



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

“DISEÑO DE UN MÉTODO DE EXTRACCIÓN DEL MODELO POLIMÉRICO EN MOLDES DE ARENA QUE PERMITA OPTIMIZAR EL TIEMPO Y ACABADO SUPERFICIAL EN FUNDICIONES DE ALUMINIO”

AQUILES SANTIAGO REYES ROMO

Trabajo de Titulación modalidad Proyectos de Investigación y Desarrollo, presentado ante el Instituto de Posgrado y Educación Continua de la ESPOCH, como requisito parcial para la obtención del grado de:

MAGISTER EN DISEÑO MECÁNICO

Riobamba - Ecuador

Junio 2021

©2021, Aquiles Santiago Reyes Romo

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

CERTIFICACIÓN

EL TRIBUNAL DE TRABAJO DE TITULACIÓN CERTIFICA QUE:

El Trabajo de Titulación modalidad Proyectos de Investigación y Desarrollo, titulado “DISEÑO DE UN MÉTODO DE EXTRACCIÓN DEL MODELO POLIMÉRICO EN MOLDES DE ARENA QUE PERMITA OPTIMIZAR EL TIEMPO Y ACABADO SUPERFICIAL EN FUNDICIONES DE ALUMINIO”, de responsabilidad del Sr. Aquiles Santiago Reyes Romo ha sido prolijamente revisado y se autoriza su presentación.

Tribunal:

Ing. Luis Eduardo Hidalgo Almeida; PhD

PRESIDENTE

LUIS
EDUARDO
HIDALGO
ALMEIDA

Firmado digitalmente por LUIS
EDUARDO HIDALGO ALMEIDA
Nombre de reconocimiento (DN): cn=EC,
o=BANCO CENTRAL DEL ECUADOR,
ou=ENTIDAD DE CERTIFICACION DE
INFORMACION-ECIBCE, l=QUITO,
serialNumber=0000445780, cn=LUIS
EDUARDO HIDALGO ALMEIDA
Fecha: 2021.06.29 15:33:04 -05'00'

FIRMA

Ing. Jorge Isaías Caicedo Reyes; Mag.

DIRECTOR

Firmado electrónicamente por:
**JORGE ISAIAS
CAICEDO REYES**

FIRMA

Ing. Edison Patricio Abarca Pérez; Mag.

MIEMBRO

Firmado digitalmente
por EDISON PATRICIO
ABARCA PEREZ
DN: cn=EDISON PATRICIO
ABARCA PEREZ c=EC,
o=SECURITY DATA S.A., 1
ou=ENTIDAD DE
CERTIFICACION DE
INFORMACION
Motivo: Soy el autor de este
documento
Ubicaci:R:
Fecha: 2021-06-28 22:33-05:00

FIRMA

Ing. Edwin Fernando Viteri Núñez; Mag.

MIEMBRO

Firmado
digitalmente por
EDWIN FERNANDO
VITERI NUNEZ
Fecha: 2021.06.29
08:05:16 -05'00'

FIRMA

Riobamba, junio 2021

DERECHOS INTELECTUALES

Yo, AQUILES SANTIAGO REYES ROMO, declaro que soy responsable de las ideas, doctrinas y resultados expuestos en el **Trabajo de Titulación modalidad Proyectos de Investigación y Desarrollo**, y que el patrimonio intelectual generado por la misma pertenece exclusivamente a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

AQUILES
SANTIAGO
REYES ROMO

Firmado digitalmente por AQUILES
SANTIAGO REYES ROMO
DN: cn=AQUILES SANTIAGO REYES
ROMO c=EC o=SECURITY DATA
S.A. 2 ou=ENTIDAD DE
CERTIFICACION DE INFORMACION
Motivo:He revisado este documento
Ubicación:
Fecha:2021-06-29 21:07-05:00

AQUILES SANTIAGO REYES ROMO

C.I. 0603450214

Yo, AQUILES SANTIAGO REYES ROMO, declaro que el presente **Trabajo de Titulación modalidad Proyectos de Investigación y Desarrollo**, es de mi autoría y que los resultados del mismo son auténticos y originales. Los textos constantes en el documento que provienen de otra fuente están debidamente citados y referenciados.

Como autor asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este proyecto de investigación de maestría.

Riobamba, junio 2021

**AQUILES
SANTIAGO
REYES ROMO**

Firmado digitalmente porAQUILES
SANTIAGO REYES ROMO
DN: cn=AQUILES SANTIAGO REYES
ROMO, c=E C o=SECURITY DATA S.A.
2 ou=ENTIDAD DE CERTIFICACION
DE INFORMACION
Motivo:He revisado este documento
Ubicación:
Fecha:2021-06-29 21:07-05:00

AQUILES SANTIAGO REYES ROMO
C.I. 0603450214

DEDICATORIA

A Marianita y Manuel mis padres.

A Rosy, Paulo, Manuel y María mis hermanos.

A mi familia que es mi motor principal.

Santiago

AGRADECIMIENTO

A Dios por permitirme culminar este logro, ya que sin el nada sería posible.

A mi tutor y miembros del tribunal por su guía en todas las instancias de este camino.

A mis amigos de Carrera que me brindaron su apoyo Luis y Daniel

Santiago

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	XV
ABSTRACT.....	XVI

CAPÍTULO I

1.	INTRODUCCIÓN	1
1.1.	Planteamiento del problema.....	1
1.2.	Situación problemática.	1
1.3.	Formulación del problema	2
1.4.	Preguntas directrices o específicas de la investigación	2
1.5.	Justificación de la investigación	3
1.6.	Objetivo general de investigación	3
1.7.	Objetivos específicos de investigación.....	4
1.8.	Hipótesis.....	4
1.8.1.	<i>Hipótesis general</i>	4
1.8.2.	<i>Hipótesis específicas</i>	4

CAPÍTULO II

2.	MARCO TEÓRICO	5
2.1.	Antecedentes del problema.....	5
2.2.	Bases teóricas.....	5
2.2.1.	<i>Arena</i>	5
2.2.1.1.	<i>Arenas de moldeo</i>	5
2.2.2.	<i>Modelos para la fundición</i>	16
2.2.3.	<i>Impresión 3D</i>	16
2.2.3.1.	<i>Tipos de materiales para impresión 3D</i>	17
2.2.4.	<i>Desintegración térmica, química de polímeros utilizados para impresión 3D</i>	21
2.2.5.	<i>Caja de moldeo</i>	23
2.2.6.	<i>Horno de crisol</i>	24
2.2.7.	<i>Mufla</i>	24
2.2.8.	<i>Fundentes</i>	25
2.2.9.	<i>Aluminio</i>	28
2.2.10.	<i>Velocidad de vertido de un metal fundido</i>	28

2.2.11.	<i>Gasto volumétrico.</i>	29
2.2.12.	<i>Tiempo requerido para llenar la cavidad de un molde.</i>	29
2.2.13.	<i>Solidificación de los metales.</i>	29
2.2.14.	<i>Tiempo de solidificación.</i>	30
2.2.15.	<i>Contracción.</i>	31
2.2.16.	<i>Diseño de la mazarota.</i>	32
2.2.17.	<i>Defectos de fundición.</i>	33
2.2.18.	<i>Acabado superficial.</i>	34

CAPÍTULO III

3.	METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	38
3.1.	Métodos de investigación	38
3.1.1.	<i>Modelado del prototipo y análisis de los materiales para la impresión 3D.</i>	39
3.1.1.1.	<i>Modelado del prototipo.</i>	39
3.1.1.2.	<i>Análisis de los materiales para la impresión 3D.</i>	40
3.1.2.	<i>Selección del tipo de polímero para la impresión del elemento o modelo.</i>	41
3.1.3.	<i>Impresión del elemento o modelo haciendo uso de una impresora Anet A8.</i>	42
3.1.4.	<i>Aplicación del químico reaccionante, en la superficie del modelo polimérico.</i>	43
3.1.5.	<i>Diseño de la mazarota.</i>	43
3.1.6.	<i>Diseño del canal de alimentación.</i>	44
3.1.7.	<i>Preparación de la arena para la fundición.</i>	45
3.1.8.	<i>Cálculo previo al proceso de fundición.</i>	54
3.1.9.	<i>Determinación de temperaturas para la extracción del modelo polimérico.</i>	57
3.1.10.	<i>Fundición del aluminio.</i>	59

CAPÍTULO IV

4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	64
4.1.	Resultados	64
4.2.	Discusión	69
4.2.1.	<i>Diferencia de tiempos y costos, entre el método tradicional e innovador.</i>	69
	CONCLUSIONES	77
	RECOMENDACIONES	78

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-2: Composición química óptima de la arena para moldeo.....	6
Tabla 2-2: Análisis químico de la Bentonita cálcica	7
Tabla 3-2: Distribución granulométrica	9
Tabla 4-2: Índice AFS (tamaño de granos)	11
Tabla 5-2: Datos técnicos del ABS	18
Tabla 6-2: Datos técnicos del PETG	20
Tabla 7-2: Características biodegradables de la fibra	21
Tabla 8-2: Rangos típicos de aplicación de fundentes	27
Tabla 9-2: Defectos de fundición	33
Tabla 10-2: Rugosidad superficial de acuerdo a diferentes métodos de fabricación	36
Tabla 11-2: Valores de rugosidad Ra	37
Tabla 1-3: Pasos para el diseño del método innovador.....	38
Tabla 2-3: Fases de la investigación.....	39
Tabla 3-3: Rangos térmicos resumidos de cada polímero utilizado para impresión 3D	41
Tabla 4-3: Consideraciones de selección del material	41
Tabla 5-3: Datos obtenidos	46
Tabla 6-3: Valores obtenidos en cada ensayo.....	50
Tabla 7-3: Características y propiedades de las tierras de moldeo.....	50
Tabla 8-3: Composición de la arena utilizada para el molde	52
Tabla 1-4: Estudio experimental N°1	64
Tabla 2-4: Estudio experimental N°2.....	65
Tabla 3-4: Estudio experimental N°3	66
Tabla 4-4: Valores obtenidos en la hélice del estudio experimental N°2	68
Tabla 5-4: Valores obtenidos en la hélice del estudio experimental N°3	69
Tabla 6-4: Comparación de tiempos de acuerdo al tipo de proceso.....	72
Tabla 7-4: Diferencia de costos de cada proceso.....	73
Tabla 8-4: Análisis de tiempos y costos	74
Tabla 9-4: Comparación de rugosidades teóricas vs obtenidas.....	75

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-2: Arena de sílice.....	6
Figura 2-2: Bentonita cálcica.....	7
Figura 3-2: Formas de granos.....	9
Figura 4-2: Tamices.....	10
Figura 5-2: Herramientas para ensayos de corte y compresión.....	14
Figura 6-2: Modelo de madera.....	16
Figura 7-2: Impresora 3D Anet A8.....	17
Figura 8-2: Cloro.....	22
Figura 9-2: Cloroformo.....	23
Figura 10-2: Caja porta molde.....	24
Figura 11-2: Horno estático de crisol.....	24
Figura 12-2: Mufla.....	25
Figura 13-2: Oxide Removal Flux.....	25
Figura 14-2: Desescoriante.....	26
Figura 15-2: Bórax.....	26
Figura 16-2: Agente de cubierta de aislamiento modelo 66SF.....	26
Figura 17-2: Fundente de desgasificación y refinación (Refining Flux).....	27
Figura 18-2: Curva de enfriamiento para un metal puro durante la fundición.....	30
Figura 19-2: Contracción de un fundido cilíndrico durante la solidificación y enfriamiento.....	31
Figura 20-2: Contracción volumétrica para distintos metales.....	32
Figura 21-2: Imperfecciones y desviaciones de rugosidad.....	34
Figura 22-2: Instrumentos para determinar la rugosidad.....	35
Figura 1-3: Modelado Hélice en SolidWorks.....	40
Figura 2-3: Adecuación de la hélice en el software de impresión 3D.....	40
Figura 3-3: Tiempos de impresión.....	42
Figura 4-3: Impresión de hélice en PLA.....	42
Figura 5-3: Aplicación de Cloroformo.....	43
Figura 6-3: Altura disponible para el diseño de la mazarota.....	44
Figura 7-3: Dimensiones del canal de alimentación.....	45
Figura 8-3: Ensayo de granulometría.....	45
Figura 9-3: Ensayo de compresión.....	48
Figura 10-3: Ensayo de corte.....	49
Figura 11-3: Ensayo de corte.....	51
Figura 12-3: Materiales para la fundición.....	53
Figura 13-3: Caja porta molde (16x16x15) cm.....	53

Figura 14-3: Elaboración de molde de arena.....	54
Figura 15-3: Liberación del cubo de la caja para la fundición	57
Figura 16-3: Inserción del modelo polimérico en la mufla	58
Figura 17-3: Sección transversal del molde.	58
Figura 18-3: Proceso de descomposición del modelo polimérico	59
Figura 19-3: Peso del lingote de aluminio.....	59
Figura 20-3: Extracción del molde de la mufla	61
Figura 21-3: Aluminio fundido	62
Figura 22-3: Vertido del aluminio en el molde	62
Figura 23-3: Liberación de la hélice fundida	63
Figura 1-4: Pieza fundida con partes incompletas	64
Figura 2-4: Pieza fundida con imperfecciones	65
Figura 3-4: Pieza fundida de calidad.....	66
Figura 4-4: Acabado superficial obtenido	67
Figura 5-4: Medición de rugosidad de cada alabe de las hélices fundidas	67
Figura 6-4: Superficie frontal.....	68
Figura 7-4: Superficie posterior	68
Figura 8-4: Superficie frontal.....	69
Figura 9-4: Superficie posterior	69
Figura 10-4: Pasos de producción en una operación típica de fundición en arena.....	70
Figura 11-4: Pasos descartados por método innovador respecto al método tradicional.....	71
Figura 12-4: Pieza final obtenida	73
Figura 13-4: Valores de rugosidad superficial	76

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A. Proforma de fabricación de una hélice en centro de mecanizado CNC H-630

ANEXO B Fundición aplicando el método tradicional

ANEXO C Acabado superficial

ÍNDICE DE ABREVIACIONES

ABS	Acrilonitrilo Butadieno Estireno
AFS	American Foundry Society (Sociedad Americana de la Fundición)
CAD	Diseño asistido por computadora
CAM	Manufactura asistida por computadora
CAE	Ingeniería asistida por computadora
CNC	Control Numérico por Computadora
PETG	Tereftalato de Polietileno Glicolizado
PLA	Ácido Poliláctico
DCL	Diagrama de cuerpo libre
ISO	Asociación Internacional de Normalización
GPS	Geometrical Product Specifications (Especificaciones Geométricas de Producto)

RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo diseñar un método de extracción del modelo polimérico en moldes de arena que permita optimizar el tiempo y acabado superficial en fundiciones de aluminio, evitando el mecanizado final ya que las piezas fundidas por los métodos tradicionales, obligatoriamente requieren un mecanizado final, debido a que presentan imperfecciones de fundición como, proyecciones metálicas, cavidades, discontinuidades, superficie defectuosa, fundición incompleta, dimensiones o formas incorrectas, inclusiones. El estudio se desarrolló usando una investigación aplicada, por lo que se inició con la modelación e impresión en 3D de una turbina de seis hélices en material polimérico ácido poliláctico (PLA), a la cual se aplicó una cantidad de cloroformo proporcional a su volumen de aproximadamente 0.5 mm, para obtener un resultado aceptable. Luego este fue introducido y cubierto con una mezcla de arena sílice y bentonita en la caja de moldeo, una vez seca la mezcla, el bloque compacto se insertó en la mufla donde fue sometido a temperaturas variables hasta alcanzar 300°C, en un tiempo de 150 minutos, temperatura a la cual se desintegró el modelo polimérico quedando la cavidad hueca del molde, en la cual se vertió el aluminio fundido a 800°C dejando solidificarse completamente, por último se liberó la turbina fundida, luego de una breve limpieza manual, se realizó los ensayos de acabado superficial a las probetas, obteniendo como resultado una rugosidad de $2.557\mu m$, la cual es muy superior a la obtenida con el método tradicional de $9.18\mu m$, con una diferencia notable de tiempo empleado en el proceso de 20.45h en la obtención del modelo y con un ahorro de 235\$ en el costo de fabricación entre el método tradicional y método innovador propuesto.

PALABRAS CLAVE: <DISEÑO MECÁNICO>, <MECANIZADO>, <PROYECCIONES METÁLICAS>, <IMPRESIÓN 3D>, <CLOROFORMO>, <MODELO POLIMÉRICO>, <RUGOSIDAD>

LUIS ALBERTO
CAMINOS
VARGAS

Firmado digitalmente por LUIS
ALBERTO CAMINOS VARGAS
Nombre de reconocimiento
(DN): c=EC, l=RIOBAMBA,
serialNumber=0602766974,
cn=LUIS ALBERTO CAMINOS
VARGAS
Fecha: 2021.06.09 16:01:22
-05'00'



0075-DBRAI-UPT-IPEC-2021

ABSTRACT

The aim of this master's degree work is to design a method of extracting the polymer model in sand molds to optimize the time and surface finish in aluminium castings, avoiding final machining since the pieces melted by traditional methods, necessarily require a final machining because they present imperfections of casting such as, metal projections, cavities, discontinuities, faulty surface, incomplete casting, incorrect dimensions or shapes, inclusions. The study was developed using applied research, so it began with the modeling and 3D printing of a six-helix turbine in polymeric material polylactic acid (PLA), to which an amount of chloroform proportional to its volume of approximately 0.5 mm was applied, to obtain an acceptable result. Then this was introduced and covered with a mixture of silica sand and bentonite in the molding box, once the mixture was dried, the compact block was inserted into the muffle where it was subjected to variable temperatures until reaching 300 ° C, in a time of 150 minutes, temperature at which the polymeric model disintegrated leaving the hollow cavity of the mold. The molten aluminum was poured at 800 ° C allowing to solidify completely, finally the molten turbine was released, after a brief manual cleaning, the surface finish tests were carried out to the specimens. resulting in a roughness of 2.557µm, which is much higher than that obtained with the traditional 9.18µm method, with a significant difference in time spent in the 20.45h process in obtaining the model and with a savings of \$235 in the cost of manufacturing between the traditional method and the proposed innovative method.

KEYWORDS: <MACHINING>, <METALLIC PROJECTIONS>, <PRINTING (3D)>, <CHLOROFORM>, <POLYMERIC MODEL>, <ROUGHNESS>

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

Generar piezas con relativa complejidad, mediante un proceso de fundición en arena convencional, resulta tedioso, desde la creación del modelo hasta la obtención del mismo, ya que este proceso requiere una inversión de tiempo considerable. Una vez obtenido el elemento el paso final es el mecanizado del mismo y si el elemento es de geometría compleja, mecanizarlo resulta muy laborioso, porque presenta imperfecciones tales como, rebabas, chupaduras, malas formaciones, porosidad, mal acabado superficial, grietas, entre otros, en consecuencia de todos estos factores, hace que a este proceso le falte precisión. (Kalpakjian, 2002).

El presente estudio tiene como objetivo diseñar un método de extracción del modelo polimérico en moldes de arena que permita optimizar el tiempo y acabado superficial en fundiciones de aluminio, el modelo polimérico será obtenido a partir del modelado e impresión 3D, esto representa un ahorro considerable de tiempo en su obtención y posterior a esto, se estudiara los parámetros más eficientes de mezclas químicas y de temperatura para la obtención de un buen acabado superficial del elemento en cuestión.

1.1. Planteamiento del problema

El proceso tradicional de fundición, incurre en la obtención de elementos fundidos defectuosos, mismos que presentan características como rebabas, proyecciones metálicas, cavidades, discontinuidades, superficies defectuosas, fundición incompleta, formas incorrectas, inclusiones, por tanto dichos elementos obtenidos deben obligatoriamente ser sometidos a un mecanizado, este resulta tedioso ya que mecanizar un elemento conlleva un empleo considerable de tiempo y peor aún si la producción es en serie, ya que se debe conseguir un elemento final de calidad.

