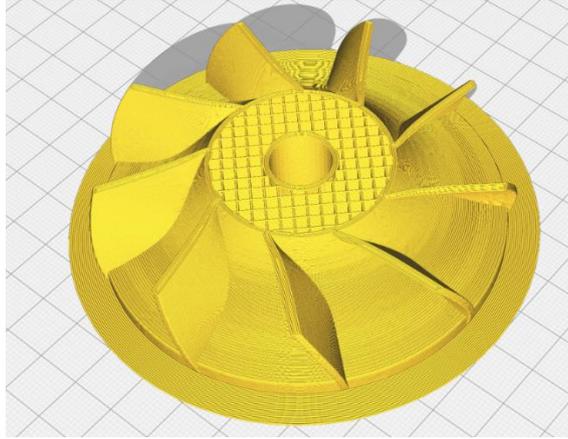


Figura 2.17 Relleno tipo líneas con una densidad del 20% [Elaboración propia]

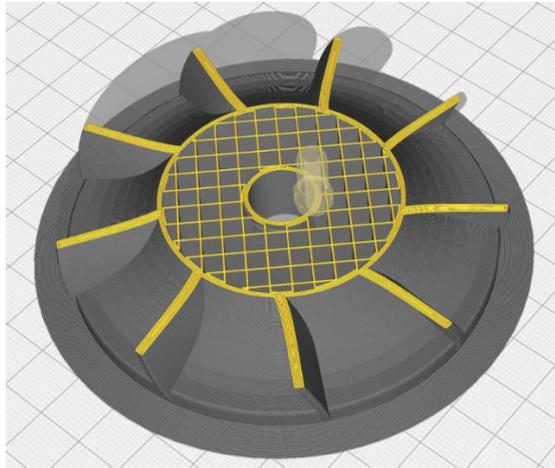


Figura 2.18 Relleno tipo rejilla con una densidad del 20% [Elaboración propia]

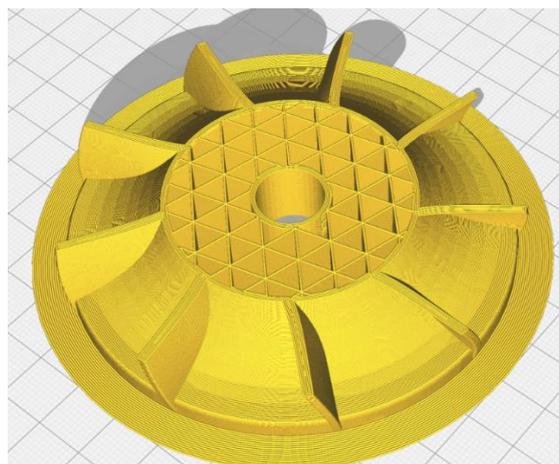


Figura 2.19 Relleno tipo triángulos con una densidad del 20% [Elaboración propia]

2.14 Proceso de fabricación de modelos impellers

2.14.1 Modelo A de impeller

La fabricación de los moldes se realizó con los siguientes pasos:

1. Se escaneó el modelo de impeller usado para la fabricación de la pieza de manera convencional.

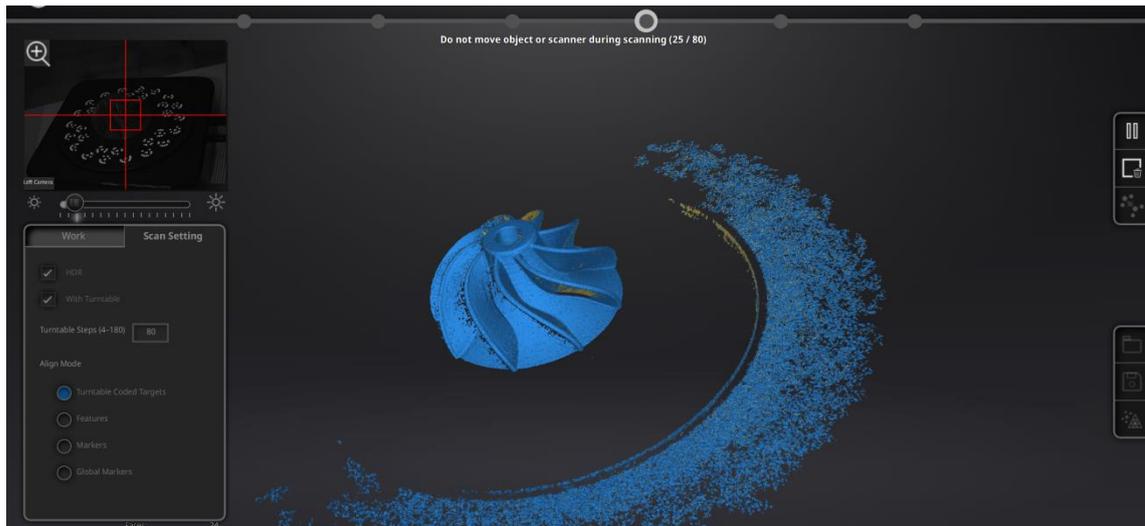


Figura 2.20 Modelo de hierro fundido de impeller en mesa de escáner [Elaboración propia]

2. Se obtuvo el modelo en el software de escaneo y se rectificó con Solidworks para asegurar que los parámetros reales sean iguales a los mostrados en el programa.

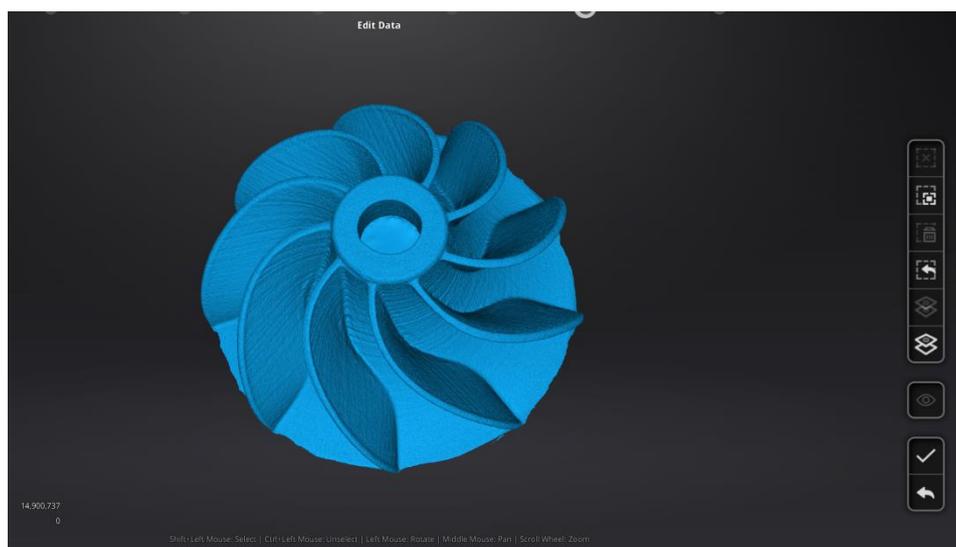


Figura 2.21 Obtención de modelo en Shining 3D de impeller [Elaboración propia]

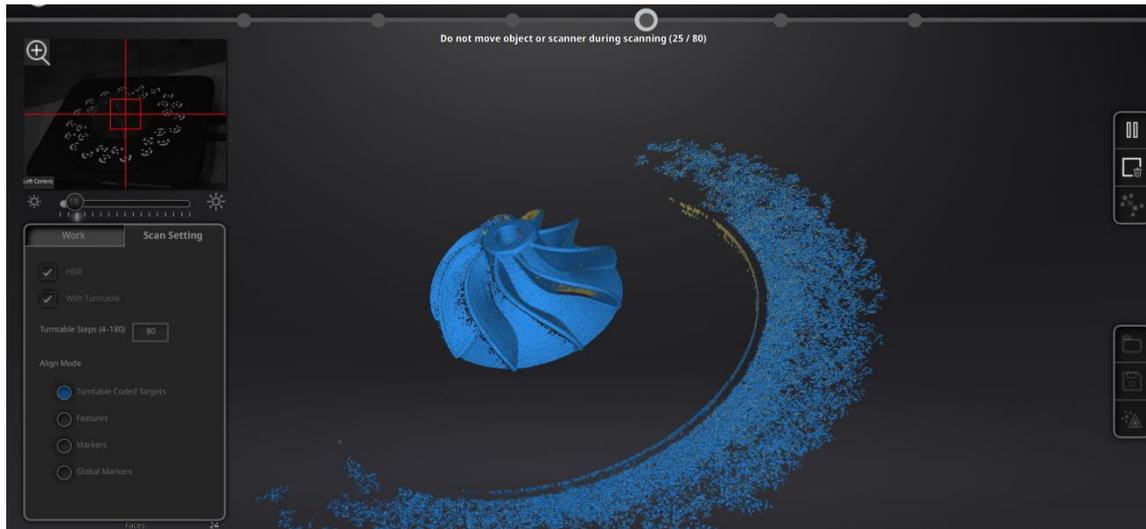


Figura 2.22 Dimensionamiento del impeller en base a los datos obtenidos gracias al escaneo 3D [Elaboración propia]



Figura 2.23 Modelo Final Procesado Con Solidworks [Elaboración propia]

3. Se imprimieron los modelos

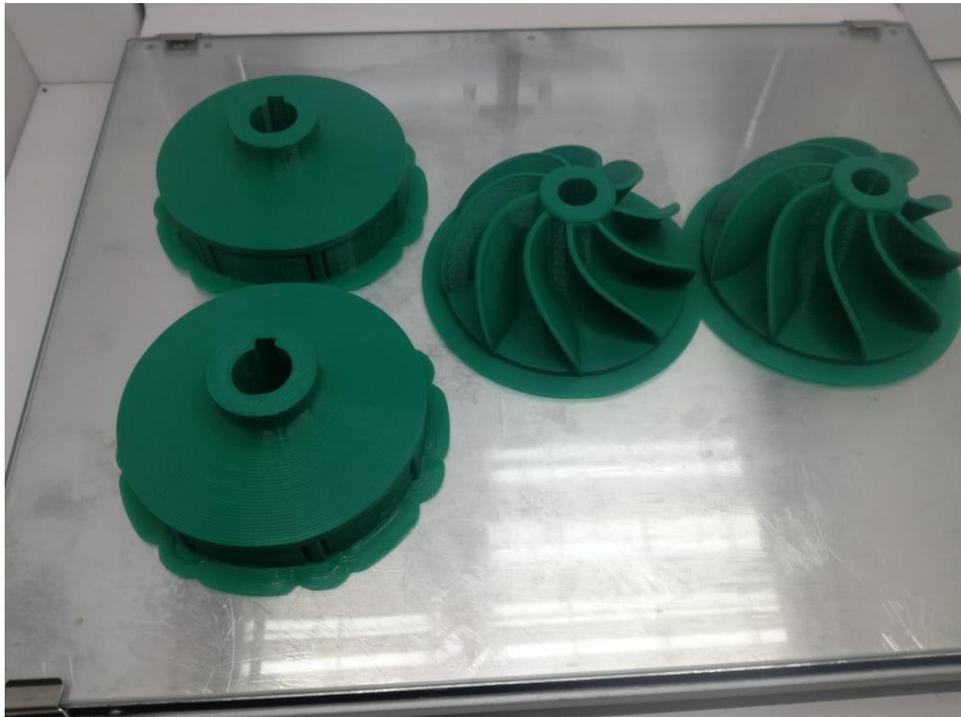


Figura 2.24 Proceso de impresión 3D de moldes en la impresora Ultimaker s5 [Elaboración propia]

Para la impresión de los modelos de impellers se usaron diferentes combinaciones de materiales y de equipos de impresión en 3D como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 2.14 Combinación de materiales e impresor [Elaboración propia]

Moldes	Impresora	Material 1	Material 2
Molde 1	Ultimaker 3	PLA, PVA	ABS, PVA
Molde 2	Tevo Little Monster	PLA	ABS

2.14.2 Modelo B de impeller

Para este modelo de impeller se siguió los mismos pasos descritos anteriormente

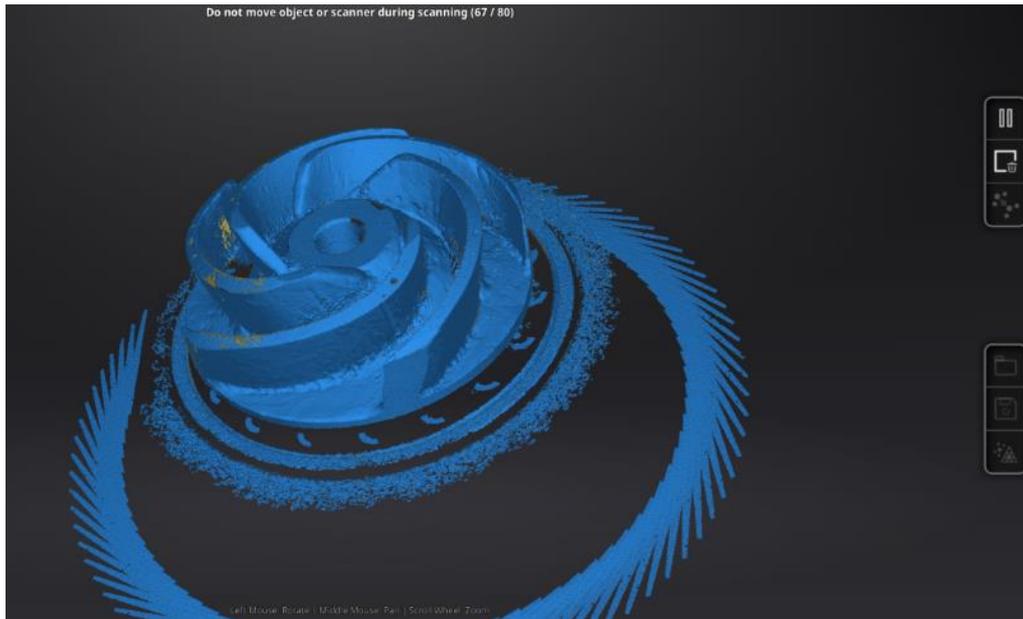


Figura 2.25 Escaneo 3D del modelo impeller B [Elaboración propia]



Figura 2.26 Mallado del impeller B para obtener el CAD final [Elaboración propia]