1.2. Situación problemática.

El moldeo por fundición para la fabricación de piezas metálicas y de plástico se desarrolla a partir de la fundición de un material y posteriormente este es vertido en la cavidad del molde de arena el cual es diseñado con su respectivo modelo.

El modelo en arena es diseñado con los cálculos respectivos previos, para el diseño del bebedero, canales de alimentación, salida de gases y mazarota para garantizar una buena calidad del elemento fundido. (Kalpakjian, 2002)

Una vez realizado todo este proceso, el paso final es liberar al elemento fundido del molde, el mismo que al ser liberado presenta defectos de fundición como, rebabas mal acabado superficial debido a porosidades, rechupes, sopladuras, grietas y malas formaciones del elemento debido a llenados incompletos. La obtención de elementos con geometría relativamente compleja mediante fundiciones en arena, resulta una tarea laboriosa y a veces muy complicada, además que se debe invertir un tiempo considerable, desde la fabricación del modelo hasta el desarrollo mismo del proceso de fundición. En cambio, los otros procesos disponibles en el mercado, tales como el mecanizado CNC, que sirve para obtener piezas de elevada complejidad y excelente acabado superficial en el elemento, requiere una inversión económica considerable, por tal razón es imperioso investigar y desarrollar métodos que permitan obtener elementos complejos y de buen acabado en el menor tiempo posible y a bajo costo.

1.3. Formulación del problema

¿Es posible corregir los defectos que se obtienen en las piezas fundidas con geometría relativamente compleja, mediante el diseño de un método de extracción del modelo polimérico en fundiciones en arena, que permita optimizar el acabado superficial y el tiempo de obtención a un bajo costo?

1.4. Preguntas directrices o específicas de la investigación

¿Para qué sirve la investigación?

Esta investigación sirve para optimizar el tiempo de fabricación y acabado superficial de elementos obtenidos a través de fundiciones en arena, a un bajo costo.

¿Qué resultados se esperan obtener?

Se espera obtener una pieza fundida en arena, minimizando defectos y evitando así dar acabados manuales como limpieza de rebabas, corte y pulido.

Además, se espera optimizar el tiempo de fabricación del elemento obtenido mediante fundición en arena.

¿Quién o quiénes son los beneficiarios?

Los beneficiarios son las industrias, los centros de investigación que se dedican al estudio de nuevos métodos y a la fabricación en serie de distintos elementos, que posterior a esto se inserten en la sociedad para que sean utilizados en diversos usos.

¿Por qué es importante la investigación?

La presente investigación es de mucha importancia, ya que minimiza los defectos y optimiza el tiempo de fabricación y costos de un producto.

¿Cuáles son los aportes de trascendencia que dejara?

Un nuevo método de fabricación por moldeo, más preciso y rápido que el tradicional.

1.5. Justificación de la investigación

Las piezas que se obtienen por fundición tradicional presentan defectos que afectan su apariencia debido a factores como: técnicas de procesamiento, diseño de las piezas y materiales, en una fundición se pueden generar algunos tipos de defectos como, proyecciones metálicas, rebabas, inclusiones de arena en las superficies como se detalla en la Tabla 9-2, estas piezas necesitan obligatoriamente un mecanizado final y llevar a cabo este proceso resulta tedioso, ya que demanda un empleo considerable de tiempo hasta llegar a obtener una geometría de óptima calidad. (Smith, 2006)

En vista de esta situación, el presente trabajo de investigación busca innovar el diseño de un método de extracción del modelo polimérico en moldes de arena que permita optimizar el tiempo y acabado superficial en fundiciones de aluminio.

1.6. Objetivo general de investigación

Diseñar un método de extracción del modelo polimérico en moldes de arena, que permita optimizar el tiempo y acabado superficial en fundiciones de aluminio.

1.7. Objetivos específicos de investigación

- Seleccionar el polímero a ser usado para imprimir el modelo, mediante el análisis de sus características térmicas que permita determinar cuál ofrece la mayor factibilidad para su extracción del molde de arena.
- Analizar químicos reaccionantes que faciliten la desintegración química y térmica, en los materiales poliméricos utilizados en impresión 3D, mediante estudios previos.
- Determinar la temperatura idónea mediante ensayos para la óptima extracción del modelo polimérico.
- Analizar las diferencias entre el proceso convencional de fundiciones en arena y el proceso mediante la extracción del modelo polimérico a través de datos registrados y los datos obtenidos en este trabajo, para validar su eficiencia.

1.8. Hipótesis

1.8.1. Hipótesis general

El diseño de un método de extracción del modelo polimérico en moldes de arena permite optimizar el tiempo y acabado superficial en fundiciones de aluminio.

1.8.2. Hipótesis específicas

El diseño del método de extracción del modelo polimérico, evita el tiempo de mecanizado del elemento fundido.

El grado del acabado superficial de un elemento fundido, depende del estudio óptimo del diseño del método de extracción del modelo polimérico.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes del problema

La fundición tradicional, es una técnica metalúrgica una de las más antiguas en el mundo, cuyo proceso consiste en fundir un material cualquiera como el aluminio cuyo grado de fundición es de 660.3°C, el material pasa de un estado sólido a un estado líquido, el mismo que es vertido en un molde de arena y al enfriarse se solidifica tomando la forma de la cavidad interna diseñada. (Kalpakjian, 2002)

Una vez liberado el elemento del molde de arena, presenta defectos geométricos, ocasionados por factores durante la fundición. Por ello el moldeo en arena es un método que carece de precisión y el paso final es mecanizar con herramientas manuales al elemento, hasta obtener una pieza con geometría de buena calidad, este proceso resulta muy laborioso y tedioso al mismo tiempo, ya que puede presentar algunos tipos de imperfecciones como, rebabas, chupaduras, malas formaciones, porosidad, mal acabado superficial, o grietas. Los productos que pueden ser fabricados mediante fundición son tuercas, juntas, tuberías, válvulas, entre otros. (Groover, 2007)

2.2. Bases teóricas

2.2.1. *Arena.*

Este material mineral se obtiene de la desintegración rocosa, cuyas partículas se denominan grano y varían entre 0.05mm y 2mm de grosor, pueden ser de tipo natural, de mina, volcánica o de playa. (Avendaño et al., 2008).

2.2.1.1. *Arenas de moldeo.*

El moldeo es la labor de dar forma a la arena mediante un modelo previo tallado en madera, o en un polímero, para luego derretir un metal a altas temperaturas y este ser vertido en el molde de arena. (Kalpakjian, 2002)

La arena de moldeo para fundición se compone de Sílice, alúmina, e impurezas como cal, magnesio, álcali, óxido de hierro y otras, los mismos que desempeñan diferentes funciones en una mezcla, la sílice es el principal componente de arena base, para otorgar refractariedad.

➤ Arena de sílice

Son utilizadas en fundiciones de acero, hierro y aluminio, tiene buenas características de refractariedad, es de grano redondo y se compone de silicio y oxígeno (SiO_2), se denomina dióxido de silicio, la sílice representa la parte más importante de la arena de moldeo.

La uniformidad de los granos es muy importante para la permeabilidad de la misma, la permeabilidad disminuye con la mezcla entre granos finos y gruesos, debido a que los granos finos rellenan los espacios formados por los granos gruesos como se muestra en la Figura 1-2. (Quipasur, 1980)



Figura 1-2: Arena de sílice
Fuente: Autor

Es resistente hasta una temperatura de $1400^{\circ}C$ y se funde a $1600^{\circ}C$, la cantidad de arena para el moldeo depende de la dimensión de la pieza a fundir. La proporción normal de sílice que debe tener la arena de moldeo varía en un rango de 80% a 90%. Una arena con base óptima presenta la composición química como se indica en la Tabla 1-2. (Salcines Merino, 1985)

Tabla 1-2: Composición química óptima de la arena para moldeo.

Arena sílice	SiO_2	85%
Alúmina	Al_2O_3	10%
Cal	CaO	2%
Álcali	Na_2O, K_2O	1%
Sesquióxido de hierro	Fe_2O_3	2%

Fuente: (Salcines Merino, 1985)

➤ Bentonitas para arena de moldeo

Se compone de arcilla y arena, funciona como aglutinante mineral dándole plasticidad y cohesión a las mezclas y por ende facilitar el moldeo, ofrece buena resistencia para evitar la desintegración y mejorar la compacticidad de la cavidad del molde, cuando de esta se extraiga el modelo, como también durante el proceso de vertido del aluminio. La proporción de bentonita en una mezcla varía de 5% a 10% ya sea sódica o cálcica. La bentonita sódica es utilizada para fundiciones que requieren mayor temperatura que la cálcica, por ser más estable a altas temperaturas, es ideal para fundir metales férreos, como el acero que se funde en un rango entre 1400°C y 1500°C, mientras que la bentonita cálcica que se indica en la Figura 2-2, se utiliza para la producción de moldes de geometría relativamente compleja y fundición de materiales no férreos como el aluminio y el análisis químico se muestra en la Tabla 2-2. (Cholino Jose o, n.d.)



Figura 2-2: Bentonita cálcica

Fuente: Autor

Tabla 2-2: Análisis químico de la Bentonita cálcica

SiO_2	56-59%
Al_2O_3	18-21%
Fe_2O_3	5.4-9.1%
MgO	3-3.3%
CaO	1.2-3.5%
Na_2O	0.34-4.6%
H ₂ O Contenido (en la mezcla)	5.0-8.0%

Fuente: (Barkhudarov, 2006)

➤ Propiedades de las arenas de moldeo.

Las características técnicas de la arena son: (Higuita Garro, Orlando Vásquez, Sepúlveda, & Ceballos)

La refractariedad: Se determina por la temperatura a la que puede someterse sin presentar signos de fusión, viene asegurada por la sílice, cuyas características por otra parte resisten siempre modificada por la presencia de otros elementos.

La cohesión o resistencia: Es consecuencia directa de la acción del aglutinante, en base al porcentaje de humedad, se puede establecer cuan optima es la mezcla realizando con estas cuatro pruebas, por compresión, por tracción, por flexión y por cortadura, la más importante es la de compresión.

La Permeabilidad: Esta propiedad permite evacuar los gases del molde a través de la arena, si esta es escasa la evacuación resulta muy difícil o casi imposible, provocando la ebullición del metal líquido por efecto de esto tiende a formarse sopladuras en la pieza. La arena de granos angulados tiene más volumen que la de granos redondeados, por lo tanto, está es más permeable.

El deslizamiento: Mientras mayor sea la capacidad de deslizamiento de la arena, más fácilmente podrá ser comprimida, caso contrario afectara la dureza del molde en determinados puntos, puede ser insuficiente a la acción de resistencia mecánica del metal líquido y en consecuencia generar posibles defectos de fundición.

La durabilidad o vida: Es la propiedad que representa la capacidad de la arena para permanecer formando un modelo, durante el proceso de fundición.

La plasticidad: Es la amplitud de las arenas para reproducir detalles de los modelos, aptitud que depende de dos propiedades, la deformabilidad y la influencia.

Es necesario predecir el comportamiento de la mezcla de arena utilizada como molde, durante el proceso de colado, mediante ensayos como los que se describen a continuación de este párrafo, mismos que deben presentar condiciones y parámetros óptimos de trabajo en la manufactura de fundición, para en base a esto garantizar calidad en las piezas fundidas.

➤ Ensayo de granulometría

Atendiendo a la forma del grano las arenas se clasifican en las siguientes variedades:

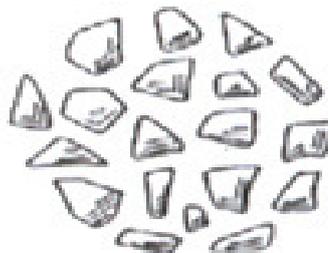
- Grano angular: Presenta límites filudos.
- Grano subangular: Presenta granos filudos y ovalados.

- Grano redondo: Presenta límites esferoides.
- Grano compuesto: Son aglomeraciones integradas por los tipos anteriores.

Cada una de las variedades granulométricas que se indican en la Figura 3-2, poseen características específicas, la arena de grano angular proporciona mayor adherencia a la masa de arena, pero presenta menor plasticidad y más permeabilidad, la arena de grano redondo presenta menor adherencia, pero mayor plasticidad y más alta permeabilidad. Las otras dos variedades presentan características intermedias entre las arenas de grano angular y las arenas de grano redondo.



a) Grano esferoidal



b) Grano angularado



c) Grano compuesto

Figura 3-2: Formas de granos

Fuente: (Capello, 1987)

➤ Distribución granulométrica.

Dentro de las cuatro variedades de arenas mencionadas en el punto anterior, existe diversa gradación de ellas de acuerdo a la distribución de granos y se clasifica de acuerdo a su tamaño según lo mide la AFS como se indica en la Tabla 3-2.

Tabla 3-2: Distribución granulométrica

APERTURA DE MALLA		GRADO SEGUN	
PULGADAS	MILIMETROS	AFS	ALEMANIA (KLEES)
0,1320	3,360	6	--
0,0661	1,680	12	1
0,0331	0,840	20	4
0,0222	0,590	30	5
0,0165	0,420	40	8
0,0117	0,297	50	9
0,0083	0,210	70	11
0,0059	0,149	100	12
0,0041	0,105	140	14
0,0029	0,074	200	16
0,0021	0,053	270	17
0,0011	0,025	PAH	PRIMO

Fuente: (Pastor)

La muestra de arena debe ser libre de arcilla y libre de humedad, la arcilla es un recubrimiento que esta posee. Para determinar el tamaño de grano se utilizan los tamices que se indican en la Figura 4-2, estos tienen un factor de apertura los cuales son:

1. 4 para el tamaño de grano grueso.
2. 100 para el tamaño de grano fino.
3. El orden que se colocan los tamices es: 4, 6, 10, 16, 20, 30, 40, 60, 80, 100 y un fondo.
4. El factor para cada uno es: 6, 9, 17, 31, 41, 52, 71, 103, 140, 186, 281.



Figura 4-2: Tamices
Fuente: Laboratorio de mecánica ESPOCH

Las series unificadas de los cedazos más utilizados son las americanas de “A.F.S”, constituida por once cedazos, numerados correlativamente, cada uno se caracteriza por un determinado tamaño de malla y las Fischer, compuestas de siete cedazos correspondientes a las normas alemanas DIN.

Una vez preparada la arena se hace pasar por los cedazos metálicos “AFS” de malla decreciente, luego se pesan las cantidades de arena contenidas en cada cedazo y se establece el reparto porcentual de los granos denominado con p_1, p_2, p_3 y los porcentajes contenidos en cada cedazo con $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$, si P representa el porcentaje total el índice de grosor i o finura será:

$$i = \frac{p_1 \cdot \alpha_1 + p_2 \cdot \alpha_2 + p_3 \cdot \alpha_3 + \dots}{P} \quad (1)$$

Donde:

i = Índice de finura

α = Factor del tamiz

$\alpha_i \cdot p_i$ = Peso parcial de cada tamiz

P = Porcentaje total

El resultado obtenido es el valor medio del tamaño de los granos de la muestra, el cual representa aproximadamente el número de mallas por pulgada lineal de cedazo, a través de las cuales pasaría toda la muestra. Con estos datos se puede completar la clasificación de las arenas, según el tamaño de sus granos como se indica en la Tabla 4-2. El tamaño de grano influye en el acabado superficial de las piezas fundidas.

Tabla 4-2: Índice AFS (tamaño de granos)

INDICE AFS	DENSIDAD DE ARENA	TAMAÑO DE GRANO
Índice <18	Arena muy gruesa	1 – 2 mm
35> Índice AFS <18	Arena gruesa	0.5 – 1 mm
60> Índice AFS <35	Arena media	0.25 – 0.5 mm
150> Índice AFS <60	Arena fina	0.1 – 0.25 mm
Índice 150	Arena muy fina	< 0.1 mm

Fuente: (Silva, 2019)

A continuación, se describe la densidad de cada tipo de arena que se muestra en la Tabla 4-2. (Tartera, 2013)

- Las arenas muy gruesas se emplean en la fabricación de calderas y radiadores donde se necesita gran permeabilidad.
- Las arenas gruesas son empleadas en fundiciones de acero moldeado.
- Las arenas medias son estándar y se utilizan en fundiciones de base hierro grafiticas para la fabricación de moldes y machos.
- Las arenas finas son utilizadas para la fabricación de arenas pre - revestidas (proceso cascara), es recomendada para manufacturar piezas altamente aleadas, piezas de poco espesor que requieran de un gran acabado superficial
- Las arenas muy finas se usan para el moldeo en fundición de base cobre y aluminio

➤ Ensayo de Humedad.

Las arenas de moldeo contienen un porcentaje variable de agua y se encuentra en dos formas, como agua de constitución de la arcilla hidratando a la alúmina y en forma libre propiamente formada, el porcentaje de humedad de la arena varía desde (2.2-8)%, siendo el más óptimo el 8% con resistencia de compresión de 0.055MPa, creando en la arcilla la propiedad plástica y con buena resistencia. (Dayana, 2012)

El porcentaje de humedad se determina mediante la pérdida de peso, de la muestra para esto se debe calentar la mufla a una temperatura de 110 °C. Es importante que la temperatura aplicada

para el proceso se mantenga constante, se recomienda una variación de temperatura de un $\pm 5\%$, el tiempo de secado depende directamente del tipo de muestra (peso y humedad), generalmente no pasa de los 15 minutos en una muestra de 150gr. (Ordinola Castillo, 2011)

Si la arena se somete a secado durante un tiempo prolongado a una temperatura de 110 °C, pierde la humedad y la arcilla pierde su plasticidad quedando en forma de terrones duros, en cambio si la temperatura se lleva por encima de los 300°C, la arcilla pierde agua de constitución, calcinándose como un ladrillo y perdiendo para siempre la plasticidad, aunque se la moje de nuevo. Al perder la humedad la arena de los moldes se hace permeable y queda con alta resistencia mecánica. Estas arenas se utilizan para el moldeo de piezas grandes y de espesores pesados. Es particularmente apto para el moldeo por colada continua de piezas ejecutadas en máquina, con bastidores desmontables, es apropiado para la manufactura de tubos de desagüe, de empalmes, de codos, de elementos de radiadores, de tubos de aletas, de piezas para alfarería de piezas para estufas, bañeras, etc. El porcentaje de humedad se determina mediante la siguiente relación: (Caro Silva, 1995)

$$\%h = \frac{Pi - Pf}{Pi} * 100 \quad (2)$$

Donde:

$\%h$ = Humedad

Pi = Peso inicial de la muestra(gr)

Pf = Peso de la muestra seca(gr)

Las arenas de acuerdo a su humedad se clasifican en: Vedes o magras, secas o grasas.

- Arenas verdes o magras: Son aquellas que pueden ser utilizadas en moldes sin un secado previo, su contenido de arcilla va de (5 a 10) % y su uso está prescrito para obtener piezas relativamente livianas o delgadas.
- Las arenas secas o grasas: Tienen contenido de arcilla hasta un 18%, posee elevada cohesión y son poco permeables, por lo que los moldes deben ser secados en estufa antes de ser usados.

➤ Ensayo de Permeabilidad

La permeabilidad es la facultad de la arena para dejar pasar a través de la masa, los gases provenientes del interior del molde los cuales son: (Caro Silva, 1995)

- El aire naturalmente encerrado dentro del molde, que debe ser desplazado por el metal líquido que ingresa por el sistema de alimentación de la pieza.
- Los gases que proceden de la propia masa de arena al quemarse la materia orgánica y el carbón que ella contiene.
- Los gases que se desprenden de la aleación al momento de solidificarse.

La permeabilidad de la arena depende de factores como:

- De la distribución granulométrica e índice de finura, siendo mayor la permeabilidad cuando este índice es menor.
- De la constitución granulométrica, presentando mayor permeabilidad de las arenas de granos redondos que las de granos angulares.
- De la uniformidad en el tamaño de los granos cuando la distribución granulométrica es muy extendida la permeabilidad es menor que si la arena está concentrada en menor cantidad de mallas.
- Del contenido de arcilla, baja la permeabilidad cuando la proporción de arcilla es más alta.
- Del contenido de agua, cuando la humedad es superior a la humedad del moldeo, la permeabilidad disminuye.
- De la intensidad del apisonado durante el moldeo, mientras más fuerte es el apisonado, más baja resultará la permeabilidad del moldeo.

La permeabilidad se determina a través de la siguiente fórmula: (Caro Silva, 1995)

$$P = \frac{V \cdot h}{p \cdot A \cdot t} = \frac{V \cdot h}{p \cdot A \cdot t} * c \quad (3)$$

$$V = \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) * h \quad (4)$$

Donde:

P = Permeabilidad

V = Volumen de la campana del permeámetro o volumen de aire que pasa por la probeta(cm^3)

h = Altura de la probeta (cm)

p = Presión de aire que moverá la columna de agua($\frac{kg}{cm^2}$)

A = Sección de la probeta por donde se va a evacuar el gas(cm^2)

t = Tiempo de paso de aire(s)

c = Constante dimensional = $0.06\left(\frac{kg-s}{cm^4}\right)$

D = Diámetro mayor (cm)

d = Diámetro menor (cm)

➤ Ensayo de resistencia a compresión.

El objetivo principal de este ensayo es determinar la tensión máxima de compresión, que la probeta es capaz de soportar sin romperse, en base al valor referencial obtenido en el ensayo se considera el apisonado apropiado de compactación, que debe ser aplicado a la arena, para que conserve la forma correcta del molde. Los ensayos tanto de compresión como de corte, se realizan utilizando las herramientas que se muestran en la Figura 5-2a, Figura 5-2b, Figura 5-2c. (Ordinola Castillo, 2011)



a) Apisonador



b) Granos de plomo



c) Balanza de ensayo de corte y compresión

Figura 5-2: Herramientas para ensayos de corte y compresión

Fuente: Laboratorio de mecánica ESPOCH

Para el ensayo de compresión se pesa la cantidad de arena a analizar en gramos y se coloca en el molde de 5cm de diámetro, para ser compactada en la máquina de compactación, girando lentamente la manivela de leva y aplicar tres golpes con el martillo hasta compactar la arena completamente.

Posterior a esto en el extremo del brazo de la balanza se coloca un valde, para aquí agregar continuamente granos de plomo hasta que colapse la probeta de arena, luego se pesa el recipiente y los granos y con estos datos se realiza el cálculo respectivo aplicando las fórmulas que se indican a continuación:

$$\Sigma M_o = o \quad (5)$$

$$A_1 = \frac{\pi d^2}{4} \quad (6)$$

$$\sigma = \frac{R_{com}}{A_1} \quad (7)$$

Donde:

ΣMo = Sumatoria de momentos en el punto de aplicación

σ = Esfuerzo de compresión

A_1 = Área de la tapa del ensayo de compresión

R_{com} = Fuerza resistente a la compresión.

➤ Ensayo de corte

Se realiza el mismo procedimiento del ensayo de compresión, a diferencia que aquí se cambia la tapa de superficie plana por una de corte, el objetivo específico de este ensayo es determinar la resistencia máxima de corte que tiene la arena, en base al valor que se obtiene en este ensayo se considera el apisonado adecuado que debe tener la arena para que pueda resistir a los diferentes esfuerzos de corte generados durante el moldeo, por ejemplo cuando se remueven moldes de geometría compleja de la arena, o cuando surge la necesidad de trasladar un molde de un lugar a otro, las fórmulas que se utilizan para el cálculo son las mismas que las del ensayo de compresión, incluyendo las que se indican: (Ordinola Castillo, 2011)

$$A_2 = B * h \quad (8)$$

$$\tau = \frac{R_{cor}}{A_2} \quad (9)$$

Donde:

B = Base de la tapa de ensayo de corte

h = Altura de la probeta de arena

A_2 = Área de la sección perpendicular de la probeta

R_{cor} = Fuerza de resistencia al corte

τ = Esfuerzo de corte

2.2.2. Modelos para la fundición.

Los modelos para fundición son prácticamente réplicas de las piezas que se desea obtener, generalmente los modelos son tallados en maderas blandas como pino blanco, caoba y maderas duras como maple o ébano, como se muestra en la Figura 6-2, así también poli estireno, cera, resina epóxica y metal.

Hoy en día la tecnología permite modelar elementos complejos, usando un escáner 3D, que permite escanear un elemento y pasar este modelo al computador, donde se corrige la geometría y luego se envía esta información mediante un software 3D, a la impresora para su respectiva impresión, el material más utilizado en impresiones es el PLA (Acido Poli láctico), que es un termoplástico biodegradable, hecho de la caña de azúcar o almidón de maíz. (Trimaker, 2010)

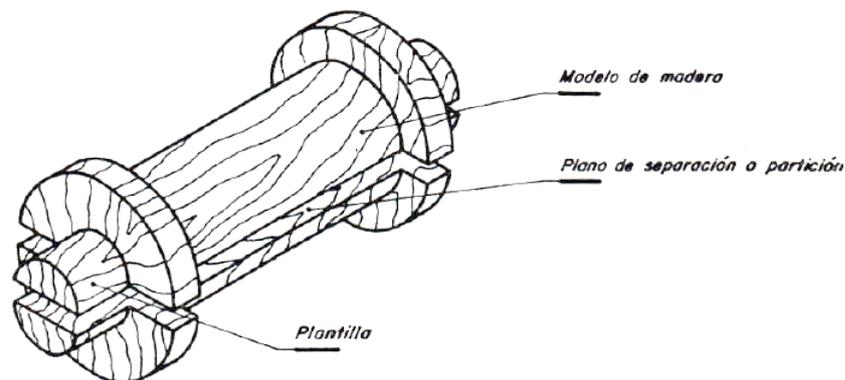


Figura 6-2: Modelo de madera
Fuente: (Avendaño et al., 2008)

2.2.3. Impresión 3D.

Conocida también como manufactura por adición, para la fabricación de un elemento primero se basa en un modelo digital, para llevarlo a la realidad sitúa progresivamente el material en pequeñas capas hasta terminar la impresión.

Esta tecnología tiene un campo de aplicación extenso, ya que se puede fabricar desde las piezas más simples, hasta prototipos de alta gama como partes y piezas para autos y aeronaves, incluso en el área de la medicina se puede imprimir partes del cuerpo humano para ser usadas como maquetas.

En aplicaciones de fundición, ya no es necesario modelar muestras de un elemento en madera o hierro, sino más bien solo imprimirlos mediante una impresora 3D Anet A8, como la que se indica en la Figura 7-2, modelos hasta de geometría compleja, para luego fundirlos por algún método de

fundición, como el que se propone en el presente trabajo y llevarlos a la realidad, economizando tiempo y costos. (Informatica, 2019)

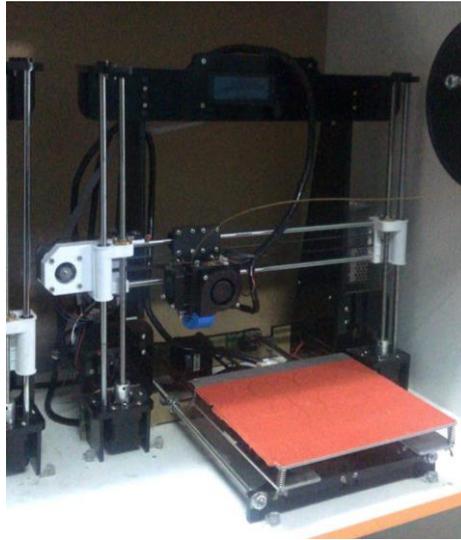


Figura 7-2: Impresora 3D Anet A8
Fuente: Autor

2.2.3.1. Tipos de materiales para impresión 3D.

➤ ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno)

Llamado también plástico de ingeniería porque su procesamiento es más complejo que un plástico común, el acrónimo deriva de tres monómeros utilizados para su producción, acrilonitrilo, butadieno y estireno por estar constituido por tres monómeros diferentes se lo denomina terpolímero (copolímero compuesto de tres bloques).

Los bloques de acrilonitrilo proporcionan rigidez, resistencia a ataques químicos y estabilidad a alta temperatura, así como dureza.

Los bloques de butadieno (elastómero) proporcionan tenacidad a cualquier temperatura.

El bloque de estireno aporta resistencia mecánica y rigidez, esta mezcla de propiedades, llamada sinergia indica que el producto final contiene mejores propiedades que la suma de ellos. (Tecnología, n.d.)

Propiedades:

Los materiales de ABS tienen importantes propiedades en ingeniería como buena resistencia mecánica y al impacto combinando con facilidad para el procesado y estas son:

El acrilonitrilo proporciona:

- Resistencia térmica
- Resistencia química
- Resistencia a la fatiga
- Dureza y rigidez

El butadieno proporciona:

- Ductilidad a baja temperatura
- Resistencia al impacto
- Resistencia a la fusión

El estireno proporciona:

- Facilidad de procesado (Fluidez)
- Brillo
- Dureza y rigidez

Pueden ser extruidos, moldeados por inyección, soplado y presado. (Tecnología, n.d.)

Tabla 5-2: Datos técnicos del ABS

Propiedades	Valor típico	Método de ensayo	Condiciones de ensayo
Físicas			
Densidad g/cc	1.07(g/cm ³)	ASTM D792	
Índice de fluidez	11.7g/10min	ASTM D1238	230°C/3.8 kgf
Mecánicas			
Resistencia a la tracción	35Mpa	ASTM D638	Type I,5 mm/min
Elongación a la rotura			
Modulo elástico en tracción	18%	ASTM D638	Type I,5 mm/min
Dureza Rockwell R	2480Mpa	ASTM D638	
Resistencia a la flexión	113	ASTM D785	
Resistencia al impacto	79 Mpa 240 J/m	ASTM D790 ASTM D256	izod con entalla,@23°C
Térmicas			
Temperatura de flexión bajo carga	82°C	ASTM D648	1.82Mpa,3.2mm,unannealed

Fuente: (Printalot, 2017)

Los filamentos producidos con ABS, son un derivado de combustibles fósiles, No es biodegradable, pero si reciclable tiene vida útil más larga que el PLA, hay que evitar su exposición a la llama o temperaturas superiores a 300°C por periodos prolongados de tiempo para evitar su reactividad, es insoluble en el agua, su rango de fusión se encuentra entre los 95°C-105 °C. Su temperatura de autoignición es a partir de los 300°C, al igual que la descomposición térmica.

Para la impresión se recomienda una temperatura en la boquilla de 225-240°C, la cama donde reposa el elemento impreso a una temperatura de: 90-110°C y para extraer las piezas impresas de la cama, se recomienda usar spray adhesivo.

Para obtener los mejores resultados es recomendable pre secar el filamento a 40°C durante cuatro horas con circulación forzada al aire (Printalot, 2017)

➤ PETG (Tereftalato de Polietileno Glicolizado)

Es un copolímero resultado de la combinación del PET (Polyethylene terephthalate) con glicol, mejorando las propiedades del PET con un proceso de glicolizado.

Esto se refiere a un cambio en la estructura química haciéndolo más transparente, menos frágil y más fácil de procesar que el PET por este tipo de mejoras se ha convertido en uno de los materiales más comunes para impresiones 3D.

Sus propiedades mecánicas son muy buenas tales como:

- Buenas propiedades ópticas
- Alta resistencia química
- Excepcionales prestaciones a bajas temperaturas
- Alta resistencia a los impactos
- Baja absorción de agua
- Fácil de reciclar
- Elevada resistencia al fuego

El PETG es uno de los materiales más interesantes para impresión 3D, cuando se requiere obtener piezas muy resistentes o que soporten al ataque de productos químicos.

Tabla 6-2: Datos técnicos del PETG

Propiedades	Valor típico	Método de ensayo	Condiciones de ensayo
Físicas			
Densidad	1.27 (g/cm ³)	ASTM D792	
Mecánicas			
Resistencia a la tracción	50Mpa	ASTM D638	7300 psi
Elongación	130.00%	ASTM D638	
Dureza, Rockwell R	106	ASTM D785	
Resistencia a la flexión	70Mpa	ASTM D790	
Resistencia al impacto	101	ASTM D256	Izod con entalla, @23°C
Térmicas			
Temperatura de flexión bajo carga	64°C	ASTM D648	1.82Mpa
Diámetro	Tolerancia	Redondez	
1.75	±0.03	> 95%	
2.86	±0.05	> 95%	

Fuente: (Printalot, 2017)

Para su impresión se recomienda que la temperatura de la boquilla tenga un rango de (240-250)°C, su descomposición térmica empieza a partir de los 270°C y la temperatura de la cama porta impresión tiene un rango de 80-90°C, para extraerla usar de spray, adhesivo.

Para obtener los mejores resultados es recomendable pre secar el filamento a 40°C durante cuatro horas con circulación forzada de aire (Printalot, 2017)

➤ PLA (Ácido Poliláctico)

Es un poliéster alifático termoplástico derivado de recursos renovables, su proceso implica en la extracción de azúcares (dextrosa, glucosa y sacarosa) del almidón de la remolacha, maíz, trigo, caña de azúcar y después fermentarlo con ácido láctico, este se convierte en el dimer o el lactide que se purifica y se polimeriza a ácido poli láctico sin necesidad de solventes, es biodegradable ideal para piezas de análisis de carácter efímero. (TRD, 2019)

Es dimensionalmente estable, barato, fácil de conseguir y con él se obtienen productos fuertes y resistentes.

Tabla 7-2: Características biodegradables de la fibra

Característica	PLA DEL CDP	PLA de Kuraray	Rayón	Lyocell	Poliéster
Densidad (gcm^3)	1.25	1.27	1.51	1.52	1.38
Punto de fusión (°C)	120-170	170	Ninguno	Ninguno	260
Cuenta (dtex)	1.7(e.g)	1.7	1.7	1.7	1.7
Tenacidad (cN/tex)	50	25-45	20-25	40-45	35-65
Alargamiento (%)	35	N/A	18-222	14-16	15-40
Recobro de la humedad (%)	0.4-0.6	0.48	13	12	0.4

Fuente: (Medina, 2020)

Los filamentos producidos con PLA, son de mayor uso por su facilidad de impresión y excelente adherencia entre capas, tiene varias cualidades como no generar olor, baja deformación en las piezas y no requiere cama porta impresión caliente, es ecológico, está hecho de recursos renovables (almidón de maíz), se debe evitar la exposición a la llama o a temperatura superior a 230°C por periodos prolongados para evitar su reactividad, es insoluble al agua por lo que puede contaminarla.

La temperatura de fusión es 180°C, la temperatura de autoignición es a partir de los 388°C y su descomposición térmica comienza a los 250°C. El PLA es de origen vegetal lo cual lo convierte en un polímero eco-amigable e inherentemente biodegradable.

Es un material frágil y duro a la vez, se vuelve endeble a temperaturas entorno a (60-70)°C, posee menos contracción entre capas, presenta poca resistencia térmica, esto hace que este material plástico sea poco útil para aquellas piezas que requieran soportar temperaturas altas. (Descubrearduino, n.d.)

Para la impresión se recomienda una temperatura en la boquilla de 180-230°C, una temperatura de 20-60°C, para la cama porta impresión y usar spray adhesivo para retirar el elemento impreso. Para obtener mejores resultados es recomendable pre secar el filamento a 40°C durante cuatro horas con circulación forzada de aire (Printalot, 2017)

2.2.4. Desintegración térmica, química de polímeros utilizados para impresión 3D.

La desintegración, es el cambio que experimenta las propiedades físicas de cualquier material, en los polímeros esta puede verse afectada de acuerdo a la forma de iniciación, ya sea química, física,

térmica, mecánica, biológica, química radiante o fotoquímica. Térmicamente se desintegran a partir de los 200°C, las moléculas se descomponen en fragmentos por las uniones covalentes y su resistencia limitada es vencida por el calor.

En la degradación química incide el ataque por reactivos químicos como, gases reactivos, ácidos base, diluyentes, como el cloroformo, cloro, ácidos, solventes que al entrar en contacto con el polímero se desintegra la estructura básica de las cuales están compuestas, es decir las moléculas de cadenas largas. (Posada Bustamante)

➤ Cloro

Es de aspecto amarillo verdoso como se observa en la Figura 8-2, pertenece al grupo de los alógenos, son oxidantes, en estado natural es gaseoso su punto de fusión es de 100.55°C, el punto de ebullición es de 33.04°C, su símbolo químico es Cl, se lo puede utilizar como disolvente volátil, al atacar químicamente a un polímero tiende a desgastarlo lentamente. (Ecured, s.f.)



Figura 8-2: Cloro
Fuente (Alibaba, s.f.)

➤ Hidróxido de potasio y etilenglicol

Es un nuevo método para desintegrar PET en 24 horas dependiendo de las condiciones térmicas, desarrollado por investigadores de la Universidad del Papaloapan con el objetivo de reducir la contaminación ambiental, esta mezcla química destruye las cadenas poliméricas, al entrar en contacto con este material.

➤ Cloroformo

En la Figura 9-2 se indica el cloroformo (triclorometano o tricloruro de metilo), su fórmula química es CHCl_3 , sus propiedades son : densidad: 1,498g/ml, calor de combustión: 373(MJ/kg

mol), peso molecular 119.39 g/mol, composición : C: 10.05%, H:0.84%, y Cl: 89.10%, solubilidad: miscible con etanol, benceno, éter dietílico, éter de petróleo, tetracloruro de carbono, disulfuro de carbono y acetona, no es inflamable, es volátil, no tiene coloración, se usa para la síntesis de productos químicos, se descompone de forma lenta, se disuelve bien en el agua, pero no se fija al suelo, se utiliza para elaborar resinas, plásticos, refrigerantes, puede causar severos daños en la salud de las personas, hasta cáncer si no se manipula correctamente (Química, n.d.)

Se utiliza para estudios experimentales de degradación térmica en condiciones isotérmicas y no isotérmicas para poliésteres biodegradables como el PLA, donde el cloroformo se utiliza como eluyente para efectuar la despolimerización, la degradación empieza con la pérdida de peso del material, a medida que transcurre el tiempo en el experimento y por último se degrada completamente. Kopinke sugiere que la degradación del PLA por encima de los 200°C, incluye transesterificación intramolecular que conduce a láctida y oligómeros cíclicos, la ciseliminación conduce a oligómeros acrílicos de ácido acrílico y fragmentación que conduce a acetaldehído. (Yoshihiro, 2001)



Figura 9-2: Cloroformo
Fuente: (Química, n.d.)

2.2.5. Caja de moldeo.

Son cajas de geometría cuadrada como se muestra en la Figura 10-2, modelada en madera de carácter robusto, para soportar manejos rudos y golpes, cuya misión es sostener firmemente la arena, hasta que se solidifique por completo el elemento.



Figura 10-2: Caja porta molde
Fuente: Autor

2.2.6. *Horno de crisol.*

El horno utilizado para este estudio de fundición es estático, con capacidad total de carga metálica de 50kg como se indica en la Figura 11-2, en él se puede fundir materiales como aluminio, oro, aleaciones de zinc, latones y bronce entre otros, está recubierto por una lámina cilíndrica de acero, en su interior un revestimiento refractario y crisol para contener el metal, incorpora una turbina externa para alimentar el flujo de aire al quemador ya sea de gas o diésel. Tanto la carga de material, como la extracción del metal líquido se lo realiza por la boca del horno. (Gracomaq, 2018)



Figura 11-2: Horno estático de crisol
Fuente: Laboratorio de fundición ESPOCH

2.2.7. *Mufla.*

Es un equipo constituido por una cámara cerrada con paredes hechas de materiales refractarios, para brindar uniformidad de temperatura como se muestra en la Figura 12-2, esto le permite alcanzar una temperatura hasta de 1700°C, mediante los dispositivos electrónicos incorporados se puede regular y controlar las temperaturas de trabajo. (laboratorio, n.d.)