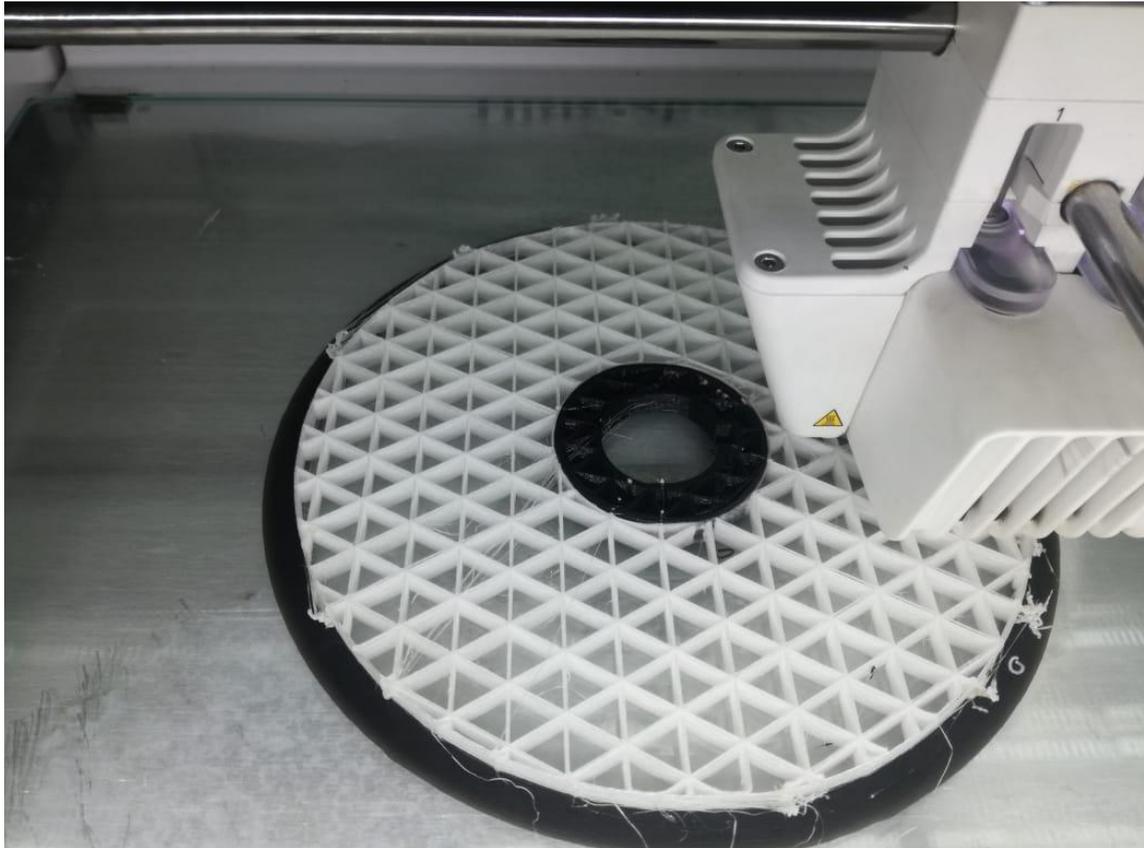


Figura 2.27 Pieza configura con los parámetros definidos, (Software Ultimaker)

2.15 Montaje de modelos en arena verde y yeso con arena de sílice

Una vez impresos los dos modelos de impulsadores se procedió a montarlos en la arena verde y dentro de la caja de la mezcla de yeso y arena de sílice respectivamente. Después a cada uno de los modelos se procede a crear los canales de alimentación y las mazarotas de acuerdo con sus dimensiones. Finalmente, en el moldeo de arena se fijan las cajas y en el moldeo de yeso y arena se espera que fragüe estas aproximadamente 8 horas.

2.16 Proceso de fundición del polímero

Se realizó dos procedimientos los cuales se indican a continuación:

- Proceso de fundición del polímero directo por soplete
- Procesos de fundición del polímero por estufa



Figura 2.28 Fundición del modelo plástico con directo con soplete [Elaboración propia]

Debido a que en el taller no se contaba con una estufa para colocar el molde dentro de la misma se utilizó un soplete para calentar el molde hasta derretir internamente el modelo impreso en 3D que contenía la caja del molde, este procedimiento se lo realizó por 45 minutos, girando constantemente el molde para que el material combustionado pueda salir por el vertedero y mazarota del molde y así no se quede alojado dentro del mismo.



Figura 2.29 Fundición del modelo plástico con estufa [Elaboración propia]

Para obtener mejores resultados se utilizó una estufa para colocar el molde dentro de la misma y así combustionar el modelo impreso en 3D.

2.17 Fusión y vaciado de metal

Se seleccionó la materia prima de bronce y aleaciones para llenar el crisol y fundirlo hasta llegar a una temperatura de 600. Después de obtener en bronce fundido este se vació en las cajas de arena.



Figura 2.30 Fusión de colada de bronce [Elaboración propia]



Figura 2.31 Vertido de colada de bronce dentro de los moldes [Elaboración propia]

2.18 Piezas finales

Para la obtención de las piezas se solidificó el material que se vació en las cajas de arena y en los moldes fabricados con la mezcla de arena de yeso y arena de sílice. Finalmente se procedió a romper los dos tipos de moldes para la obtención de las piezas finales.

2.19 Ensayos de dureza

Los ensayos de dureza que se realizaron fueron los siguientes: ensayo de dureza Brinell y ensayo de dureza Rockwell los cuales se ejecutaron con probetas de bronce y de aluminio para evaluar tal dureza de estos.

Para el ensayo de Dureza Rockwell en primer lugar se procedió a obtener una probeta de la mazarota del experimento de bronce y de aluminio respectivamente. Luego, se procedió a realizar cuatro mediciones con los parámetros de la tabla 2.13. Finalmente, de acuerdo con la norma ASTM E18 se procedió a determinar la dureza de los dos materiales.

Tabla 2.15 Descripción de equipo y parámetros de ensayo de Dureza Rockwell
[Elaboración propia]

Durómetro	Indentador	Carga (KGS)
LECO Rockwell Hardness Tester LR	1/16 IN BALL	60

Para el ensayo de Dureza Brinell se siguieron los mismos pasos para la obtención de la dureza, pero en este caso se realizaron seis mediciones de los diámetros de huella y sus parámetros de trabajo fueron los descritos en la tabla 2.14 y con la norma ASTM E10 – 12.

Tabla 2.16 Descripción de equipo y parámetro de ensayo de Dureza Brinell [Elaboración propia]

Durómetro	Escala
LECO LCB-3100	10/500 HBW

2.20 Metalografía

Para realizar la metalografía se usó una probeta de bronce de forma cilíndrica la cual se obtuvo de la mazarota del experimento cuatro. En primer lugar, se procedió a montar la muestra en resina para poder facilitar el manejo de esta. Luego, se lijo la muestra con cinco diferentes lijas. Después, se pulió la muestra con agua y alúmina. Finalmente, se

realizó el ataque químico en este caso de ácido fluorhídrico por aproximadamente dos minutos para así poder realizar el examen microscópico y su respectivo análisis. Se procedió a hacer el análisis de la microestructura de la pieza obtenida

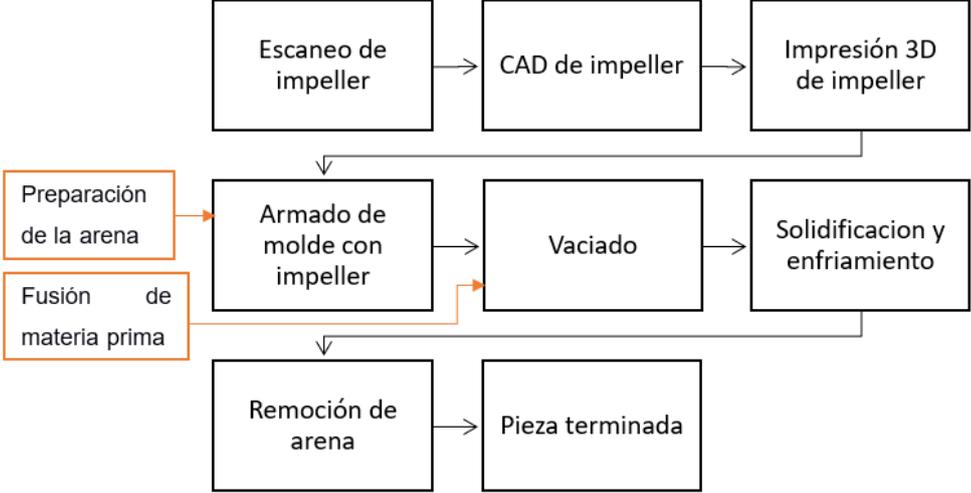


Figura 2.32 Secuencia de pasos para la obtención de impeller por fundición en arena con implementación de manufactura aditiva [Elaboración propia]

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

De acuerdo con lo establecido en el capítulo anterior se procedió a realizar ciertos experimentos para poder llegar a la mejor solución del problema en el taller de fundición de piezas navales.