Figura 12-2: Mufla
Fuente: Laboratorio de fundición ESPOCH

2.2.8. Fundentes.

En la fusión de aluminio la formación de escoria es inevitable, la cantidad con la cual se genera depende de algunos factores como: temperatura, ajustes del quemador y tipo de horno, la escoria se forma debido a chatarras sucias que atrapan al líquido de aluminio, si esto no fuera controlado mediante la aplicación de fundentes causaría inclusiones no metálicas en la pieza fundida. Los tipos de fundentes más reconocidos son:

Fundentes de cobertura: Aplicado a fundiciones de aluminio primario, su función es crear una barrera líquida entre la atmósfera del horno y el aluminio fundido, para prevenir la oxidación del metal y absorción de hidrógeno. Ejemplo ver Figura 13-2 (Figueroa M, 2009)



Figura 13-2: Oxide Removal Flux
Fuente (Alibaba, s.f.)

Fundentes de escoréo: Su función es apartar la escoria del metal fundido mediante exotermicidad controlada del fundente, el calor generado mejora la mojabilidad de la escoria, produciéndose un efecto de coalescencia, haciendo que se escurran las pequeñas gotas de aluminio, para formar gotas más grandes y así se separen fácilmente de la escoria y se reintegren al metal base. Ejemplo ver Figura 14-2.



Figura 14-2: Desescoriente
Fuente (Alibaba, s.f.)

Fundentes de limpieza: Su función principal eliminar óxidos del metal, por ejemplo, el bórax (borato de sodio o tetra borato de sodio), que se indica en la Figura 15-2, es un mineral natural de color blanco cristalino, con características ubicadas entre los metales y no metales, se vierte pequeñas cantidades en una fundición de aluminio, para evitar la oxidación, disolver óxidos, residuos y facilitar su mezcla. (Comara, n.d.)



Figura 15-2: Bórax
Fuente: Autor

Fundentes para limpieza de paredes (Hornos): Su función es ablandar y ayudar a eliminar las aglomeraciones de óxidos, que se produce las paredes de los hornos debido a la fusión del metal ya que estos reducen la capacidad de los mismos. Ejemplo ver Figura 16-2.



Figura 16-2: Agente de cubierta de aislamiento modelo 66SF
Fuente: (Alibaba, s.f.)

Fundentes especiales (Modificadores, refinadores, desgasificadores): Son aplicados al metal en equipos de inyección de fundente, que cuenta hasta con 3 depósitos de fundente para llevar a cabo una limpieza profunda del metal, después de la modificación de una aleación y por último una refinación de grano. Ejemplo ver Figura 17-2. (Figuroa M, 2009)



Figura 17-2: Fundente de desgasificación y refinación (Refining Flux)
Fuente (Alibaba, s.f.)

En la Tabla 8-2, se muestra una guía de los rangos típicos de la aplicación de fundentes para aluminio, los mismos que deben ser estimados en el proceso de fundición, considerando algunos factores como el tipo de carga metálica y la utilización de chatarra.

Tabla 8-2: Rangos típicos de aplicación de fundentes

APLICACIÓN (para)	UNIDADES	Granular	Polvo
Limpieza (aplicación manual)	%	0.08	0.12
Escoreo (Crisol u olla)	Kg/m2	0.7 - 0.9	1 - 1.2
Limpieza (inyectado)	%	0.08	N/R
Escoreo en Reverbero	Kg/m2	1.2 - 1.4	1.6 - 1.8
Fusión (chatarra ligeras)	%	N/R	1 - 5.0
Tiempo de reposo despues de la aplicación	Minutos	5 a 10	1 - 12.

Fuente: (Figuroa M, 2009)

El peso del componente de la carga (en el horno) viene dado por la siguiente formula (Pino Tarrago, Teran Herrera, Mena mena, & Navas Medina, 2015)

$$QK = \frac{(Q)(X)}{100} \quad (10)$$

Donde:

QK = Peso de la carga metálica

Q = Capacidad del horno (kg)

X = Contenido del componente de fundente en la carga (%)

2.2.9. *Aluminio.*

Es el material metálico más abundante en la superficie terrestre y se encuentra en combinación con otros elementos como, oxígeno, silicio y hierro, la bauxita, está formada por óxidos de aluminio hidratados, este es el mineral más importante que se usa en la producción de aluminio mediante el proceso Bayer, donde la bauxita reacciona con hidróxido de sodio caliente, para convertir el aluminio de mineral de hierro a, aluminato de sodio. (Smith, 2006)

Propiedades Ingenieriles del aluminio:

Se denomina como material de ingeniería por tener una combinación de propiedades muy útiles, se funde a 660.3°C , su densidad es de $(2.70\text{g}/\text{cm}^3)$, esto es de utilidad para todos los productos manufacturados con este material, es resistente a la corrosión, no es tóxico por ello es ideal para fabricar recipientes y envases de alimentos, tiene amplia aplicación en la industria eléctrica y tiene un costo relativamente bajo (Smith, 2006)

2.2.10. *Velocidad de vertido de un metal fundido.*

La velocidad de vertido de un metal fundido en base del bebedero, viene dada por la siguiente fórmula: (Groover, 2007)

$$h_1 = \frac{v_2^2}{2g} \quad (11)$$

Donde:

h_1 = Altura del bebedero (m)

v_2 = Velocidad de flujo del metal líquido ($\frac{m}{s}$)

g = Gravedad ($9.8 \frac{m}{s^2}$)

2.2.11. Gasto volumétrico.

La tasa de flujo volumétrico durante el vertido del metal permanece constante a través del líquido y viene dado por la siguiente formula (Groover, 2007)

$$Q = v_1 A_1 \quad (12)$$

$$A_1 = \pi r^2 \quad (13)$$

Donde:

Q = Gasto volumétrico ($\frac{m^3}{s}$)

v_1 = Velocidad de flujo del metal líquido ($\frac{m}{s}$)

A_1 = Área de la sección transversal (m^2)

r = Radio de la sección transversal(m)

2.2.12. Tiempo requerido para llenar la cavidad de un molde.

Es posible estimar el tiempo, que se requiere para llenar la cavidad de un molde de volumen (V) (Groover, 2007)

$$T_{MF} = \frac{V}{Q} \quad (14)$$

Donde:

T_{MF} =Tiempo de llenado del molde(s)

V = Volumen de la cavidad del molde (m^3)

Q = Gasto volumétrico ($\frac{m^3}{s}$)

2.2.13. Solidificación de los metales.

Es el cambio de estado de líquido a solido que experimenta un metal fundido, este proceso de solidificación varía en función del metal, si es puro o es una aleación, los metales puros tienden a solidificarse a temperatura constante a medida que transcurre el tiempo.

La solidificación real o tiempo local de solidificación se indica en la Figura 18-2, aquí el calor de fusión latente del metal es liberado hacia el molde, mientras que el tiempo total de solidificación transcurre desde el vertido hasta la solidificación completa, el calor se va disipando paulatinamente a través de las paredes del molde, dando paso a la formación de una capa inicial constituida de granos finos y a medida que el enfriamiento continua, se van formando más granos orientados hacia el núcleo de metal fundido, hasta que la capa inicial tenga mayor espesor y por ultimo solidificarse por completo, mientras que las fundiciones de aleaciones se solidifican en rangos de temperatura variables, este rango depende del sistema de aleación y su composición. (Schey, 2001)

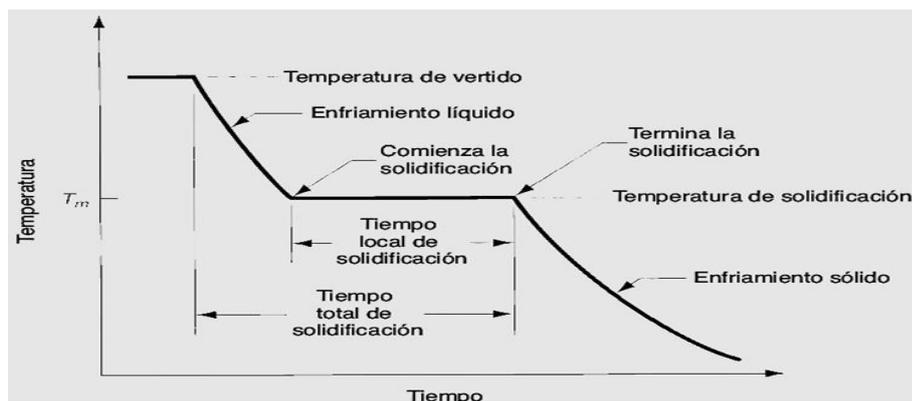


Figura 18-2: Curva de enfriamiento para un metal puro durante la fundición
Fuente: (Groover, 2007)

2.2.14. Tiempo de solidificación.

La solidificación de un metal fundido se da por el intervalo total de tiempo, que depende de la forma y tamaño hasta que se solidifique por completo, este tiempo de solidificación viene dado por la siguiente formula: (Groover, 2007)

$$T_{Ts} = C_m \left(\frac{V}{A}\right)^n \quad (15)$$

Donde:

T_{Ts} = Tiempo total de solidificación (min)

V = Volumen del fundido (cm^3)

A = Area de la superficie del fundido (cm^2)

n = Exponente de valor de 2

C_m = Constante del molde ($\frac{min}{cm^2}$)

2.2.15. Contracción.

Los metales tienden a contraerse en una fundición por efecto de la dilatación térmica, durante la solidificación y enfriamiento, causando cambios dimensionales, la contracción se origina en tres etapas como se indica en la Figura 19-2 donde:

0) nivel de inicio del metal fundido luego del vertido, 1) contracción líquida durante el enfriamiento antes de la solidificación, 2) disminución de altura y formación de una cavidad debido a la contracción durante el cambio de fase de líquida a sólida llamada contracción por solidificación, 3) contracción térmica del fundido solidificado durante el enfriamiento a temperatura ambiente” (Groover, 2007)

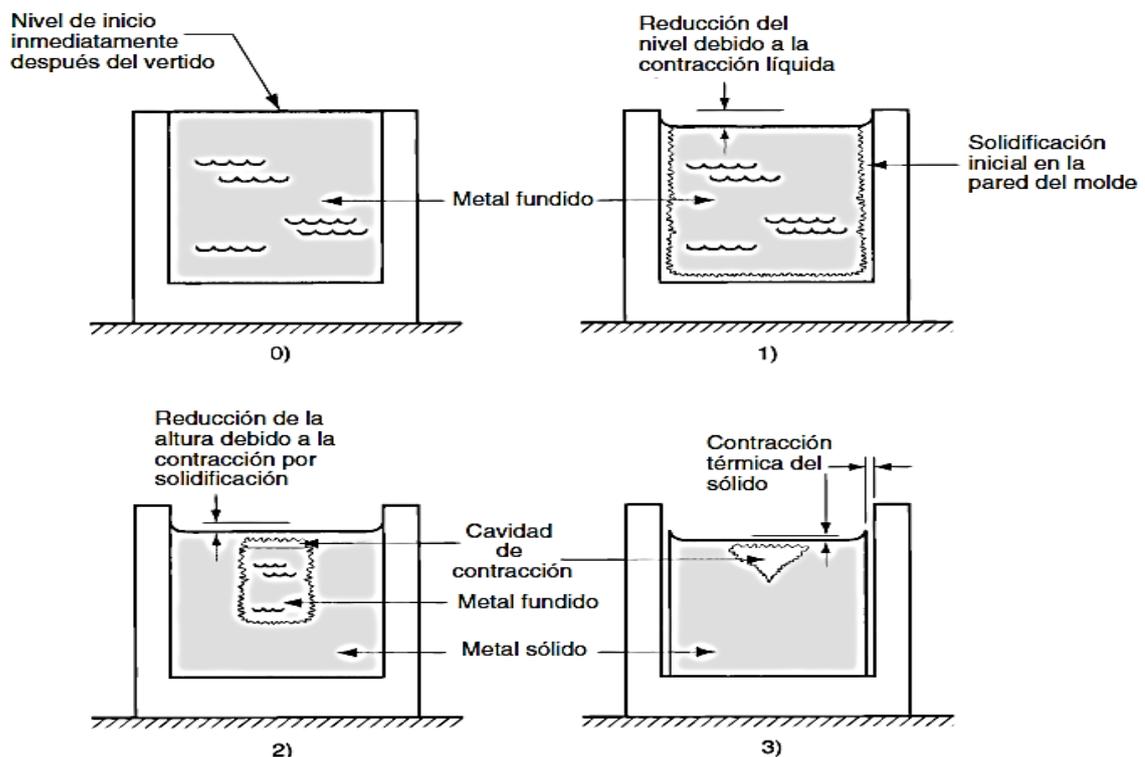


Figura 19-2: Contracción de un fundido cilíndrico durante la solidificación y enfriamiento
Fuente: (Groover, 2007)

En la Figura 20-2, se puede observar la tabla de los valores comunes de contracción volumétrica de algunos materiales de fundición, debido a la contracción que sufre durante la solidificación, esto ocurre casi en todos los metales, porque la fase sólida tiene una densidad mayor que la líquida.

TABLA 10.1 Contracción volumétrica para distintos metales de fundición, debido a la contracción por solidificación y a la del sólido.

Metal	Contracción volumétrica debida a:	
	Contracción por solidificación, %	Contracción térmica del sólido, %
Aluminio	7.0	5.6
Aleación de aluminio (común)	7.0	5.0
Hierro colado gris	1.8	3.0
Hierro colado gris, alto C	0	3.0
Acero fundido al bajo C	3.0	7.2
Cobre	4.5	7.5
Bronce (Cu-Sn)	5.5	6.0

Figura 20-2: Contracción volumétrica para distintos metales
Fuente: (Groover, 2007)

La contracción puede ser evaluada de dos formas, como contracción lineal o contracción volumétrica, en función de la temperatura del metal, al momento de ser colado y del coeficiente de contracción con la siguiente formula. (Garrido Meneses & Sanchez Taco, 2011)

$$\varepsilon L = \frac{L_m - L_p}{L_p} = \alpha(T_c - T_a) \quad (16)$$

$$\varepsilon V = \frac{V_m - V_p}{V_p} = \beta(T_c - T_a) \quad (17)$$

Donde:

εL = Contracción lineal

εV = Contracción volumétrica

L_m = Dimensión lineal del molde de fundición

L_p = Dimensión Lineal de la pieza colada a temperatura ambiente

V_p = Volumen de la pieza colada a temperatura ambiente

V_m = Volumen del molde

α = Coeficiente de dilatación lineal

β = Coeficiente de dilatación volumétrica

T_a = Temperatura ambiente

T_c = Temperatura de colado en el molde

2.2.16. Diseño de la mazarota.

La mazarota en un molde de fundición, funciona como un reservorio de metal líquido y su misión es suministrar progresivamente metal líquido al fundido, a medida que este se vaya solidificando y de esta forma compensar la contracción que se produce por solidificación. (Groover, 2007)

La contracción que sufre el aluminio fundido, es directamente proporcional al volumen mínimo que debe tener la mazarota, para compensar dicha contracción, para calcular el tamaño de la mazarota se puede utilizar la regla de Chvorinov, o aplicando el criterio de volumen y módulo de enfriamiento y su fórmula viene dada por: (Salueña Berna & Napoles Alberro, 2000):

$$V_{MIN MAZA} = V_{Pieza(partes gruesas)} * c * k \quad (18)$$

Donde:

$V_{MIN MAZA}$ = Volumen mínimo de la mazarota (cm^3)

$V_{Pieza(partes gruesas)}$ = Volumen de las partes gruesas de la pieza (cm^3)

c = Coeficiente de contracción volumétrica del metal

k = Coeficiente de seguridad normalmente se toma como $k= 2$; $1 \leq k \leq 3$

2.2.17. Defectos de fundición.

Las piezas que se obtienen mediante fundición tradicional, normalmente presentan irregularidades en su forma geométrica como, las que se menciona en la Tabla 9-2, estos defectos se producen debido a algunos factores como, técnica de fundición, mala selección de materiales, enfriamiento rápido del metal, etc. (Schey, 2001)

Tabla 9-2: Defectos de fundición

N°	Defecto	Causas	Características
1	Proyecciones metálicas	- Generado por cuerpos extraños como arena, escoria, negro, que son arrastrados por el metal durante la colada	Formada por rebabas, superficies ásperas, proyecciones masivas
2	Cavidades	- Causada por los gases que no tienen salida hacia el exterior durante la solidificación - Arena demasiado húmeda	Formadas por sopladuras, porosidad y cavidades redondeadas o ásperas internas (rechupes)
3	Discontinuidades	- Se produce cuando hay rigidez en el molde y este produce un esfuerzo de tracción en la pieza - Cuando el corazón es demasiado duro para desintegrarse y el elemento no tiene libre contracción	Formada por grietas
4	Superficie defectuosa	- Debido a un apisonado flojo o excesivo impacto del metal contra la superficie del molde.	Pliegues, traslapes, cicatrices, capas de arena adheridas, cascarilla de oxido

5	Fundición incompleta	- Se produce cuando el metal fundido se solidifica antes de llenarse por completo o por tener un sistema de alimentación deficiente.	Falta de llenado o volumen insuficiente de metal vaciado y fugas
6	Dimensiones o formas incorrectas	- Debido a parámetros como velocidad de vaciado, temperaturas inadecuadas de fundición, mazarotas ineficientes	Tolerancia inadecuada de contracción
7	Inclusiones	- Se debe a las reacciones de metal fundido con el oxígeno, - También debido a reacciones químicas de los componentes del metal fundido y a reacciones del metal y el molde.	Materiales extraños atrapados en el metal fundido

Fuente: (Groover, 2007), (Schey, 2001), (Kalpakjian, 2002)

2.2.18. Acabado superficial.

Es el grado de acabado, que presentan las piezas en las superficies después del proceso de manufactura, la vida útil de las maquinas depende en alto grado de este, como también de las propiedades físico- mecánicas. (Ecured, s.f.)

Las imperfecciones superficiales son rugosidades, ondulaciones, o combinadas como se indica en la Figura 21-2a, este valor se mide en micrómetros y resulta de medir la distancia existente entre la deformidad superior e inferior considerando el plano medio (base), como se muestra en la Figura 6-2b.

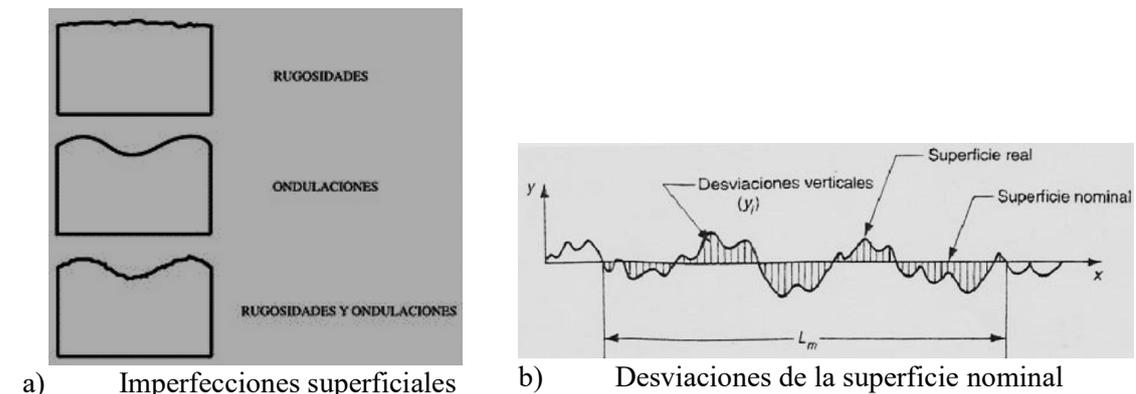


Figura 21-2: Imperfecciones y desviaciones de rugosidad

Fuente: (Frax, n.d.)

➤ Rugosímetro

Su función es determinar irregularidades y para ello realiza un rastreo del perfil en línea recta en una distancia de, 0.08mm a 25.0mm, mediante una punta fina ya sea de diamante o carburo de tungsteno denominada palpador, esta traduce las variaciones de altura detectadas en la superficie

en señales eléctricas, mismas que son enviadas a la unidad de control, para ser procesadas mediante múltiples parámetros de medición y finalmente reflejar la lectura en la pantalla del equipo (μm).

Esta medición se puede realizar con el rugosímetro SRT-6210S, que se muestra en la Figura 22-2a, para lo cual primero es necesario calibrar el equipo con la medida estándar de acabado superficial que incorpora el mismo, como se indica en la Figura 22-2, varias veces hasta que se vea reflejado la lectura R_a igual a $1.78\mu m$ en la pantalla, una vez establecido este parámetro se puede proceder a la medición superficial de cualquier elemento.

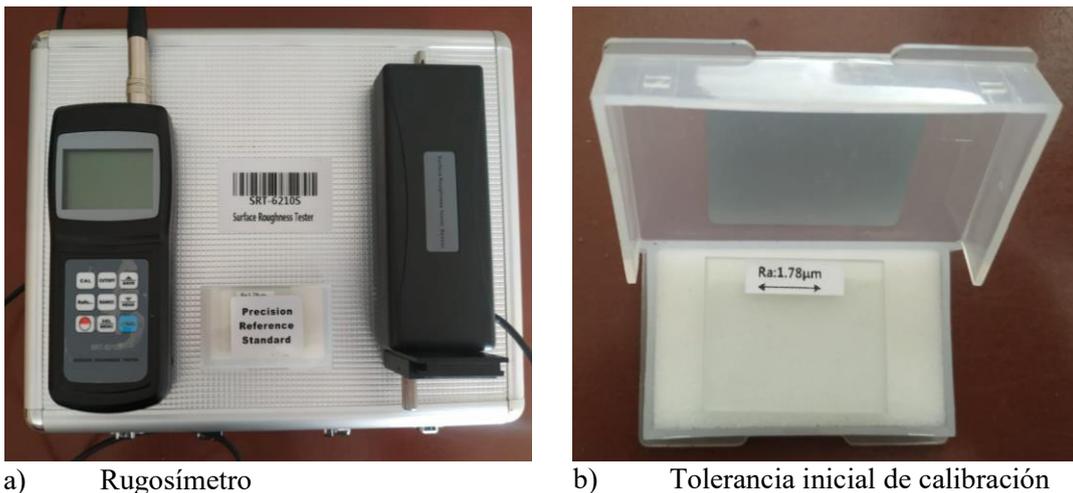


Figura 22-2: Instrumentos para determinar la rugosidad

Fuente: Autor

La rugosidad superficial se puede determinar mediante el método del valor de la media aritmética, que resulta de dividir la sumatoria total de lecturas tomada ($a+b + c + d \dots$), para el número total de lecturas (n), como se indica en la siguiente ecuación: (Kalpakjian, 2002)

$$R_a = \frac{a+b+c+d+\dots}{n} \quad (19)$$

El método del promedio de los cuadrados, R_a , en cambio se determina mediante la ecuación:

$$R_a = \sqrt{\frac{a^2+b^2+c^2+d^2+\dots}{n}} \quad (20)$$

Donde:

R_a = Rugosidad superficial media

a, b, c, d = Lecturas

n = Número total de lecturas

La clase de rugosidad se obtiene de acuerdo al proceso de fabricación de las piezas como se muestra en la Tabla 10-2.

Tabla 10-2: Rugosidad superficial de acuerdo a diferentes métodos de fabricación

Rugosidad promedio en micrómetros – Ra μm													
Proceso	50	25	12.5	6.3	3.2	1.6	0.80	0.40	0.20	0.10	0.05	0.025	0.012
Arenado													
Aserrado													
Brochado													
Bruñido													
Cepillado													
Cizallado													
Corte con soplete													
Corte electroquímico													
Corte láser													
Electroerosión													
Estampado													
Esmerilado													
Extrusión													
Forjado													
Fresado													
Fundición a cera perdida													
Fundición a presión													
Fundición en arena													
Fundición en coquilla													
Granallado													
Laminado en caliente													
Laminado en frío													
Lapidado													
Limado													
Mandrilado													
Mortajado													
Oxicorte													
Pulido													
Recalcado													
Rectificado													
Superacabado													
Taladrado													
Torneado													
Trefilado													
	Aplicación frecuente						Aplicación menos frecuente						

Fuente: (Rodríguez)

La calidad del acabado superficial viene dada por las siguientes normas: (Vargas D, 2015)

- UNE 82301:1986 (ISO 468:1982), Rugosidad superficial.
- UNE – EN ISO 4287.1998, Especificación geométrica de productos (GPS), calidad superficial.
- UNE 1037:1983 (ISO1302:1978) Indicaciones de estados superficiales en dibujos.

En la Tabla 11-2, se muestran los valores de R_a (rugosidad media), relacionados con la clase de rugosidad correspondiente y signos antiguos que las representan, estas serán mostradas en los planos de construcción de piezas de acuerdo a normas de calidad existentes en diferentes países.

Estas a la vez se clasifican en intervalos de grado Nx, donde x varia en un rango de 1 a 12, como se indica a continuación: (Higinio Rubio)

- N1-N4 : La superficie es especular
- N5-N 6: Las marcas de mecanizado no son apreciables ni al tacto, ni a la vista, pero si con la lupa
- N7-N8: Las marcas de mecanizado son apreciables a la vista, pero no al tacto
- N9-N12: Las marcas de mecanizado son apreciables a la vista y tacto

Tabla 11-2: Valores de rugosidad R_a

Valor de la rugosidad R_a		Clase de rugosidad	Signo de mecanizado equivalente (antiguo)
μm	μin		
50	2 000	N 12	~
25	1 000	N 11	
12,5	500	N 10	▽
6,3	250	N 9	
3,2	125	N 8	▽▽
1,6	63	N 7	
0,8	32	N 6	▽▽▽
0,4	16	N 5	
0,2	8	N 4	▽▽▽▽
0,1	4	N 3	
0,05	2	N 2	
0'025	1	N 1	

Fuente: (Higinio Rubio)

CAPÍTULO III

3. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

La metodología utilizada para el desarrollo del presente proyecto, es la investigación aplicada ya que se centra en encontrar estrategias para obtener un objetivo concreto.

3.1. Métodos de investigación

En la Tabla 1-3, se muestran los pasos para el diseño del método innovador a desarrollarse en el presente proyecto.

Tabla 1-3: Pasos para el diseño del método innovador

1.	Tipo de enfoque	Cuantitativa	Variable de temperatura
2.	Diseño	Experimental	Modificación de la variable temperatura para llegar al objetivo
3.	Alcance	Exploratorio	Escasa investigación a nivel nacional e internacional
4.	Población	Presenta datos cuantitativos Conocimiento profundo del contexto Conoce todas las características posibles	Método de fundición tradicional
5.	Muestra	No probabilística	Importa los criterios de selección de parámetros usados para el método
6.	Métodos de recolección de información	Observación sistematizada Test Revisión documental	Fotografías Comparación de resultados Estudio de resultados obtenidos
7.	Procedimiento o fases de la investigación	Orientación de los procesos que va a desarrollar el investigador para cumplir los objetivos	Ver Tabla 2-3

Fuente: Autor

En la Tabla 2-3, se detalla las fases de investigación con los respectivos instrumentos, para alcanzar los objetivos propuestos en el presente estudio.

Tabla 2-3: Fases de la investigación

PROCEDIMIENTO O FASES DE LA INVESTIGACIÓN	INSTRUMENTOS DE INVESTIGACIÓN
Modelado del prototipo	Software de diseño CAD
Seleccionar el tipo de polímero más adecuado para imprimir el elemento o modelo, de tal forma que se adapte mejor al proceso.	Impresora 3D
Analizar la mejor opción de químico reaccionante, que facilite el proceso de desintegración química y térmica del modelo polimérico y a través de esto optimizar el acabado superficial del elemento.	Investigaciones previas, Papers y bibliografía
Fundición en arena	Molde Horno de fundición
Determinar los parámetros de temperaturas más óptimas para la extracción del modelo polimérico.	Mufla Investigaciones realizadas
Determinar la diferencia de tiempos y resultados entre el método tradicional de fundición con el método innovador.	Análisis de resultados

Fuente: Autor

3.1.1. Modelado del prototipo y análisis de los materiales para la impresión 3D.

3.1.1.1. Modelado del prototipo.

Para el desarrollo de la presente investigación, se eligió modelar una hélice conocida también como rotor o turbina, compuesta por seis hélices, este dispositivo mecánico está compuesto por un eje y alrededor de él se acoplan las palas, alabes o aspas de forma concéntrica. Los álabes son de forma curva, misma que provoca una diferencia de velocidades, debido al desnivel de las caras cuando estas entran en contacto con un fluido, su función es convertir la fuerza que produce un motor, en impulso para mover a una embarcación. (Ecured, n.d.)

Este elemento es de mucha utilidad, ya que tiene una amplia aplicación en diferentes campos como, compresión de fluidos, refrigeración, se puede construir incluso un mini generador hidráulico entre otras. Se eligió este elemento de máquina debido a la complejidad que presenta su forma, por tanto, si se lo fabrica por el método de fundición convencional, el tiempo de obtención es prolongado y más aún si se tratase de una producción en serie. La hélice se modeló usando la tecnología que hoy en día está revolucionando el diseño CAD, como lo es el software SolidWorks. En la Figura 1-3b se observa la hélice modelada.

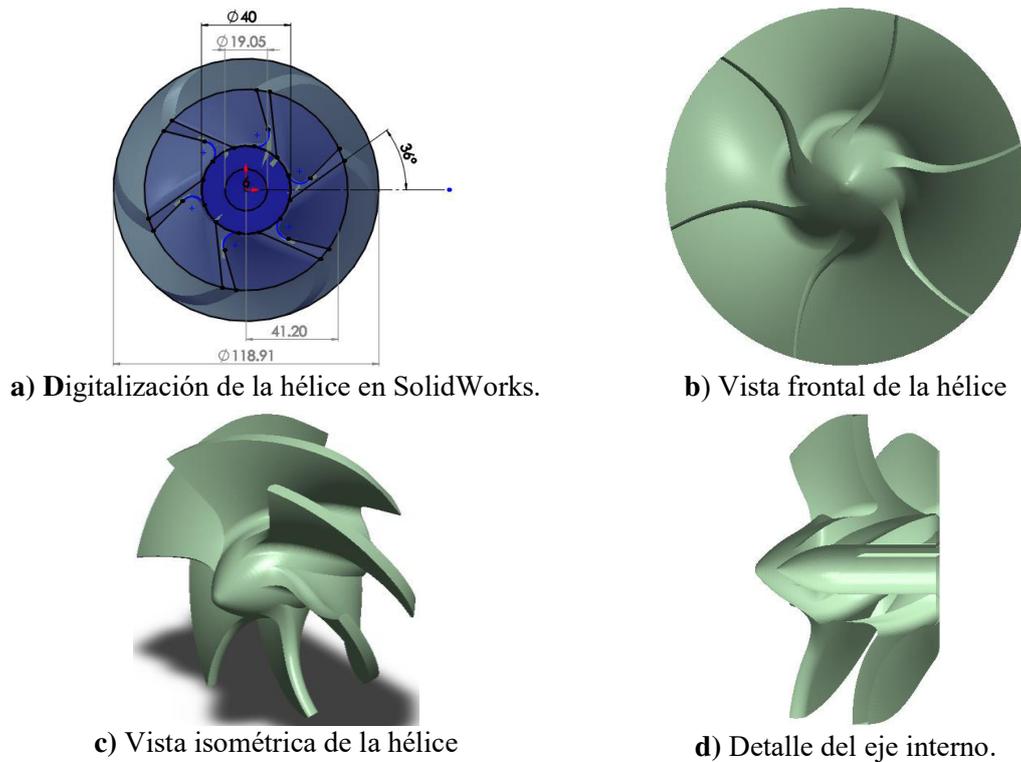


Figura 1-3: Modelado Hélice en SolidWorks
Fuente: Autor

Posterior al modelado en SolidWorks se guarda en un archivo con extensión “.Stl”, para transferirlo a un software de aplicación 3D, donde se realiza la configuración de los códigos para su respectiva impresión, como se muestra en la Figura 2-3.

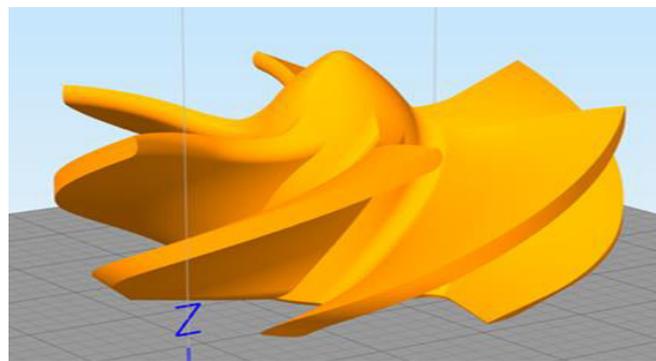


Figura 2-3: Adecuación de la hélice en el software de impresión 3D
Fuente: Autor

3.1.1.2. Análisis de los materiales para la impresión 3D.

Una vez obtenido el archivo con el modelo listo, se procedió al análisis de los materiales para la impresión, dentro del mercado nacional los materiales que se encuentran disponibles para impresión 3D son: ABS, PETG y PLA.

3.1.2. Selección del tipo de polímero para la impresión del elemento o modelo.

En base al análisis de los materiales existentes en el mercado nacional para impresiones 3D, se resume en la Tabla 3-3, los rangos de las características más sobresalientes que influyen directamente en la selección del polímero que mejor se ajusta al proceso.

Tabla 3-3: Rangos térmicos resumidos de cada polímero utilizado para impresión 3D

Características	Materiales		
	ABS	PETG	PLA
Precio	20\$	25\$	20\$
Rango de fusión	(95-105) °C.	(240-250)°C	180°C
Descomposición térmica	300°C	270°C	250°C
Ecológico	0%	0%	100%

Fuente (Printalot, 2017), (TRD, 2019)

La temperatura de descomposición térmica es un parámetro predominante para seleccionar el material. Por ende, el polímero más adecuado es el PLA. Como se observa en la Tabla 3-3, este tiene una mayor factibilidad de descomposición térmica debido a que presenta la menor temperatura para lograrlo. En base a los materiales mencionados anteriormente, que se pueden utilizar para la impresión del modelo polimérico, el PLA se seleccionó de acuerdo a la valoración establecida en la Tabla 4-3.

Tabla 4-3: Consideraciones de selección del material

Características	Valoración Máxima (3) Valoración Mínima (1)	Materiales		
		ABS	PETG	PLA
Precio	3	3	1	3
Rango de fusión	3	3	1	2
Descomposición térmica	3	1	2	3
Ecológico	3	1	1	3
Total	12	8	5	11

Fuente: Autor

Como se muestra en la Tabla 4-3, el material que obtuvo la mayor valoración es el PLA, ya que cumple con características que nos permitirán alcanzar el objetivo del presente estudio, por ejemplo, el no presentar elevada resistencia a altas temperaturas, nos favorece a que se descomponga térmicamente, cuando este sea sometido a las diferentes temperaturas

experimentales y como consecuencia de esto obtener la cavidad del molde, donde será posteriormente vertido el aluminio fundido, además que este material es barato y biodegradable.

3.1.3. Impresión del elemento o modelo haciendo uso de una impresora Anet A8.

Mediante un software de impresión 3D se envió a la impresora y una vez terminado el proceso, se visualizó en los datos del software que fueron necesarios 44.426m de filamento PLA y un tiempo de impresión de 02h00 para un solo modelo polimérico, como se muestra en la Figura 3-3.

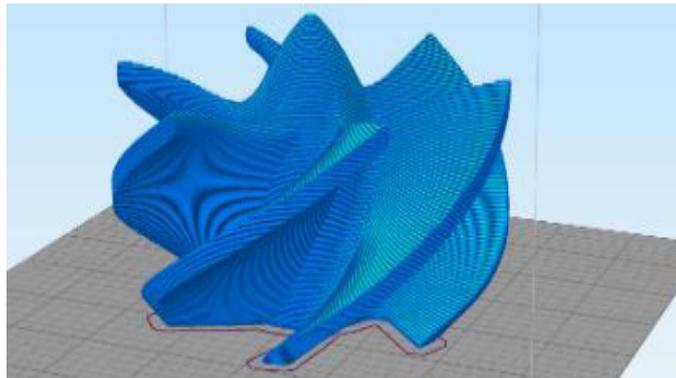


Figura 3-3: Tiempos de impresión
Fuente: Autor

En la Figura 4-3a, se puede apreciar el inicio de la impresión de la hélice en filamento de color rojo. Una vez finalizado el tiempo de impresión, se obtuvo los modelos que se muestran en la Figura 4-3b, mismos que fueron utilizados para realizar pruebas individuales en el desarrollo de cada estudio experimental.



a) Comienzo de la impresión de la hélice en 3D



b) Hélices terminadas

Figura 4-3: Impresión de hélice en PLA
Fuente: Autor

3.1.4. Aplicación del químico reaccionante, en la superficie del modelo polimérico.

En base a investigaciones publicadas que hacen referencia a la descomposición térmica y química del PLA, se eligió utilizar el cloroformo como químico reaccionante para este fin. El cloroformo es aplicado tres veces sobre toda la superficie de la hélice, durante cuatro minutos por cada aplicación, hasta alcanzar un espesor aproximado de 0.5mm, la cantidad de líquido es dependiente del volumen de la pieza, luego se deja secar completamente durante 15 minutos. Ver Figura 5-3.



a) Cloroformo



b) Aplicación de cloroformo sobre las superficies

Figura 5-3: Aplicación de Cloroformo

Fuente: Autor

3.1.5. Diseño de la mazarota.

Utilizando la ecuación (18) y con los datos conocidos, se determinó el volumen mínimo necesario, que debe tener la mazarota para contrarrestar el efecto de contracción volumétrica, que se produce en el metal fundido, como se muestra a continuación. (Salueña Berna & Napoles Alberro, 2000)

$$V_{MIN\ MAZA} = V_{Pieza(partes\ gruesas)} * c * k$$

Donde:

$V_{MIN\ MAZA}$ = Volumen mínimo de la mazarota (cm^3)

$V_{Pieza(partes\ gruesas)}$ = $157.387cm^3$ (Determinado mediante software CAD)

c = Contracción volumétrica (7% para aluminio)

$k = 2$

Desarrollando el cálculo se tiene que:

$$V_{MIN\ MAZA} = 157.387cm^3 * 7\% * 2$$

$$V_{MIN\ MAZA} = 22.034cm^3$$

El volumen mínimo de la mazarota para contrarrestar el efecto de contracción volumétrica de la hélice es de $22.034cm^3$, con este dato obtenido y conociendo la altura disponible ($h = 60\ mm$) entre la superficie de la hélice y el borde de la caja de arena, como se muestra en la Figura 6-3, el volumen de la mazarota cilíndrica viene dado por:

$$V = \pi r^2 h$$

$$22cm^3 = \pi r^2 (6cm)$$

$$r = 1.080cm$$

Por tanto:

$$D = 2 * r = 2.161cm = 21.610mm \approx 22mm$$

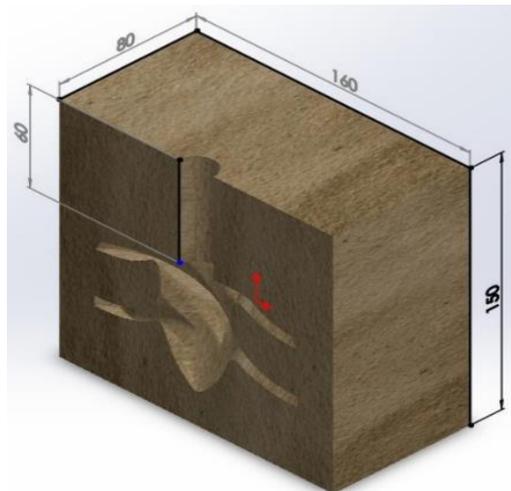


Figura 6-3: Altura disponible para el diseño de la mazarota
Fuente: Autor

Por tanto, las dimensiones de la mazarota serán de 60mm de altura por 22mm de diámetro.