En la siguiente tabla se muestran diferentes variables que sirvieron para poder evaluar los resultados de estos experimentos en un rango del 1 al 5, siendo el mayor valor el positivo y el menor el negativo.

Tabla 3.1 Matriz de evaluación de variables [Elaboración propia]

Variables	Ponderacion %	EXPERIMENTOS			
		1	2	3	4
Materiales	4	5	2	2	4
Tiempo	6	4	3	1	2
Costo	12	5	3	1	3
Complejidad	10	5	4	2	4
Oportunidad	24	1	5	5	5
Posible aplicación	9	5	3	2	3
Resultado	35	1	5	5	5
Total	100	2,58	4,24	3,59	4,26

En la tabla 3.1 se observan la ponderación en porcentaje del 1 a 100 a las variables y a cada experimento un valor del 1 al 5 siendo el mayor el valor positivo y el menor el negativo. El experimento 4 obtuvo el mayor valor de todos lo que significa que este es el óptimo de acuerdo la tabla.

3.1 Comportamiento de experimentos

3.1.1 Experimento 1:

Este experimento usó el mismo material que se usa en el taller de fundición (bronce), se usó soplete para combustionar el material de plástico y para la fundición se realizó con molde de arena. Al haber sido en molde de arena este tomó el tiempo muy parecido al del método convencional ya que en lugar de dejar un espacio para que la mezcla de bronce entre y solidifique, se incrustó a la arena la pieza impresa. A nivel de costos no

hubo diferencias ni fue complejo realizarlo por la similitud con el método convencional. No agrega valor a la operación actual, es muy posible aplicarlo, pero no entregó el resultado esperado ya que cuando se estaba vertiendo la mezcla de bronce, el material que estaba dentro del molde no se combusionó por completo; por lo que el bronce se solidifico en la mazarota y no llego a llenar la pieza como se esperaba.

En la figura 3.1 se observa al impeller de PLA después de haber pasado por el proceso de fundición el cual no presentó los resultados esperados. Se observa que el material PLA no se fusionó por tal motivo no se logró llenar el molde con bronce.



Figura 3.1 Impeller de PLA [Elaboración propia]

3.1.2 Experimento 2:

Este experimento a diferencia del anterior usó aluminio como materia prima el cuál no es de uso común en el taller y para la fundición se usó molde de yeso, en este también se usó soplete para quemar el plástico. Este experimento tomó más tiempo que el usado en el taller ya que se tuvo que generar la mezcla de arena de sílice y yeso en doce horas en que fragüe por completo donde se dejó la pieza de plástico en la cual se demoró aproximadamente. Generó mayor costo ya que se agregan el yeso y mayor tiempo de mano de obra en ejecutarlo. Este tuvo mayor complejidad porque al momento de meter la pieza impresa en la mezcla de yeso se debió ser muy cuidadosos para no despegar las mazarotas y hacerlo de manera rápida para que el yeso no fragüe y no permita posicionar la pieza en la mezcla. En este caso le da valor agregado ya que es posible

generar impellers que antes no se podían hacer; además, se pueden realizar las piezas que se deseen mediante esta aplicación.

Se obtuvieron los resultados deseados, aunque el impeller obtenido no fue estrictamente con el mejor acabo en ciertas partes por su tamaño; sin embargo, uno de los puntos de mayor enfoque de esta metodología fue poder tener impulsadores con aspas curvadas y estas si se obtuvieron a lo largo de este experimento.

Se muestra a continuación el cálculo de la cantidad de material el cuál se utilizó para reducir desperdicios.

En la figura 3.2 se tiene el impeller de aluminio obtenido por la fundición con molde de yeso. Es posible observar los alabes de dicho impeller son curvos siendo este uno de los enfoques principales de la fabricación de esta, a pesar de que se puede observar cierta porosidad en la superficie del material.



Figura 3.2 Impeller de aluminio [Elaboración propia]

3.1.3 Experimento 3:

En esta prueba la diferencia en relación con el experimento dos se dio en la herramienta para quemar el plástico. Este en lugar de usar sopletes para combustionar la pieza de plástico, se usó un horno. En base al tiempo este tomó aún más tiempo que en anterior ya que en el horno se demoró aproximadamente una hora en quemar el plástico. Ya que el taller de fundición no tiene un horno para quemar el plástico, este experimento resultó generar mayor tiempo y complejidad en su ejecución. Este experimento al igual que el

anterior da la oportunidad al taller a realizar más opciones en las piezas que obtienen mediante la fundición. El resultado de este no fue como se esperó ya que el horno estaba en otro taller y el experimento en si no se realizó consecutivamente; por lo que, al momento de vaciar la mezcla en el molde de yeso este cambio de temperatura no permitió obtener la pieza esperada.



Figura 3.3 Molde de yeso después de estar en horno [Elaboración propia]

3.1.4 Experimento 4:

En esta ocasión se utilizó bronce como materia prima el cual actualmente es el mismo material usado en el taller de fundición. También para la ejecución de este, se usó soplete y la fundición se hizo en molde de yeso. Este experimento al igual que el experimento dos usó la mezcla de arena de sílice y yeso para obtener la mezcla en donde la pieza de plástico se introdujo por lo que tomo un tiempo considerable al realizar estos procedimientos. En base a costos si generó costos considerables ya que se realiza en molde de yeso. Este experimento fue de mayor volumen que el experimento dos ya que al haber obtenido buenos resultados se procedió a generar un impeller con las dimensiones y con el material necesitado en el taller de fundición. Los resultados fueron bastante óptimos ya que los alabes de este impulsor no son rectos; por lo tanto, este genera una oportunidad al taller de crear impellers con esta metodología.

Se muestra a continuación el cálculo de la cantidad de material el cuál se utilizó para reducir desperdicios.

A continuación, en la figura 3.2 se puede observar la pieza final la cual se realizó con las dimensiones promedio de un impeller que se fabrica en el taller la cual posee como característica los alabes curvos.



Figura 3.4 Impeller de Bronce [Elaboración propia]

3.2 Ensayos de dureza

Se realizaron los respectivos ensayos de dureza Rockwell basados en la norma ASTM E18 para verificar las mejoras en las propiedades mecánicas de los impellers fundidos con el procedimiento empleado. En el apéndice E se presentan fotos de los dos tipos de ensayos realizados en LEMAT.

3.2.1 Ensayo de dureza Rockwell con Probeta de Bronce

Se realizan ensayos de dureza en el laboratorio LEMAT de ESPOL para comparar los diferentes resultados de acuerdo con cada proceso utilizado para realizar la fundición y así poder determinar cuál fue el óptimo.

Tabla 3.1 Ensayo de dureza Rockwell con Bronce [Elaboración propia]

		Escuela Superior Politécnica del Litoral Facultad de Ingeniería Mecánica LEMAT			
ENSAYO DE DUREZA					
Tipo de estudio: Laboratorio			Fecha: 16/01/2020		
Centro de estudio y análisis: LEMAT			Supervisado por: Ing. Erick Gutierrez		
EQUIPO UTILIZADO			Condiciones ambientales de lugar		
Durómetro: LECO			Temperatura máx./mín.: 22,5° C / 22,0° C		
Modelo: Rockwell Hardness Tester LR			Humedad relativa máx./mín.: 65,6%/64,8%		
NORMA DE ENSAYO:			ASTM E18		
Método: Rockwell		Probeta (Material):		Bronce	
Unidad - Escala:		Identador:		1/16 IN BALL	
RESULTADOS DE ENSAYO					
# de indentación	Carga (KGS)	Dureza HRF	Dureza HRF		
1	60	68,5	69,18		
2	60	70			
3	60	67,2			
4	60	71			
Resultado: Con un indentador de 1/16 IN de bola aplicando una carga de 60 se obtuvo una dureza 69,18 HRF según norma ASTM E18					

Se muestran las condiciones del Ensayo de dureza Rockwell, el equipo utilizado, la norma usada para la ejecución de este y el indentador. El resultado obtenido es una dureza de 69.18 HRF obtenido con una carga de 60 KGS, el cual se obtuvo después de haber realizado cuatro mediciones.