3.1.6. *Diseño del canal de alimentación.*

La mazarota que ya fue diseñada, servirá también como canal de alimentación. El canal de alimentación se modeló, en base a las dimensiones calculadas para el diseño de la mazarota y luego se imprimió con material PLA, como se muestra en la Figura 7-3.

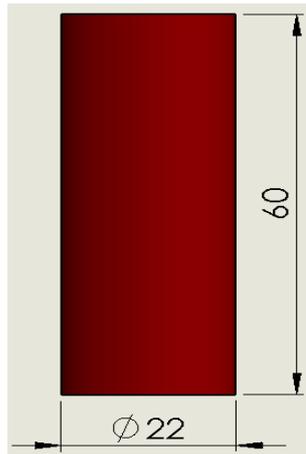


Figura 7-3: Dimensiones del canal de alimentación
Fuente: Autor

3.1.7. Preparación de la arena para la fundición.

Antes de la preparación de la arena se realizaron los ensayos respectivos de la misma, en el laboratorio de fundición de la facultad de mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, considerando los conceptos, formulas y desarrollo descrito en la sección 2.2.1.1, como se indica a continuación:

- Ensayo de granulometría

La muestra de arena seleccionada se coloca en el tamiz superior y mediante la vibración que ejerce la máquina, esta se hace pasar por los demás tamices como se indica en la Figura 8-3.



Figura 8-3: Ensayo de granulometría
Fuente: Laboratorio de mecánica ESPOCH

Tabla 5-3: Datos obtenidos

Número de cedazo	Factor α	Peso de la muestra p(gr)	P* α
4	6	0.82	4.92
6	9	3.31	29.79
10	17	9.15	155.55
16	31	10.12	313.72
20	41	12.7	520.70
30	52	19.7	1024.40
40	71	16.55	1175.05
60	103	14.5	1493.50
80	140	4.85	679
100	186	4.5	837
Fondo	281	3.8	1067.80
Total		100	

Fuente: Laboratorio de mecánica ESPOCH

Para minimizar el cálculo se toma los valores resultantes de ($p_1 * \alpha_1$) de la Tabla 5-3, para realizar la sumatoria respectiva aplicando la ecuación (1) y dividirlo entre 100gr que resolviendo esto se tiene:

$$i = \frac{p_1 * \alpha_1 + p_2 * \alpha_2 + p_3 * \alpha_3 + \dots}{p}$$

$$i = \frac{4.92 + 29.79 + 155.55 + 313.72 + 520.7 + 1024.4 + 1175.05 + 1493.5 + 679 + 837 + 1067.8}{100}$$

$$i = \frac{7301.43}{100} = 73.014$$

El valor obtenido al ser comparado con la Tabla 4-2, se encuentra en un rango de $150 > \text{Índice AFS} < 60$, esto indica que es una arena fina, con rango de tamaño de grano de 0.1- 0.25mm.

➤ Ensayo de humedad

Aplicando la ecuación (2), se calcula la humedad de la arena, sabiendo que la muestra inicial es 100 gramos y después de esta ser sometida al secado a temperatura ambiente, presenta un peso de 93 gramos.

$$\%h = \frac{P_i - P_f}{P_i} * 100$$

$$\%h = \frac{100\text{gr} - 93\text{gr}}{100\text{gr}} * 100 = 7\%$$

➤ Ensayo de permeabilidad

Datos:

$$p=8.5\text{cmH}_2\text{O}=8.78\frac{\text{g}}{\text{cm}^2}$$

$$t=50\text{s}$$

$$V= 2000\text{cm}^3$$

$$h=50.8\text{cm}$$

$$A=20.268\text{cm}^2$$

Conociendo los datos y aplicando la fórmula (3) se tiene:

$$P = \frac{V * h}{p * A * t}$$

$$P = \frac{2000\text{cm}^3 * 50.8\text{cm}}{8.78\frac{\text{g}}{\text{cm}^2} * 20.268\text{cm}^2 * 50\text{s}}$$

$$P = 11.418\frac{\text{cm}^4}{\text{g} * \text{s}}$$

➤ Ensayo de compresión

Datos:

Peso de la granalla = 513.2 gr

Peso del recipiente = 320.1 gr

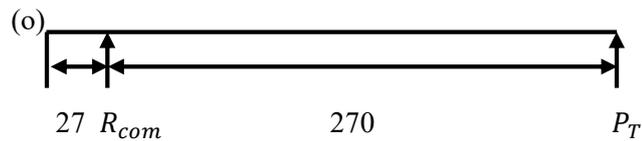
Peso Total = Peso de la granalla +Peso del recipiente = 513.2gr+320.1gr=833.3 gr = 0.833 Kg.



Figura 9-3: Ensayo de compresión
Fuente: Autor

Utilizando la ecuación (5), se realiza una sumatoria de momentos respecto al punto (o), como se indica en el diagrama de cuerpo libre (DCL), para calcular la fuerza de resistencia a la compresión.

DCL:



$$\Sigma Mo = 0$$

$$P_T * 297\text{mm} + R_{com} * 27\text{mm} = 0$$

$$0.833\text{kg} * 297\text{mm} + R_{com} * 27\text{mm} = 0$$

$$R_{com} = 9.166\text{kg}$$

Aplicando la ecuación (6) se obtiene el área de la tapa porta probeta

$$Area = \frac{\pi}{4} (5.08\text{cm})^2 = 20.268\text{cm}^2$$

Mediante la ecuación (7), se calcula el esfuerzo de compresión que soporta la probeta.

$$\sigma = \frac{R_{com}}{A} = \frac{9.166kg}{20.268cm^2} = 0.452 \frac{kg}{cm^2} = 4.434 \frac{N}{cm^2}$$

➤ Ensayo de corte:

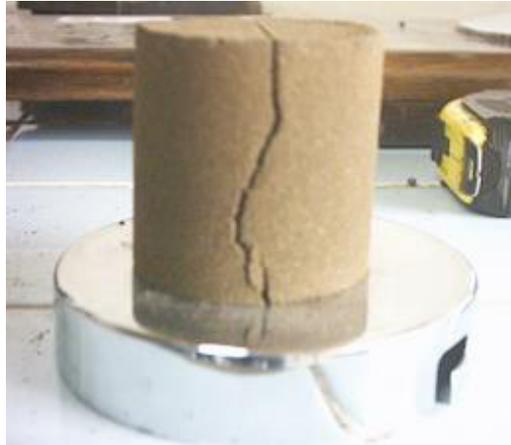


Figura 10-3: Ensayo de corte
Fuente: Autor

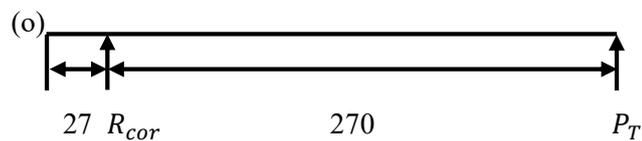
Peso de la granalla = 175.7gr

Peso del recipiente = 36.4 gr

Peso Total = Peso de la granalla + Peso del recipiente

Peso Total = 175.7gr+36.4gr = 212.1 gr = 0.212Kg.

Nuevamente se aplica la formula (5), para realizar una sumatoria de momentos respecto al punto (o), para calcular la fuerza de resistencia al corte como se muestra en el diagrama de cuerpo libre.



$$\Sigma M_o = 0$$

$$P_T * 297mm + R_{cor} * 27mm = 0$$

$$0.212kg * 297mm + R_{cor} * 27mm = 0$$

$$R_{cor} = 2.332kg$$

Aplicando la ecuación (8), se calcula el área de la tapa para ensayo de corte.

$$\text{Area} = b * h = 5,08\text{cm} * 5\text{cm} = 25.4\text{cm}^2$$

Mediante la ecuación (9), se calcula el esfuerzo de corte de la probeta.

$$\tau = \frac{R_{\text{cor}}}{\text{Area}} = \frac{2.332\text{kg}}{25.4\text{cm}^2} = 0.092 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} = 0.899 \frac{N}{\text{cm}^2}$$

En la Tabla 6-3, se muestra un resumen de los valores obtenidos en cada ensayo,

Tabla 6-3: Valores obtenidos en cada ensayo

Tipo de ensayo	Valor
Granulometría	73.014
Humedad	7%
Permeabilidad	$11.418 \frac{\text{cm}^4}{\text{g} * \text{s}}$
Compresión	$4.434 \frac{N}{\text{cm}^2}$
Corte	$0.899 \frac{N}{\text{cm}^2}$

Fuente: Autor

Estos resultados se comparan con los valores recomendados en la Tabla 7-3, donde se indica las características y propiedades de las tierras de moldeo en función de su aplicación, para verificar que los mismos se aproximan o están dentro del rango sugerido.

Tabla 7-3: Características y propiedades de las tierras de moldeo

TIPO DE ALEACIÓN	Humedad (%)	Permeabilidad	Resistencia a la Compresión ($\frac{N}{\text{cm}^2}$)	Arcilla y polvo (%)	Índice de Finura
Aluminio	6.5 – 8.5	7.0 – 13	4.56 – 5.27	12 – 18	225 – 160
Latón – Bronce	6.0 – 8.0	13 – 20	4.92 – 5.62	12 – 14	150 – 140
Cobre – Níquel	6.0 – 7.5	37 – 50	4.56 – 5.62	12 – 14	130 – 120
Fundición Gris (Lastre ⁶)	6.5 – 8.5	10 – 15	4.21 – 5.27	10 – 12	200 – 180
Fundición Gris (Piezas Complejas)	6.0 – 7.5	18 – 25	4.35 – 5.27	12 – 14	120 – 87
Piezas medianas de F. gris (tierra natural)	5.5 – 7.0	40 – 60	5.27 – 5.62	11 – 14	86 – 70
Piezas medianas de F. gris (tierra sintética)	4.0 – 6.0	50 – 80	5.27 – 5.97	4 – 10	75 – 55
Piezas pesadas de F. gris (en verde y en seco)	4.0 – 6.5	80 – 120	3.15 – 5.27	8 – 13	61 – 50
Piezas ligeras de F. maleable.	6.0 – 8.0	20 – 30	4.56 – 5.27	8 – 13	120 – 92
Piezas pesadas de F. maleable	5.5 – 7.5	40 – 60	4.56 – 5.27	8 – 13	85 – 70
Piezas ligeras de acero (tierra en verde)	2.0 – 4.0	125 – 200	4.56 – 5.27	4 – 10	56 – 45

Fuente: (Ordinola Castillo, 2011)

Comparando los valores de la Tabla 6-3, respecto a los valores sugeridos en la Tabla 7-3, se puede observar en el recuadro marcado de rojo para un tipo de aleación de aluminio, que el porcentaje de humedad obtenido (7%), está dentro del rango (6.5-8.5) %, el resultado de permeabilidad $11.418 \frac{\text{cm}^4}{\text{g*s}}$, está en el rango de (7.0-13), el valor de la resistencia a la compresión se aproxima al rango de $(4.56-5.27) \frac{\text{N}}{\text{cm}^2}$ y para el valor de resistencia al corte se compara el valor obtenido de $0.899 \frac{\text{N}}{\text{cm}^2}$, con la curva de la Figura 11-3, como el porcentaje de humedad es 7%, se aproxima al rango de $(3.5-4.2) \text{Psi} = (2.413-2.896) \frac{\text{N}}{\text{cm}^2}$.

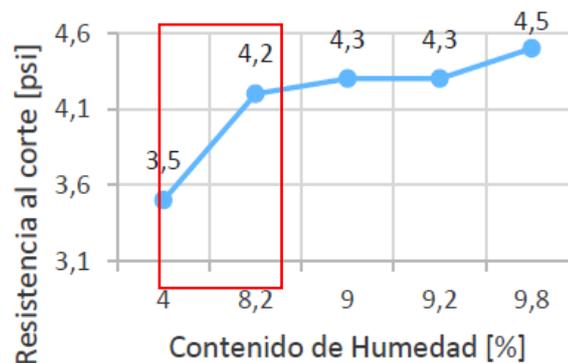


Figura 11-3: Ensayo de corte
Fuente: (Pallo Morocho & Valdivieso Godoy, 2018)

De estos valores obtenidos en los ensayos y validados respectivamente, se partió como una referencia para aplicar y desarrollar el diseño del método propuesto en el presente estudio, siendo el resultado más relevante, el resultado del ensayo de granulometría ya que de esto depende obtener un buen acabado superficial en la pieza fundida, los valores obtenidos en el ensayo de humedad, permeabilidad, compresión y corte son válidos para el proceso de fundición tradicional por lo que estos valores se descartan para el desarrollo del estudio mencionado, ya que este se realiza a temperaturas superiores a 250°C y a esta temperatura el molde de arena pierde humedad, permeabilidad y se vuelve completamente rígido como ladrillo.

Posterior a las impresiones de las hélices y ensayos de arena, se procedió a la preparación de la misma para crear el molde, en la Tabla 8-3, se muestran las cantidades de los materiales utilizados para realizar esta mezcla, cave recalcar que estas cantidades corresponden, solo para la elaboración de una probeta de estudio. Los porcentajes de los materiales son experimentales, pero se tomó como referencia recomendaciones descritas en la sección 2.2.1 del capítulo II, que recomienda un 85% de Sílice y de (5 a 10) % de bentonita, que para este estudio se tomó 15% experimental.

Se compró 20lb de bentonita y 20 libras de sílice, que representan el 100% de cada una, aplicando una regla de tres y tomando en consideración los porcentajes recomendados, calculamos cuantas libras es necesario tanto de bentonita como de sílice, como se indica a continuación.

- Cantidad de arena sílice

20lb de arena sílice 100%

X 85%

X = 17 lb de sílice

Es necesario 17lb de sílice de acuerdo a la recomendación

- Cantidad de arena bentonita

20lb de arena bentonita 100%

X 15%

X = 3lb de bentonita

En base al porcentaje experimental asumido es necesario 3lb de arena bentonita

Tabla 8-3: Composición de la arena utilizada para el molde

Material	Característica	Porcentaje	Cantidad
Arena Bentonita	Optimiza el acabado superficial	Recomendado 5 a 10% Experimental (5 a 15 %)	3 lb
Arena Sílice (SiO ₂)	Mayor resistencia a la temperatura	85%	17 lb
Agua (H ₂ O)	Facilita la cohesión	Recomendado 100ml	100ml

Fuente: (Autor), (Chachapoya Guevara & Garcia Mendoza, 2019)

Se mezclan los materiales que se muestran en la Figura 12-3, con las cantidades indicadas en la Tabla 8-3, a esta mezcla se le añade paulatinamente la cantidad base de agua sugerida de 100ml, hasta conseguir una consistencia de baja viscosidad, tal que se adhiera con facilidad a las superficies y tome la forma exacta, hasta de los detalles más mínimos del modelo polimérico.

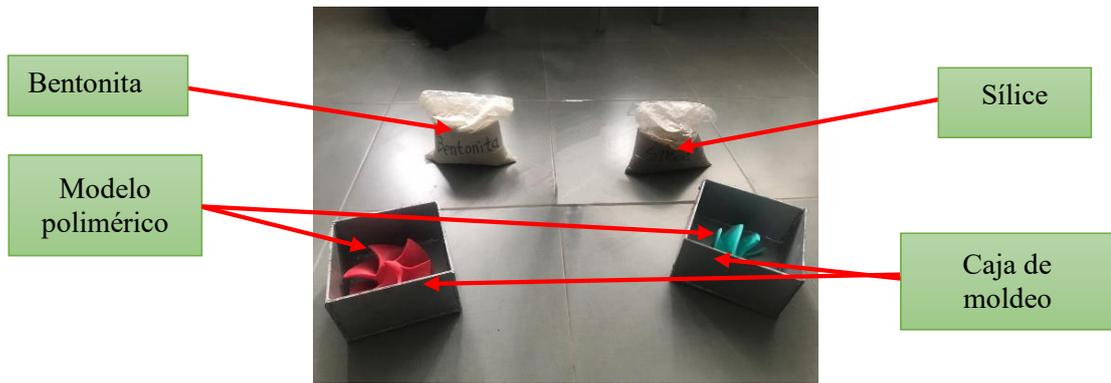


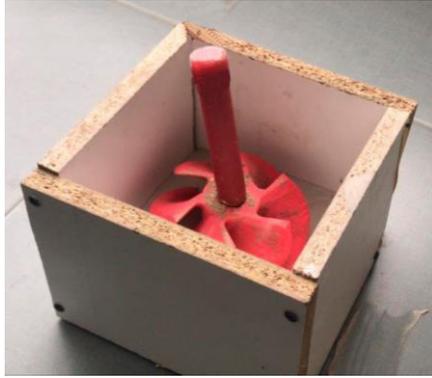
Figura 12-3: Materiales para la fundición
Fuente: Autor

La caja de moldeo que se indica en la Figura 13-3, se adaptó de acuerdo al volumen del modelo polimérico para evitar desperdicios de material, con medidas de 16cm de ancho, por 16cm de largo y 15cm de altura, estas dimensiones nos dan un volumen suficiente para abarcar la cantidad de arena necesaria, que produzca tanto en su interior como en su exterior un molde resistente, compacto y confiable, capaz de soportar sin ningún inconveniente el proceso del vertido de aluminio y la solidificación.



Figura 13-3: Caja porta molde (16x16x15) cm
Fuente: Autor

Posteriormente se coloca el modelo polimérico preparado previamente en la caja, como se muestra en la Figura 14-3a y se completa el volumen faltante del cubo, añadiéndole más mezcla de arena, hasta llenarlo por completo, como se puede observar en la Figura 14-3b.



a) Inserción de modelo polimérico en caja de madera



b) Moldes obtenidos para el estudio

Figura 14-3: Elaboración de molde de arena

Fuente: Autor

Por último, se sometió todo el conjunto, a una leve vibración manual para evacuar las burbujas generadas durante la mezcla, quedando la probeta lista para que se pueda secar a una temperatura ambiente.

3.1.8. Cálculo previo al proceso de fundición.

Ya con las probetas listas para ser sometidas al estudio experimental, se procedió a estimar los parámetros de: vertido del aluminio, tasa volumétrica y tiempo requerido para llenar la cavidad del molde.