3.2.2 Ensayo de dureza Rockwell con Probeta de Aluminio

Tabla 3.2 Ensayo de dureza Rockwell con Aluminio [Elaboración propia]

 Escuela Superior Politécnica del Litoral Facultad de Ingeniería Mecánica LEMAT 			
ENSAYO DE DUREZA			
Tipo de estudio: Laboratorio		Fecha: 16/01/2020	
Centro de estudio y análisis: LEMAT		Supervisado por: Ing. Erick Gutierrez	
EQUIPO UTILIZADO		Condiciones ambientales de lugar	
Durómetro: LECO		Temperatura máx./min.: 22,5° C / 22,0° C	
Modelo: Rockwell Hardness Tester LR		Humedad relativa máx./min.: 65,6%/64,8%	
NORMA DE ENSAYO:		ASTM E18	
Método: Rockwell		Probeta (Material): Aluminio	
Unidad - Escala:		Identador: 1/16 IN BALL	
RESULTADOS DE ENSAYO			
# de indentación	Carga (KGS)	Dureza HRF	Dureza HRF
1	60	72,7	75,88
2	61	75,8	
3	62	77	
4	63	78	
Resultado: Con un identador de 1/16 IN de bola aplicando una carga de 60 se obtuvo una dureza 75,88 HRF según norma ASTM E18			

Se realizaron cuatro mediciones para la obtención de la dureza Rockwell de un material de aluminio. El resultado se lo obtuvo de acuerdo con la norma ASTM E 18 siendo este de 75.88 HRF.

3.2.3 Ensayo de dureza Brinell con Probeta de Bronce

Tabla 3.3 Ensayo de Dureza Brinell Bronce [Elaboración propia]

 Escuela Superior Politécnica del Litoral Facultad de Ingeniería Mecánica LEMAT 			
ENSAYO DE DUREZA			
Tipo de estudio: Laboratorio		Fecha: 20/01/2020	
Centro de estudio y análisis: LEMAT		Supervisado por: Ing. Erick Gutierrez	
EQUIPO UTILIZADO		Condiciones ambientales de lugar	
Durómetro: LECO	Temperatura máx./mín.: 22,5° C / 22,0° C		
Modelo: LCB-3100	Humedad relativa máx./mín.: 65,6%/64,8%		
NORMA DE ENSAYO:		ASTM E10 - 12	
Método: Brinell	Probeta (Material):		Bronce
Unidad - Escala: 10/500 HBW			
RESULTADOS DE ENSAYO			
# de indentación	Diámetro de indentación	Promedio	Dureza HB
1	2,95 mm	2,97 mm	70,5 HB
2	2,99 mm		
3	2,95 mm		
4	2,97 mm		
5	2,96 mm		
6	2,97 mm		
Resultado: Diámetro de la huella 2,97 mm, dureza 70,5 HB según norma ASTM E10 - 12			

En la tabla 3.3 se muestra los resultados obtenidos del ensayo de dureza Brinell con una probeta de bronce. Se tomaron seis mediciones de diámetros con un durómetro LECO LCB – 3100 para poder llegar al resultado de 70.5 HB con la norma ASTM E10 – 12

3.2.4 Ensayo de dureza Brinell con Probeta de Aluminio

Tabla 3.4 Ensayo de Dureza Brinell Aluminio [Elaboración propia]

 Escuela Superior Politécnica del Litoral Facultad de Ingeniería Mecánica LEMAT 			
ENSAYO DE DUREZA			
Tipo de estudio: Laboratorio		Fecha: 20/01/2020	
Centro de estudio y análisis: LEMAT		Supervisado por: Ing. Erick Gutierrez	
EQUIPO UTILIZADO		Condiciones ambientales de lugar	
Durómetro: LECO	Temperatura máx./min.: 22,5° C / 22,0° C		
Modelo: LCB-3100	Humedad relativa máx./min.: 65,6%/64,8%		
NORMA DE ENSAYO:		ASTM E10 - 12	
Método: Brinell		Probeta (Material):	Aluminio
Unidad - Escala: 10/500 HBW			
RESULTADOS DE ENSAYO			
# de indentación	Diámetro de indentación	Promedio	Dureza HB
1	2,85 mm	2,87 mm	75,7 HB
2	2,85 mm		
3	2,90 mm		
4	2,85 mm		
5	2,84 mm		
6	2,86 mm		
Resultado: Diámetro de la huella 2,87 mm, dureza 75,7 HB según norma ASTM E10 - 12			

En la tabla 3.4 se muestra los resultados obtenidos del ensayo de dureza Brinell con una probeta de aluminio. Se usó un durómetro LECO LCB – 3100 para poder llegar al resultado de 70.5 HB con la norma ASTM E10 – 12 después de seis mediciones realizadas.

3.3 Metalografía

A continuación, se muestran las diferentes imágenes obtenidas del microscopio de la metalografía la cual se realizó bajo la norma ASTM E3 - 11 que se efectuó en la probeta de bronce, ya que este es el material con el que se fabrican los impellers en el taller de fundición.

Para realizar la metalografía en esta probeta se usó ácido clorhídrico para el ataque químico durante 2 minutos

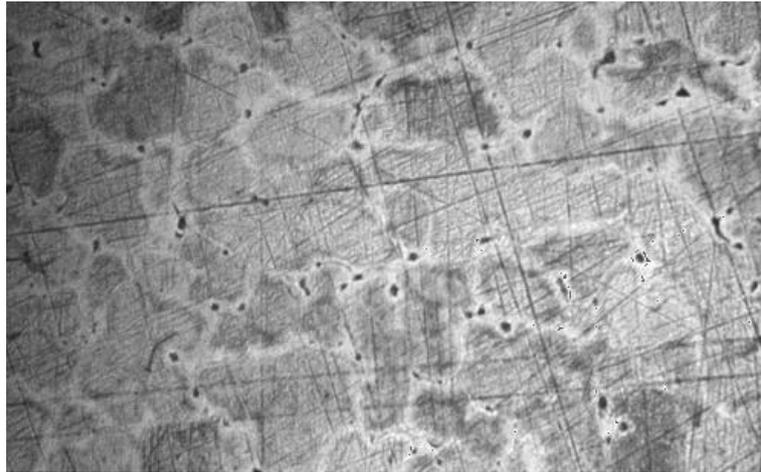


Figura 3.5 Metalografía a 200x [Elaboración propia]

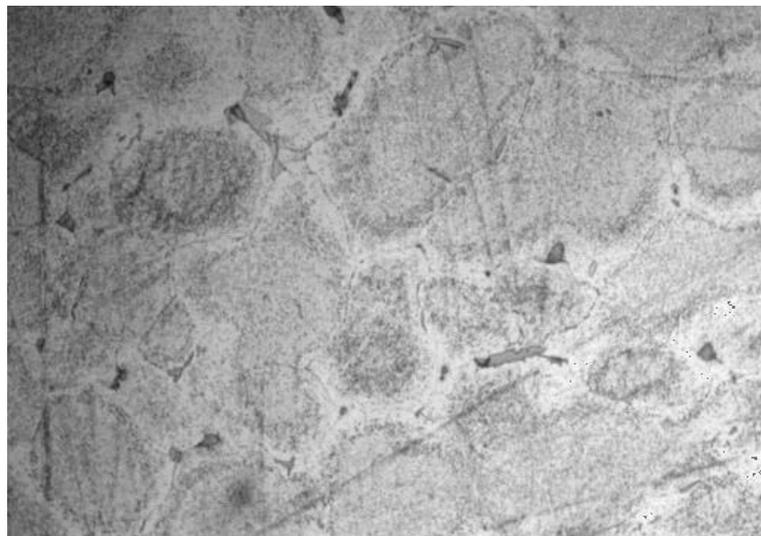


Figura 3.6 Metalografía a 500x [Elaboración propia]

En las figuras anteriores de la metalografía obtenida se observan granos bien definidos y en algunos sectores porosidades.