➤ Cálculo para el vertido del aluminio en el molde

Conociendo la altura disponible, se calcula la velocidad de vertido del aluminio, utilizando la fórmula (11).

$$h_1 = \frac{v_2^2}{2g}$$

Despejando la velocidad de flujo de esta fórmula se tiene:

$$v = \sqrt{2gh}$$

Puesto que:

$$h_1 = 0.06m$$

$$g = 9.8 \frac{m}{s^2}$$

Sustituyendo estos valores y resolviendo:

$$v = \sqrt{2(9.8)(0.06)}$$

$$v = 1.084 \frac{m}{s}$$

La velocidad de flujo a la que debe ser vertido el aluminio es de $1.084 \frac{m}{s}$

➤ Cálculo de la tasa volumétrica

Se calcula la tasa de flujo volumétrico aplicando la formula (12), sabiendo que esta permanece constante a través del líquido:

$$Q = v_1 A_1$$

Si:

$$v = 1.084 \frac{m}{s}$$

Se aplica la formula (13), para determinar el área de la sección transversal de la base.

$$A_1 = \pi r^2$$

$$A_1 = \pi(0.011m)^2$$

$$A_1 = 3.801 \times 10^{-4} m^2$$

Sustituyendo valores se tiene:

$$Q = (1.084 \frac{m}{s})(3.801 \times 10^{-4} m^2)$$

$$Q = 4.121 \times 10^{-4} \frac{m^3}{s}$$

La tasa de flujo volumétrico es de $4.121 \times 10^{-4} \frac{m^3}{s}$

➤ Tiempo requerido para llenar la cavidad de un molde

El tiempo de llenado del molde es calculado mediante la ecuación (14)

$$T_{MF} = \frac{V}{Q}$$

Entonces:

$$V = 157.387 \text{ cm}^3 = 1.57 \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

$$Q = \text{Gasto volumétrico} = 4.121 \times 10^{-4} \frac{m^3}{s}$$

Sustituyendo valores se tiene

$$T_{MF} = \frac{1.57 \times 10^{-4} \text{ m}^3}{4.121 \times 10^{-4} \frac{m^3}{s}}$$

$$T_{MF} = 0.381 \text{ s}$$

Es necesario 0.381s para llenar la cavidad del molde.

➤ Tiempo de solidificación

El tiempo de solidificación se calcula aplicando la formula (15) y considerando el criterio recomendado para el valor de C_m el cual es, basarse en datos experimentales efectuados anteriormente mediante el empleo de un mismo material, metal, molde y temperatura de vertido, en base a esto, para este cálculo se considera un valor experimental de fundición de aluminio de $C_m = 2.0 \frac{s}{mm^2}$, dato considerado del ejercicio 10.17 de Mikell P. Groover tercera edición.

$$T_{Ts} = C_m \left(\frac{V}{A}\right)^n$$

Donde:

$$V = 1.57 \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

$$A = 0.052 \text{ m}^2$$

$$n = 2$$

$$C_m = 2.0 \frac{\text{min}}{\text{mm}^2} = 33333.333 \frac{\text{min}}{\text{m}^2}$$

Reemplazando datos:

$$T_{Ts} = 33333.333 \frac{\text{min}}{\text{m}^2} \left(\frac{1.57 \times 10^{-4} \text{ m}^3}{0.052 \text{ m}^2}\right)^2$$

$$T_{Ts} = 0.304 \text{ min} = 18.232 \text{ s}$$

3.1.9. Determinación de temperaturas para la extracción del modelo polimérico.

Una vez que la mezcla de arena se solidifica completamente, se procedió cuidadosamente a la liberación del cubo de la caja como se aprecia en la Figura 15-3.



Figura 15-3: Liberación del cubo de la caja para la fundición
Fuente: Autor

Luego se insertó el molde en la mufla como se muestra en la Figura 16-3.y se incrementó progresivamente la temperatura de la mufla, a una velocidad de calentamiento recomendada para ensayos de humedad, la que indica que debe tener una variación de temperatura constante de un $\pm 5\%$, para un tiempo máximo de secado de 15 minutos, cómo se describe en la sección 2.2.1.1, en base a esto se calibra la mufla a una velocidad experimental de, $10^{\circ}\text{C}/5\text{min}$, para que la probeta se vaya secando progresivamente en este intervalo de tiempo y así evitar daños en la mufla, hasta alcanzar 300°C , que es el punto de desintegración del PLA, en un tiempo de 150min.



Figura 16-3: Inserción del modelo polimérico en la mufla
Fuente: Autor

Cuando la mufla alcanza una temperatura de 250°C , el modelo polimérico empieza a entrar en un proceso de descomposición, iniciando la reacción con el cloroformo previamente aplicado por todas las superficies del modelo polimérico. EL proceso sigue la siguiente secuencia, primero se va diluyendo progresivamente el material del modelo polimérico PLA, hasta pasar a un estado completamente líquido y por último se va evaporando paulatinamente a través del canal de alimentación, desintegrándose completamente y quedando solo la cavidad con la forma del modelo polimérico, como se aprecia en la Figura 17-3, que nos muestra las superficies internas y parte de la descomposición del material polimérico PLA.

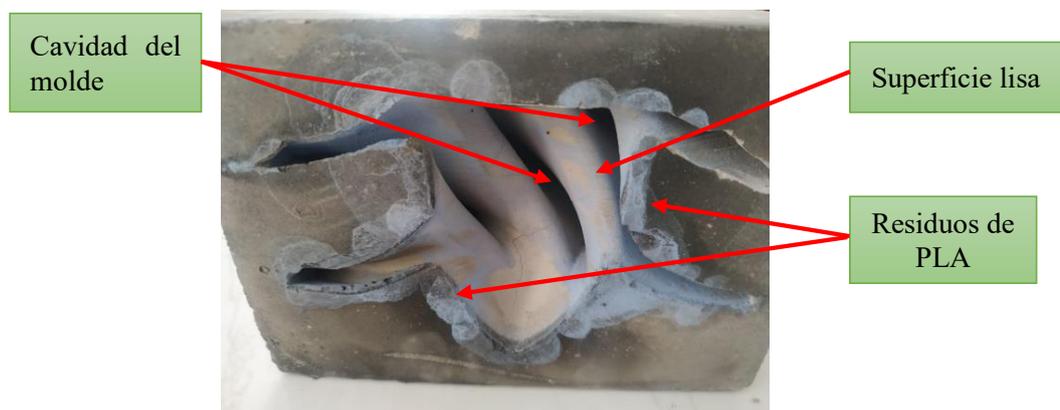


Figura 17-3: Sección transversal del molde.
Fuente: Autor

En el esquema de la Figura 18-3, se indica de una forma más detallada el proceso de la descomposición del modelo polimérico.

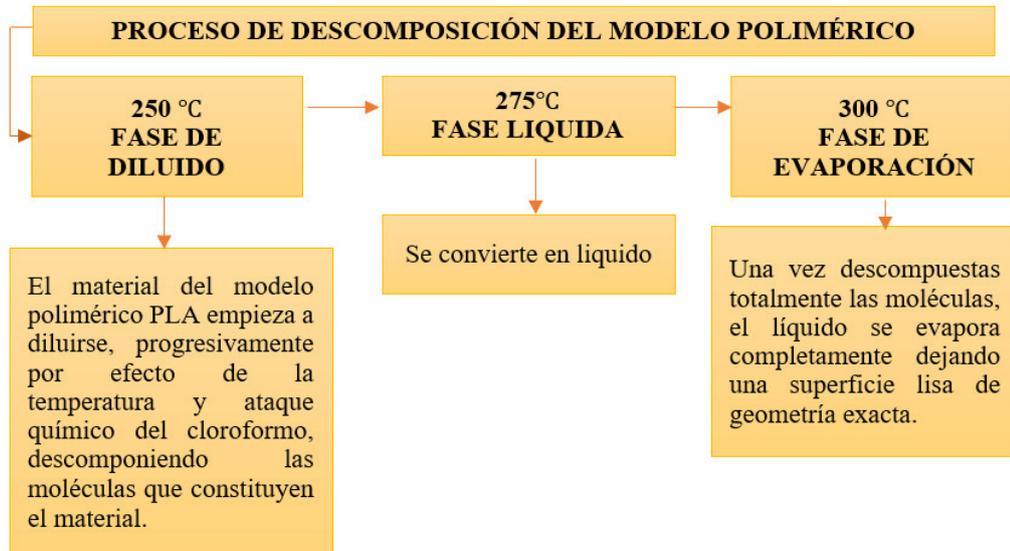


Figura 18-3: Proceso de descomposición del modelo polimérico
Fuente: Autor

3.1.10. Fundición del aluminio.

Se adquirieron tres lingotes de duraluminio con 95% de aluminio y 1.140 lb de peso como se indica en la Figura 19-3, equivalente a 0.517 kg por unidad, este valor multiplicado por tres es de 1.551kg de masa que corresponde a la carga metálica a fundir.



Figura 19-3: Peso del lingote de aluminio
Fuente: Autor

Utilizando la formula (10) y asumiendo el valor recomendado de rangos típicos de aplicación de fundentes para limpieza en polvo que es de 0.12% de la Tabla 8-2, se calcula el consumo de fundente total de bórax, necesario para aplicar a la capacidad total de carga metálica que posee el horno de fundición la misma que es de 50kg.

$$QK = \frac{(Q)(X)}{100}$$

$$Q(\text{Borax}) = \frac{(50\text{kg})(0.12)}{100}$$

$$Q(\text{Borax}) = 0.060\text{kg}$$

Con este valor conocido se aplica una regla de tres, para saber qué cantidad de fundente es necesario aplicar en nuestra carga metálica, sabiendo que esta es de 0.517kg por unidad multiplicada por tres lingotes a fundir es igual a 1.551 kg

50kg de carga metálica de capacidad del horno 0.060kg de bórax

1.551 kg de carga metálica a fundir X

Resolviendo se tiene que:

$$X = 0.002\text{kg de bórax} = 1.861\text{g} \approx 2\text{g}$$

En porcentaje tendríamos la siguiente relación

0.060kg de bórax 100%

0.002kg de bórax X

$$X = 0.033\%$$

Utilizando la formula anterior y tomando en consideración el rango típico de fundentes para fusión de la Tabla 8-2, se consideró un valor medio de 2,5%, para el cálculo del consumo de fundente de fusión.

$$Q(\text{fusión}) = \frac{(50\text{kg})(2.5)}{100}$$

$$Q(\text{fusión}) = 1.250\text{kg}$$

Aplicando nuevamente regla de tres se obtiene:

50kg de capacidad de carga metálica del horno 1.250kg de fusión

1.551 kg de carga metálica a fundir X

$$X = 0.039 \text{kg de fundente de fusión} = 38.775 \text{g}$$

En porcentaje se tiene:

1.250kg de fundente de fusión 100%

0.039kg de fundente de fusión X

$$X = 3.120\%$$

Se extrae el molde de arena a 100°C de la mufla, para evitar la desintegración del mismo y minimizar el choque térmico entre el molde y el aluminio fundido, como se muestra en la Figura 20-3.



Figura 20-3: Extracción del molde de la mufla
Fuente: Autor

Los lingotes fueron fundidos a una temperatura de 800°C. como se aprecia en la Figura 21-3. La temperatura de fundición es superior a la de fundición normal del aluminio 660°C, esto permitirá una menor viscosidad y tiempo suficiente para que pueda penetrar a todas las áreas de difícil acceso antes de su enfriamiento y consecuentemente su solidificación.



Figura 21-3: Aluminio fundido
Fuente: Autor

Una vez que el aluminio está en su estado líquido, se agrega las cantidades anteriormente calculadas de fundentes. Donde el bórax se encarga de disolver impurezas en el metal líquido y el fundente de fusión se encarga de disolver chatarras ligeras, optimizando de esta manera el líquido fundido y mediante esto obtener un buen resultado en la pieza fundida.

Posterior a esto se procedió a la inserción del aluminio fundido, a través del canal de alimentación como se indica en la Figura 22-3, considerando los parámetros calculados anteriormente como velocidad de fundido, tiempo de llenado en el molde, caudal y tiempo de solidificación. Una vez vertido el aluminio se deja enfriar la fundición hasta que se solidifique completamente (aproximadamente 0.043min).



Figura 22-3: Vertido del aluminio en el molde
Fuente: Autor

Una vez enfriada y solidificada la fundición, se procedió a su liberación con una herramienta manual, retirando poco a poco la arena compactada del molde, hasta obtener el elemento fundido, como se muestra en la Figura 23-3.



Figura 23-3: Liberación de la hélice fundida
Fuente: Autor

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Resultados

A continuación, se describen los estudios experimentales realizados, en base a diferentes parámetros de trabajo, como: Aplicación de cloroformo, temperatura de fundición del aluminio, temperatura de extracción del modelo polimérico, temperatura de extracción del molde de la mufla, hasta llegar a la obtención de un elemento fundido de calidad.

Tabla 1-4: Estudio experimental N°1

Parámetros	
<ul style="list-style-type: none">• No se aplicó Cloroformo en el modelo polimérico• Temperatura de fundición del aluminio = 660.3°C• Temperatura de extracción del modelo polimérico = 200°C• Temperatura de extracción del molde de la mufla = 20°C	
<p>Resultado: En la Figura 1-4, se puede observar que posee algunas partes de excelente acabado superficial y otras partes incompletas.</p>	
	
<p>Figura 1-4: Pieza fundida con partes incompletas Fuente: Autor</p>	
<p>Defectos:</p> <p>A: Superficie incompleta, esto se debe a que no se aplicó cloroformo en la superficie del modelo polimérico.</p> <p>B: Llenados incompletos. Debido a que a 200°C, no se extrajo por completo el modelo polimérico del molde.</p>	

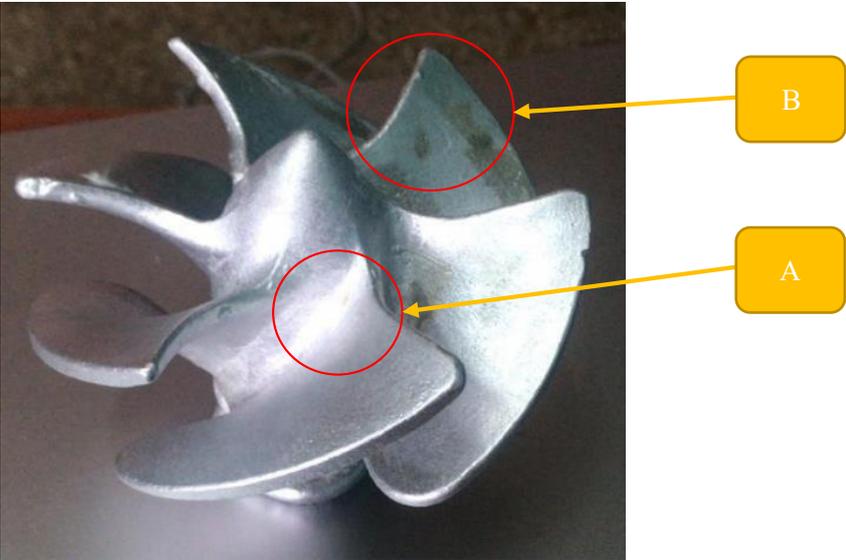
Fuente: Autor

Tabla 2-4: Estudio experimental N°2

Parámetros
<p>Aplicación de cloroformo en la superficie del modelo polimérico</p> <ul style="list-style-type: none">• Temperatura de fundición del aluminio = 700°C• Temperatura de extracción del modelo polimérico = 250°C• Temperatura de extracción del molde de la mufla = 75°C
<p>Resultado: En la Figura 2-4, se puede observar una mejora notable en el elemento fundido, pero aún presenta algunas partes incompletas</p> <div style="text-align: center;"></div> <p>Figura 2-4: Pieza fundida con imperfecciones Fuente: Autor</p> <p>Defectos:</p> <p>A: Geometría incompleta. – Este resultado indica que los parámetros experimentales de temperatura aún no son suficientes para desintegrar totalmente el material polimérico PLA y como consecuencia de esto el material no se diluyó completamente quedando residuos incrustados en algunas partes de la cavidad del molde y formando este tipo de irregularidades.</p>

Fuente: Autor

Tabla 3-4: Estudio experimental N°3

Parámetros
<p>Aplicación de cloroformo en la superficie del modelo polimérico</p> <ul style="list-style-type: none">• Temperatura de fundición del aluminio = 800°C• Temperatura de extracción del modelo polimérico = 300°C• Temperatura de extracción del molde de la mufla = 100°C
<p>Resultado: En base a los estudios anteriores realizados y respecto al estudio experimental dos se incrementó los parámetros de temperatura de fundición de aluminio en 100°C, la temperatura de extracción del modelo polimérico en 50°C y la temperatura de extracción del molde de la mufla en 25°C, con los que se obtuvo ya una pieza de fundición completa sin ningún tipo de irregularidades, como se indica en la Figura 3-4.</p> <div style="text-align: center;"></div> <p>Figura 3-4: Pieza fundida de calidad Fuente: Autor</p> <p>A: Buen acabado superficial</p> <p>Defectos:</p> <p>B: Manchas de hollín en la superficie. – Este defecto es producido por algunos factores como por ejemplo el humo de la fundición y efectos del metal durante el vertido, este defecto se puede corregir sin mucha demora, pasando ligeramente papel abrasivo por toda la superficie hasta removerlas por completo.</p>

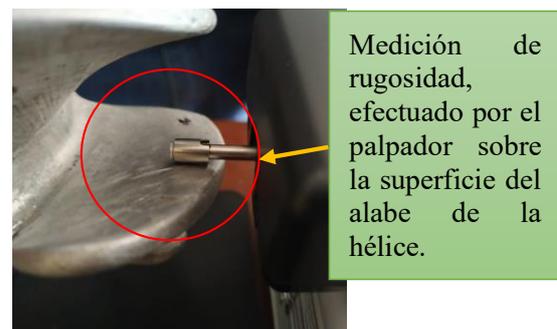
Fuente: Autor

En la Figura 4-4, se puede observar el resultado final de la hélice fundida



Figura 4-4: Acabado superficial obtenido
Fuente: Autor

Una vez obtenidas las hélices fundidas se realizó los ensayos de rugosidad en las probetas de los estudios experimentales, 2 y 3 de la Tabla 2-4 y Tabla 3-4 respectivamente, como se indica en la Figura 5-4a, Figura 1-4b. Cabe recalcar que los resultados superficiales varían, debido a que cada estudio se rige a diferentes parámetros de experimentación, la medición de superficie de los alabes del estudio experimental N°2, se lo realizo directamente tal cual como la pieza fue obtenida de la fundición, pero si previamente fue sometida a una limpieza con una brocha.



Medición de rugosidad, efectuado por el palpador sobre la superficie del alabe de la hélice.

a) Medición de rugosidad de las hélices b) Detalle de la medición

Figura 5-4: Medición de rugosidad de cada alabe de las hélices fundidas
Fuente: Autor

En la Tabla 4-4 se muestran los resultados obtenidos de las superficies frontal (Ver Figura 6-4) y posterior (Ver Figura 7-4), de cada alabe de la hélice.

Tabla 4-4: Valores obtenidos en la hélice del estudio experimental N°2

Número de alabe	$R_a(\mu m)$			
	Valores de rugosidad		Valores de rugosidad	
1	5.786		6.594	
2	9.953		6.340	
3	7.687		4.232	
4	5.462		5.422	
5	3.520		4.632	
6	3.985		4.223	
Total	36.393		31.443	

Fuente: Autor

Aplicando la formula (19) y resumiendo el cálculo en sumatorias totales tanto frontales $R_a = 36.393\mu m$, como posteriores $R_a = 31.443\mu m$, estas se suman y dividen para un valor total de lecturas (n=12), como se indica a continuación:

$$R_a = \frac{a + b + c + d \dots}{n}$$

$$R_a = \frac{(36.393 + 31.443)\mu m}{12}$$

$$R_a = 5.653 \mu m$$

La Tabla 4-4, muestra los datos de rugosidad obtenidos en las superficies de las alabes frontal $R_a = 11.792\mu m$ (Ver Figura 8-4) y posterior $R_a = 18.897\mu m$ (Ver Figura 9-4) de la hélice del estudio experimental N°3, previo a una ligera limpieza con una brocha y papel abrasivo fino.

Para calcular el valor de R_a , se aplicó el mismo procedimiento y formula del cálculo anterior:

Tabla 5-4: Valores obtenidos en la hélice del estudio experimental N°3

Número de alabe	$R_a(\mu m)$			
	Valores de rugosidad		Valores de rugosidad	
1	1.851		3.115	
2	1.213		2.447	
3	1.972		1.507	
4	1.790		3.418	
5	1.750		4.187	
6	3.216		4.223	
Total	11.792		18.897	

Fuente: Autor

$$R_a = \frac{(11.792 + 18.897)\mu m}{12}$$

$$R_a = 2.557 \mu m$$

4.2. Discusión

4.2.1. Diferencia de tiempos y costos, entre el método tradicional e innovador.

➤ Diferencia de tiempos

Normalmente los pasos para el proceso de fundición en arena de cualquier elemento, mediante el método tradicional es el que se muestra en la Figura 10-4.