3.4 Temperatura de Descomposición del Ácido Poliláctico

La temperatura de descomposición del PLA en función del tiempo es de 580°C con una pérdida de masa del 99,9% en 4821 segundos la cual se presenta en la siguiente gráfica.

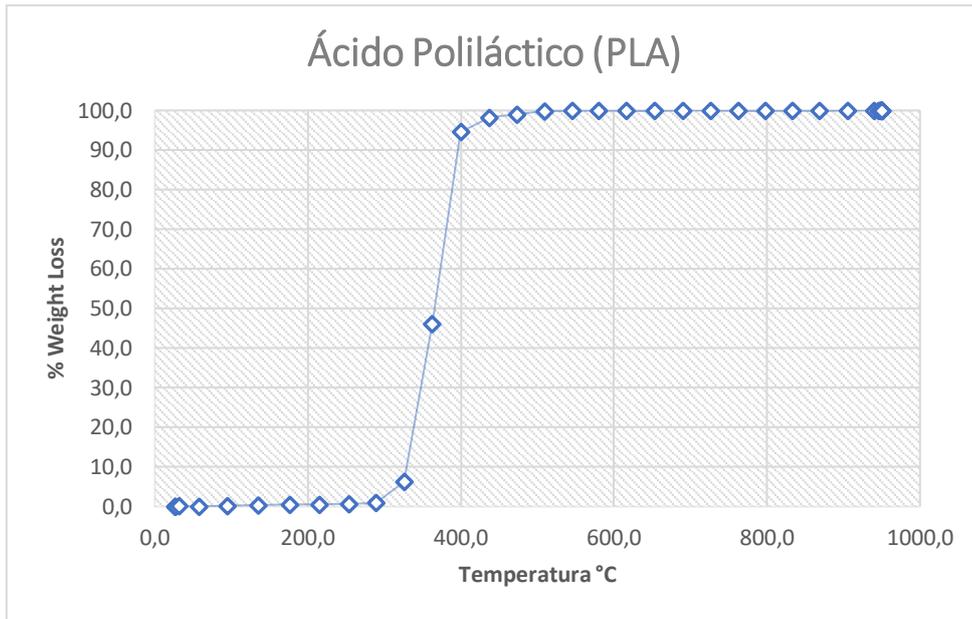


Figura 3.7 Temperatura de descomposición del Ácido Poliláctico [Elaboración propia]

3.5 Temperatura de descomposición del Acrilonitrilo Butadieno Estireno

La temperatura de descomposición del ABS en función del tiempo es de 613°C con una pérdida de masa del 98,7% en 5016 segundos la cual se presenta en la siguiente gráfica.

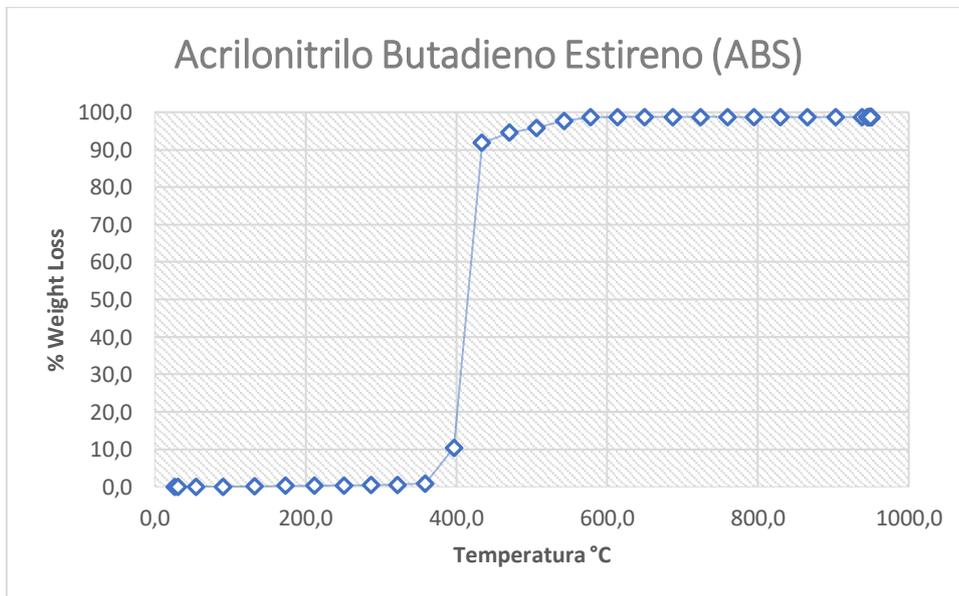


Figura 3.8 Temperatura de descomposición del Acrilonitrilo Butadieno Estireno [Elaboración propia]

3.6 Análisis de Costos

Tabla 3.5 Detalles de costos [Elaboración propia]

	Pieza 20 lbs
Saco de yeso (2kg)	\$ 6
Saco de arena de sílice (2kg)	\$ 4
Materia prima (bronce), mano de obra, combustible	\$ 300
Pieza impresa	\$ 35
Costo	\$ 345

En la tabla 3.5 se muestran los valores de los costos de los materiales, mano de obra, materia prima y pieza impresa que se usaron para obtener el impeller de bronce con alabes curvos

Tabla 3.6 Evaluación económica de proyecto [Elaboración propia]

	Año		
	Incrementales	ACTUAL	
		Pieza 20 lbs	Alabe Curvo
Costo	15%	\$ 300	\$ 345
Unidades Vendidas	20%	240	48
Precio	10%	\$ 600	\$ 660
Margen		\$ 72.000	\$ 15.120
Crecimiento Ganancia			21%

En la tabla 3.6 se observan los valores de precios y costos de un impeller de alabes rectos comparados con los de un impeller de alabes curvos. Se muestran también el crecimiento de ganancia si se fabrican 48 piezas en un año.

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

Acorde con los objetivos planteados en este proyecto, se deja como metodología, un proceso establecido y probado para poder fabricar impulsadores con alabes curvos.

El Implementar tecnología de Impresión 3D para imprimir modelos y utilizarlos en procesos de fundición conllevó una mejora significativa para el taller Velasco, ya que adquirieron la capacidad de fabricar impeller con requisitos técnicos.

Con el diseño de la mazarota se logró obtener piezas con acabados bastante buenos además que se evitó rechupes al momento de verter la colada dentro del molde.

En base a los resultados obtenidos en el análisis termogravimétrico TGA, se concluye que el modelo impreso en 3D con material PLA se descompone en un 99,9 % del total de su masa, en un tiempo de 80 minutos sometido a una temperatura constante de 580 °C, esto utilizando un horno de sinterización o estufa, este análisis repercutió mucho en el acabado final de la pieza fundida.

Además, el TGA también se lo realizo para el material ABS. Con los datos obtenidos se concluye que el ABS se descompone en 98,7 % del total de su masa, en un tiempo de 83 minutos a una temperatura constante de 683 °C.

Se encontró que los impellers fundidos con bronce en el taller presentaron una dureza Brinell de 70.5 HB y un tamaño de grano parcialmente uniforme, además la pieza final presento una alta cantidad de porosidades, rechupes y rebabas.

En base a los resultados obtenidos en los modelos impresos en 3D, se dejan establecidas las configuraciones como: velocidad, temperatura, infill y espesor de capa,

para obtener modelos de impeller, estos parámetros se seleccionaron tomando en cuenta la presión que se ejerce en los moldes de arena y de yeso sobre el modelo.

Finalmente, el uso de impresión 3D para la fabricación de modelos impeller se implementó con éxito en el taller; la parte más significativa del proyecto es el utilizar tecnología de impresión 3D para mejorar la producción, logrando que la empresa adquiriera una mayor competitividad dentro del mercado al que se dedica.

4.2 Recomendaciones

Se recomienda usar el software Magmasoft para poder analizar el proceso de fundición y observar posible mala ejecución que genere poros en las piezas finales.

Cuando se realiza un diseño y modelo impreso en 3D para fundición, se debe tomar en cuenta las variables que afectan a la pieza (contracciones, rechupes) ya que estos afectan directamente a las propiedades mecánicas de la pieza final fundida.

Al momento de trabajar con la mezcla de yeso y arena de sílice procurar hacerlo cuidadosamente para mantener pegados los canales de entrada y la mazarota.

Es recomendable poner el molde en dirección para abajo al momento de fundir el material plástico, para asegurar que no queden residuos al momento de verter el metal fundido.

Con respecto a las porosidades y rechupes generados en los impeller fundidos con aluminio, se recomienda al momento de sumergir el modelo impreso dentro de la mezcla (Arena de sílice y yeso) y aplicar vibración sobre la base para que distribuya de mejor manera.

Se recomienda utilizar rellenos tipo triángulos con una densidad del 20 %, ya que es suficiente para resistir la presión que ejerce la arena o yeso sobre el modelo impreso, además esto garantiza que el material se descomponga en el tiempo y la temperatura indicada en el análisis termogravimétrico que se presentó en los resultados.

Se debe tomar en cuenta el sobredimensionamiento de la pieza que se desea fabricar, en base a el coeficiente de contracción por solidificación de acuerdo al material que se

utilice para la fundición, los valores ya están estandarizados, además del valor de contracción del material plástico con el cual se va a imprimir el modelo, en esta investigación se deja en constancia los valores utilizados de acuerdo a las combinaciones de materiales.

BIBLIOGRAFÍA

- A. Chauraya, W. W. (2013). *Inkjet printed dipole antennas on textiles for wearable communications, IET Microw.*
- Asociación Española de Tecnologías de Fabricación Aditiva y 3D . (24 de 10 de 2019). *ADDIMAT*. Obtenido de www.addimat.es/index-es.html
- Association, A. F. (1994). *Cast Metals Handbook*.
- Bilgin MS, B. E. (2016). *A review of computer-aided design/computer-aided manufacture techniques for removable denture fabrication.*
- Breuer, P., & Lano, K. (1991). Creating Specification From Code: Reverse-Engineering Techniquew. *Journal of Sofmare Muintenance*, 145-162.
- Chauraya, A., Whittow, J., Vardaxoglou, Y., Torah, R., Yang, S., Beedy, J., & Tudor, I. (2013). Inkjet printed dipole atennas on textiles for wearable communications . *IET Microw Atennas Propag* , 760-767.
- Custompart.Net. (12 de 02 de 2008). *Selective Laser Sibtering*. Obtenido de Processes: <http://www.custompartnet.com/wu/selective-laser-sintering>
- Einscan . (12 de 12 de 2019). *Solid edge Shining 3D Edition* . Obtenido de Shaping the future : <https://www.einscan.com/einscan-software/solid-edge-shining-3d-edition-2/>
- Kalpakjian, S., & Schmid, S. (2008). *Manufactura, ingeniería y tecnología*. Mexico: Pearson Educacion.
- Kalpakjian, S., & Schmid, S. (2008). *Manufactura, ingeniería y tecnología*. México: Pearson Educación.
- Macas Montaña, C. a. (2016). *Construcción de un modelo de fundición mediante la utilización de tecnología de impresión 3d*. Riobamba.
- Macas, C., & Pilco, K. (2016). *Construcción de un modelo de fundición mediante la utilización de tecnología de impresión 3d*. Riobamba: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
- Prithviraj, D., Bhalla, H., Vashisht, R., Sounderraj, K., & Prithvi, S. (2014). Revolutionizing restorative dentistry: an overview. *J Indian Prosthodont Soc. Journal Indian prosthodont Son*, 333-43.
- Sitver, M. (2014). *3D Printing in Under 1000 Words*. Nueva York, Estados Unidos

Superintendencia de Compañías, V. y. (2017). *Estudios Sectoriales*. Guayaquil.

Ultimaker . (18 de 02 de 2011). *Fabricantes reconocidos de impresoras 3D profesionales con sistema fused Deposition Modeling*. . Obtenido de Impresoras : <https://ultimaker.com/>

Ultimaker . (2017). Ficha de datos técnicos PLA . *PLA Ultimaker* , 1-3.

ULTIMAKER. (8 de 12 de 2019). *ULTIMAKER*. Obtenido de ultimaker.com/download/67541/TDS%20Nylon%20v3.011-spa-ES.pdf

ULTIMAKER. (5 de 11 de 2019). *ULTIMAKER*. Obtenido de ultimaker.com/es/3d-printers/ultimaker-3

ULTIMAKER. (22 de 12 de 2019). *ULTIMAKER*. Obtenido de ultimaker.com/download/67583/TDS%20PLA%20v3.011-spa-ES.pdf

Ultimaker. (25 de 9 de 2019). *Ultimaker* . Obtenido de ultimaker.com/download/67619/TDS%20ABS%20v3.011-spa-ES.pdf

Unibertsitatea, Universidad del País Vasco – Euskal Herriko. (s.f.). Obtenido de http://www.ehu.eus/manufacturing/docencia/709_ca.pdf

APÉNDICES

APÉNDICE A

Experimento 1



Figura 4.1 Moldeo en arena [Elaboración propia]



Figura 4.2 Cierre del molde de arena [Elaboración propia]



Figura 4.3 Fundición del metal Bronce [Elaboración propia]



Figura 4.4 Vertimiento de la colada fundida [Elaboración propia]



Figura 4.5 Modelo de impeller cerrado [Elaboración propia]

APÉNDICE B

Experimento 2



Figura 4.6 Impeller impreso en 3D [Elaboración propia]



Figura 4.7 Colocación del vertedero y mazarota [Elaboración propia]



Figura 4.8 Molde final en yeso [Elaboración propia]



Figura 4.9 Solidificación del metal fundido [Elaboración propia]



Figura 4.10 Retiro de exceso de yeso [Elaboración propia]



Figura 4.11 Pieza fundida [Elaboración propia]

APÉNDICE C

Experimento 3



Figura 4.12 Modelo impreso en 3D [Elaboración propia]



Figura 4.13 Estufa horno de sinterización [Elaboración propia]



Figura 4.14 Molde elaborado con yeso [Elaboración propia]



Figura 4.15 Cristalización del molde por transferencia de calor [Elaboración propia]

APÉNDICE D

Experimento 4



Figura 4.16 Modelo CAD impeller [Elaboración propia]



Figura 4.17 Proceso de derretimiento del material plástico [Elaboración propia]



Figura 4.18 Vaciado del Metal fundido [Elaboración propia]



Figura 4.19 Impeller Fundido [Elaboración propia]



Figura 4.20 Impeller Maquinada [Elaboración propia]

APÉNDICE F

ASTM E10

ASTM E10 - 12

TABLE X1.1 Continued

Diameter of Indentation, d (mm)				Brinell Hardness Number							
10 mm ball	5 mm ball	2.5 mm ball	1 mm ball	HBW 10/3000 HBW 5/750 HBW 2.5/187.5 HBW 1/50	HBW 10/1500	HBW 10/1000 HBW 5/250 HBW 2.5/62.5 HBW 1/10	HBW 10/500 HBW 5/125 HBW 2.5/31.25 HBW 1/5	HBW 10/250 HBW 5/62.5 HBW 2.5/15.625 HBW 1/2	HBW 10/125 HBW 5/31.25 HBW 2.5/7.8125 HBW 1/1.25	HBW 10/100 HBW 5/25 HBW 2.5/6.25 HBW 1/1	
2.51	1.255	0.6275	0.251	587	598	199	99.4	49.7	24.9	19.9	
2.52	1.260	0.6300	0.252	592	596	197	98.6	49.3	24.7	19.7	
2.53	1.265	0.6325	0.253	587	594	196	97.8	48.9	24.5	19.6	
2.54	1.270	0.6350	0.254	582	591	194	97.1	48.5	24.3	19.4	
2.55	1.275	0.6375	0.255	578	589	193	96.3	48.1	24.1	19.3	
2.56	1.280	0.6400	0.256	573	587	191	95.5	47.8	23.9	19.1	
2.57	1.285	0.6425	0.257	569	584	190	94.8	47.4	23.7	19.0	
2.58	1.290	0.6450	0.258	564	582	188	94.0	47.0	23.5	18.7	
2.59	1.295	0.6475	0.259	560	580	187	93.3	46.6	23.3	18.5	
2.60	1.300	0.6500	0.260	555	578	185	92.6	46.3	23.1	18.4	
2.61	1.305	0.6525	0.261	551	576	184	91.8	45.9	22.8	18.2	
2.62	1.310	0.6550	0.262	547	573	182	91.1	45.6	22.6	18.1	
2.63	1.315	0.6575	0.263	543	571	181	90.4	45.2	22.4	17.9	
2.64	1.320	0.6600	0.264	538	569	179	89.7	44.9	22.2	17.8	
2.65	1.325	0.6625	0.265	534	567	178	89.0	44.5	22.0	17.7	
2.66	1.330	0.6650	0.266	530	565	177	88.4	44.2	21.8	17.5	
2.67	1.335	0.6675	0.267	526	563	175	87.7	43.8	21.6	17.4	
2.68	1.340	0.6700	0.268	522	561	174	87.0	43.5	21.4	17.3	
2.69	1.345	0.6725	0.269	518	559	173	86.4	43.2	21.2	17.1	
2.70	1.350	0.6750	0.270	514	557	171	85.7	42.9	21.0	17.0	
2.71	1.355	0.6775	0.271	510	555	170	85.1	42.5	20.8	16.9	
2.72	1.360	0.6800	0.272	507	553	169	84.4	42.2	20.6	16.8	
2.73	1.365	0.6825	0.273	503	551	168	83.8	41.9	20.4	16.6	
2.74	1.370	0.6850	0.274	499	549	166	83.2	41.6	20.2	16.5	
2.75	1.375	0.6875	0.275	495	548	165	82.6	41.3	20.0	16.4	
2.76	1.380	0.6900	0.276	492	546	164	81.9	41.0	19.8	16.3	
2.77	1.385	0.6925	0.277	488	544	163	81.3	40.7	19.6	16.2	
2.78	1.390	0.6950	0.278	485	542	162	80.8	40.4	19.4	16.0	
2.79	1.395	0.6975	0.279	481	540	160	80.2	40.1	19.2	15.9	
2.80	1.400	0.7000	0.280	477	539	159	79.6	39.8	19.0	15.8	
2.81	1.405	0.7025	0.281	474	537	158	79.0	39.5	18.8	15.7	
2.82	1.410	0.7050	0.282	471	535	157	78.4	39.2	18.6	15.6	
2.83	1.415	0.7075	0.283	467	534	156	77.9	38.9	18.4	15.5	
2.84	1.420	0.7100	0.284	464	532	155	77.3	38.7	18.2	15.4	
2.85	1.425	0.7125	0.285	461	530	154	76.8	38.4	18.0	15.2	
2.86	1.430	0.7150	0.286	457	529	152	76.2	38.1	17.8	15.1	
2.87	1.435	0.7175	0.287	454	527	151	75.7	37.8	17.6	15.0	
2.88	1.440	0.7200	0.288	451	525	150	75.1	37.6	17.4	14.9	
2.89	1.445	0.7225	0.289	448	524	149	74.6	37.3	17.2	14.8	
2.90	1.450	0.7250	0.290	444	522	148	74.1	37.0	17.0	14.7	
2.91	1.455	0.7275	0.291	441	521	147	73.6	36.8	16.8	14.6	
2.92	1.460	0.7300	0.292	438	519	146	73.0	36.5	16.6	14.5	
2.93	1.465	0.7325	0.293	435	518	145	72.5	36.3	16.4	14.4	
2.94	1.470	0.7350	0.294	432	516	144	72.0	36.0	16.2	14.3	
2.95	1.475	0.7375	0.295	429	515	143	71.5	35.8	16.0	14.2	
2.96	1.480	0.7400	0.296	426	513	142	71.0	35.5	15.8	14.1	
2.97	1.485	0.7425	0.297	423	512	141	70.5	35.3	15.6	14.0	
2.98	1.490	0.7450	0.298	420	510	140	70.1	35.0	15.4	13.9	
2.99	1.495	0.7475	0.299	417	509	139	69.6	34.8	15.2	13.8	
3.00	1.500	0.7500	0.300	415	507	138	69.1	34.6	15.0	13.7	
3.01	1.505	0.7525	0.301	412	506	137	68.6	34.3	14.8	13.6	
3.02	1.510	0.7550	0.302	409	505	136	68.2	34.1	14.6	13.5	
3.03	1.515	0.7575	0.303	406	503	135	67.7	33.9	14.4	13.4	
3.04	1.520	0.7600	0.304	404	502	135	67.3	33.6	14.2	13.3	
3.05	1.525	0.7625	0.305	401	500	134	66.8	33.4	14.0	13.2	
3.06	1.530	0.7650	0.306	398	499	133	66.4	33.2	13.8	13.1	
3.07	1.535	0.7675	0.307	395	498	132	65.9	33.0	13.6	13.0	
3.08	1.540	0.7700	0.308	393	496	131	65.5	32.7	13.4	12.9	
3.09	1.545	0.7725	0.309	390	495	130	65.0	32.5	13.2	12.8	
3.10	1.550	0.7750	0.310	388	494	129	64.6	32.3	13.0	12.7	
3.11	1.555	0.7775	0.311	385	493	128	64.2	32.1	12.8	12.6	
3.12	1.560	0.7800	0.312	383	491	127	63.8	31.9	12.6	12.5	
3.13	1.565	0.7825	0.313	380	490	126	63.3	31.7	12.4	12.4	
3.14	1.570	0.7850	0.314	378	489	126	62.9	31.5	12.2	12.3	
3.15	1.575	0.7875	0.315	375	488	125	62.5	31.3	12.0	12.2	
3.16	1.580	0.7900	0.316	373	486	124	62.1	31.1	11.8	12.1	
3.17	1.585	0.7925	0.317	370	485	123	61.7	30.9	11.6	12.0	
3.18	1.590	0.7950	0.318	368	484	123	61.3	30.7	11.4	11.9	
3.19	1.595	0.7975	0.319	366	483	122	60.9	30.5	11.2	11.8	
3.20	1.600	0.8000	0.320	363	482	121	60.5	30.3	11.0	11.7	

Copyright by ASTM Int'l (all rights reserved); Wed Aug 22 13:13:32 EDT 2012 17
 Downloaded/printed by
 Universidade Federal de Sao Carlos pursuant to License Agreement. No further reproductions authorized.

Figura 4.24 Ensayos con Norma ASTM E10 [Norma ASTM E10-12]