Mismo que fue desarrollado paso a paso como se detalla en el anexo 2, con la finalidad de evaluar los parámetros que se describen en la Tabla 6-4, para este proceso se consideró los mismos ensayos de arena del método innovador.

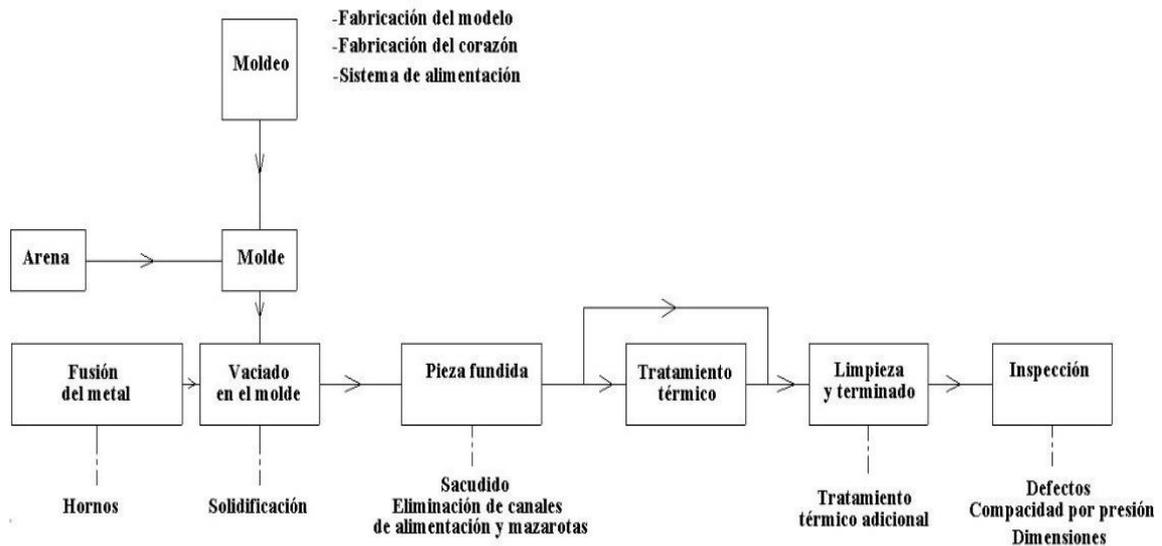


Figura 10-4: Pasos de producción en una operación típica de fundición en arena

Fuente: (Kalpakjian, 2002)

Se inició el proceso con la manufactura de la hélice en madera, extraer el modelo de la arena implicó una tarea imposible debido a la configuración curva de los seis alabes que posee, por lo que estas dañan el modelo impregnado en la arena al realizar la extracción del mismo, por tanto se analizó y optó por realizar una hélice con tres alabes, ya que de esta manera es factible extraer sin dañar el modelo y a parte se manufacturo por separado un alabe, el mismo que sirvió para realizar 3 moldes y al final soldarlas a la hélice.

Debido a las geometrías complejas, para la manufactura de los modelos fue necesario emplear un ebanista, ya que esta persona es hábil para tallar madera y por ende posee amplia experiencia en este campo, el cual trabajando cinco horas diarias durante cuatro días empleo un tiempo total de veinte horas.

Por otro lado, se llevó a cabo la fusión del metal en el horno, ya en estado líquido el aluminio fue vertido en el molde de la hélice de tres álabes y en tres moldes de cada álabe respectivamente, seguidamente se solidificaron a temperatura ambiente, una vez solidificado por completo los elementos fueron liberados del molde, estos presentaron defectos considerables de fundición como rebabas, mal acabado superficial y mal formaciones geométricas, por lo que se eliminó los canales de alimentación y mazarotas mediante herramienta manual (cierra), seguido se realizó el mecanizado mediante herramienta manual (lima de media caña), lo cual permitió eliminar rebabas y corregir mal formaciones geométricas.

Por último, se soldó los tres álabes a la hélice mediante el proceso GTAW de soldadura, obteniéndose como resultado final la hélice completa que se ilustra en el anexo 2. Una pieza

fundida por el método tradicional requiere realizar una tarea muy laboriosa y a veces complicada, además de invertir un tiempo considerable para mecanizarla y a través de esto, alcanzar a garantizar una buena calidad en la pieza fundida con características como, buen acabado superficial, dimensiones correctas y tratamiento térmico si fuera el caso que la pieza lo requiera.

En el proceso de fundición por el método innovador presentado, se eliminó completamente el tiempo de mecanizado y soldadura de la pieza, ya que se obtiene la pieza fundida directa, siendo solo necesario, una ligera limpieza de todas las superficies y al realizar este proceso se tomó tres minutos, para posterior a esto someter a la pieza a un tratamiento térmico si fuera necesario, de acuerdo a la necesidad a la que este destinada la pieza fundida.

En la Figura 11-4, se muestra el esquema del paso más importante, que omite el método innovador respecto a un método tradicional, como lo es la eliminación de canales de alimentación y mazarotas además de un alto grado de mecanizado, siendo estos dos los pasos que más atención requieren y en consecuencia de esto demandan mayor empleo de tiempo y trabajo laborioso.

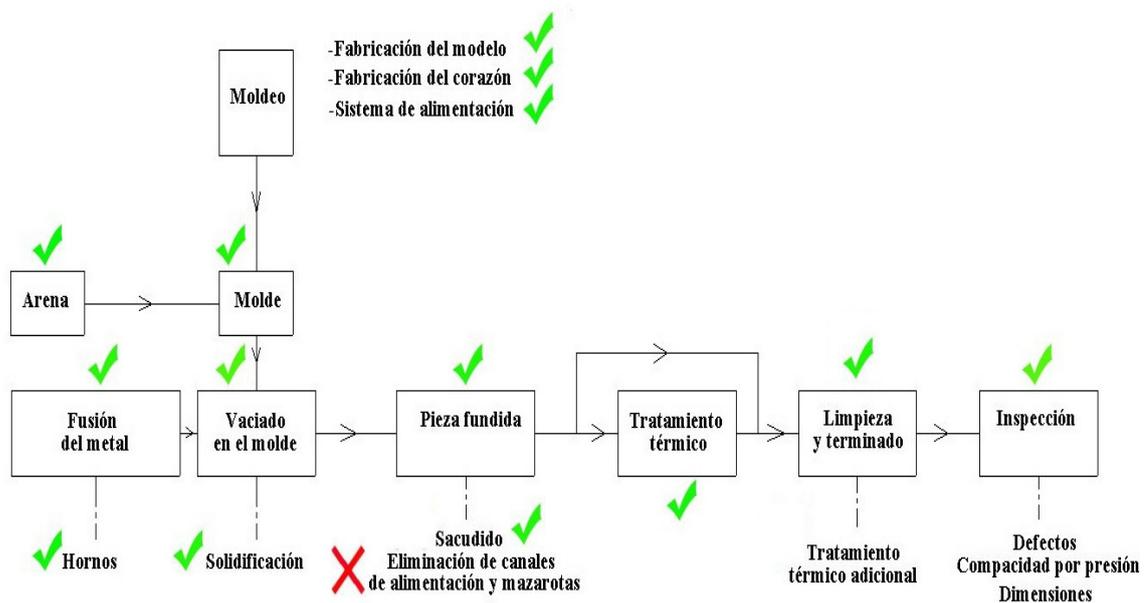


Figura 11-4: Pasos descartados por método innovador respecto al método tradicional
Fuente: (Kalpakjian, 2002)

En la Tabla 6-4, se muestra la diferencia de tiempos entre el método de fundición tradicional, innovador y por mecanizado CNC. Se puede observar que mediante el método tradicional se empleó 29h:40min, mientras que el método innovador emplea un tiempo total de 9h:13min y utilizando una maquina CNC el tiempo es de 24h00, de estos métodos el que resulta más factible si se tratara de realizar una producción en serie, sería el innovador por simple lógica ya que es el de menor tiempo.

Tabla 6-4: Comparación de tiempos de acuerdo al tipo de proceso

Actividad	Tiempo empleado por cada proceso		
	Método tradicional	Método innovador	Mecanizado CNC
Creación del modelo en madera	20h	-	
Tiempo de mecanizado (CNC)	-	-	24h
Modelado del elemento e impresión 3D	-	2h	
Preparación de la arena de fundición incluye: Ensayos de arena Mezcla de la arena Creación de cajas de moldeo Creación de moldes secado y desmoldado	4h	4h	-
Extracción del modelo polimérico del molde de arena	-	150min	-
Fusión del metal (aluminio)	30min	30min	-
Vaciado en el molde	10min	10min	-
Pieza fundida (sacudido, eliminación de canales de alimentación y mazarotas)	1h	-	
Limpieza y terminado (Mecanizado del elemento obtenido debido a defectos en el proceso de manufactura)	2h	3min	-
Soldadura de álabes	2h	-	-
Tiempo total empleado	29h:40min	9h:13min	24h

Fuente: Autor

Al ser obtenida la pieza fundida se puede validar la hipótesis planteada al inicio, puesto que con el desarrollo de este método innovador se obtuvo una pieza sin defectos, con buena calidad superficial, donde ya no se hace necesario un mecanizado final, sino más bien solo hay que realizar una pequeña limpieza con una brocha por todo el elemento, para retirar los residuos de arena y humo adquiridos en el proceso y luego dar una breve pasada con papel abrasivo fino, para afinar aún más el acabado superficial como se muestra en la Figura 12-4.



Figura 12-4: Pieza final obtenida
Fuente: Autor

➤ Diferencia de costos

En la Tabla 7-4, se muestra el análisis de la diferencia de costos por cada proceso

Tabla 7-4: Diferencia de costos de cada proceso

Materiales	Costos de fundición por cada proceso		
	Método tradicional	Método Innovador	Maquina CNC
Madera y tallado del modelo	200\$	-	-
Impresión 3D		20\$	-
Lingote de aluminio	20\$	20\$	-
Madera para las cajas y mano de obra del armado.	10\$	10\$	-
Arena Sílice	20\$	20\$	-
Arena Bentonita	10\$	10\$	-
Fundente de fusión	50\$	50\$	-
Bórax	5\$	5\$	-
Mecanizado CNC (Incluye materia prima Aluminio)	-	-	554.40
Mecanizado manual	10\$	-	-
Soldadura de alabes	45\$	-	-
Costo total	370\$	135\$	554.40\$

Fuente Autor

➤ Validación de resultados

La Tabla 8-4, muestra el análisis de tiempos y costos empleados por cada proceso de manufactura con los cuales se puede obtener una hélice.

Tabla 8-4: Análisis de tiempos y costos

Tiempo total empleado por cada proceso		
Método tradicional	Método Innovador	Maquina CNC
29h:40min=29.667h	9h:13min=9.217h	24h
Costos totales de fundición por cada proceso		
370\$	135\$	554.40\$

Fuente Autor

➤ Diferencia de tiempos:

- Método tradicional vs método innovador, $29.667h - 9.217h = 20.450h$
- Método tradicional vs Máquina CNC, $29.667h - 24h = 5.667h$
- Máquina CNC vs método innovador = $24h - 9.217h = 14.783h$

Como se puede observar en el análisis, el método innovador es óptimo con 20.450h de diferencia respecto al método tradicional y con 14.783h respecto al mecanizado CNC.

➤ Diferencia de costos

- Método tradicional vs método innovador, $370\$ - 135\$ = 235\$$
- Máquina CNC vs Método tradicional, $554.40\$ - 370\$ = 184.40\$$
- Máquina CNC vs método innovador = $554.40\$ - 135\$ = 419.40\$$

Como se indica en el análisis de costos, el método innovador respecto al método tradicional presenta un ahorro de 235\$ y respecto al mecanizado CNC un ahorro de 419.40\$.

➤ Validación del acabado superficial de la hélice:

De acuerdo a la evaluación de los datos de la Tabla 4-4 y Tabla 5-4, se obtiene los valores de rugosidad final de cada hélice fundida como se indica

- Rugosidad de la hélice del estudio experimental N°2, $R_a = 5.653\mu m$
- Rugosidad de la hélice del estudio experimental N°3, $R_a = 2.557\mu m$

La Tabla 9-4, muestra un resumen de la Tabla 10-2, indicando los valores de rugosidad superficial de acuerdo a los métodos de fabricación como: fundición en arena, coquilla, cera perdida y en base a esto analizar y comparar los resultados obtenidos en el desarrollo de este estudio.

Tabla 9-4: Comparación de rugosidades teóricas vs obtenidas.

Rugosidades promedio R_a (μm)				
Teóricas			Obtenidas	
Proceso	6.3	3.2	1.6	
Fundición a cera perdida				2.557
Fundición en arena				5.653
Fundición en coquilla				2.557

Fuente: (Rodríguez),(Autor)

El valor de $5.653\mu m$, al ser comparado con los rangos de la Tabla 9-4, está en un rango de (6.3 a $3.2\mu m$), esto indica que la rugosidad de hélice fundida está dentro del rango de aplicación frecuente de fundición en arena. Al comparar el valor de $2.557\mu m$, se observa que se encuentra en un rango de (3.2 a $1.6\mu m$), esto muestra que el acabado superficial obtenido en la hélice aplicando el método innovador, es equivalente al valor de rugosidad que se obtiene mediante el proceso de cera perdida o fundición en coquilla.

Mediante el estudio experimental del método de extracción del modelo polimérico, se obtuvo la hélice de geometría compleja, fundida en aluminio la cual presenta buenos acabados superficiales según la valoración que establece la tabla 5.5 de la Figura 13-4, ya que el valor de rugosidad superficial obtenido en el presente estudio ($R_a = 2.557\mu m$), está dentro del rango de (1,5-3) μm y es equivalente al acabado superficial que se obtiene mediante un proceso de fundición en coquilla, o al de cera perdida este proceso es llamado también de precisión, por ser capaz de producir fundidos con alto grado de exactitud.

En consecuencia, de esto se valida el método propuesto como óptimo para fundiciones en aluminio.

TABLA 5.5 Valores de rugosidad superficial producidos por distintos procesos de manufactura.^a

Proceso	Acabado de superficie común	Rango de rugosidad ^b	Proceso	Acabado de superficie común	Rango de rugosidad ^b
Fundición:			Abrasivos:		
Fundición con molde	Bueno	1-2 (30-65)	Esmerilado	Muy bueno	0.1-2 (5-75)
Fundición con revestimiento	Bueno	1.5-3 (50-100)	Rectificado	Muy bueno	0.1-1 (4-30)
Fundición con arena	Malo	12-25 (500-1000)	Bruñido	Excelente	0.05-0.5 (2-15)
Formado de metales:			Pulido	Excelente	0.1-0.5 (5-15)
Laminado en frío	Bueno	1-3 (25-125)	Superacabado	Excelente	0.02-0.3 (1-10)
Corte de lámina metálica	Bueno	1-3 (25-125)	No tradicionales:		
Extrusión en frío	Bueno	1-4 (30-150)	Fresado químico	Medio	1.5-5 (50-200)
Laminado en caliente	Malo	12-25 (500-1000)	Electroquímico	Bueno	0.2-2 (10-100)
Maquinado:			Descarga eléctrica	Medio	1.5-15 (50-500)
Perforado	Bueno	0.5-6 (15-250)	Haz de electrones	Medio	1.5-15 (50-500)
Barrenar	Medio	1.5-6 (60-250)	Haz de láser	Medio	1.5-15 (50-500)
Fresar	Bueno	1-6 (30-250)	Térmico:		
Planeado	Medio	1.5-12 (60-500)	Soldadura por arco	Malo	5-25 (250-1000)
Escariar	Bueno	1-3 (30-125)	Corte con llama	Malo	12-25 (500-1000)
Perfilar	Medio	1.5-12 (60-500)	Corte con arco de plasma	Malo	12-25 (500-1000)
Aserrar	Malo	3-25 (100-1000)			
Tornear	Bueno	0.5-6 (15-250)			

Figura 13-4: Valores de rugosidad superficial
Fuente: (Groover, 2007)

A continuación, se analiza la diferencia de rugosidad que existe entre la rugosidad generada del estudio experimental N°2, respecto a la rugosidad existente del estudio experimental N°3.

$$\Delta R_a = \text{Rugosidad original} - \text{Rugosidad mecanizada con papel abrasivo fino}$$

$$\Delta R_a = (5.653 - 2.557) \mu m$$

$$\Delta R_a = 3.096 \mu m$$

El acabado superficial de una pieza depende de los parámetros de trabajo experimentales con los que se realice en cada estudio. Ya que de acuerdo a este análisis se puede observar una optimización de $3.096 \mu m$.

CONCLUSIONES

- De tres polímeros ABS, PETG, y PLA, existentes en el mercado nacional se seleccionó el polímero PLA, por no presentar elevada resistencia a altas temperaturas, además por ser ideal para piezas de análisis de carácter efímero (de breve duración) y esto es favorable para el proceso de descomposición del modelo polimérico.
- En base a estudios previos se determinó que el cloroformo es una parte fundamental para extraer los componentes en fase líquida del proceso de desintegración química del PLA, y este debe ser aplicado en proporción al volumen del modelo a extraer.
- Se determinó que los parámetros de temperatura óptimos para este método de fundición mismos que son:
 - Temperatura de fundición del aluminio a 800°C
 - Temperatura de extracción del modelo polimérico a 300°C
 - Temperatura de extracción del molde de la mufla a 100°C
- Se validó la eficiencia del método innovador propuesto mediante el análisis de comparación de tiempos y costos empleados entre el proceso tradicional de fundición, método innovador y mecanizado CNC, como se indica en la Tabla 8-4, donde el método innovador es óptimo con 20.450h de diferencia, respecto al método tradicional y con 14.783h respecto al mecanizado CNC, en cuanto a costos, el método innovador respecto al método tradicional presenta un ahorro de 235\$ y respecto al mecanizado CNC un ahorro de 419.40\$.

RECOMENDACIONES

- Utilizar guantes de nitrilo y mascara full face, al aplicar el cloroformo sobre la superficie del modelo polimérico ya que este es un químico muy volátil y dañino, que puede causar cáncer a la piel, afectar severamente las vías respiratorias y pulmones.
- Usar el equipo de protección personal adecuado, para los procesos de fundición a fin de evitar danos a la vista y las vías respiratorias debido a los vapores generados.
- Visualizar el proceso de extracción del modelo polimérico con la ayuda de una cámara térmica ya que en el presente estudio esto fue limitante debido a que en la facultad de mecánica de la ESPOCH no se cuenta con dicho instrumento.
- En futuras investigaciones se recomienda basarse en un diseño de experimentos que permita verificar la influencia en el resultado al variar un solo un parámetro, bien sea la temperatura de fundición de aluminio, temperatura de extracción del modelo polimérico o la temperatura de extracción del molde de la mufla, pero manteniendo los dos restantes de manera constante, ya que en este estudio se ha variado los tres parámetros.
- Como una alternativa para la aplicación del cloroformo, se recomienda realizarlo mediante aspersión utilizando un sprayer, ya que además permite regular la cantidad aplicada.

BIBLIOGRAFÍA

- Alibaba. (s.f.). *Alibaba.com*. Obtenido de https://spanish.alibaba.com/product-detail/refining-and-degassing-of-molten-roll-casting-aluminum-powder-shaped-refining-flux-60693747906.html?spm=a2700.md_es_ES.maylikeexp.8.2ed71a264tuiWT
- Avendaño et al., H. M. (2008).
- Barkhudarov, H. y. (2006). *Flow Science Inc, Flow 3D Manual, Mem.*
- Capello. (1987).
- Caro Silva, F. J. (1995). *Diseno y fabricacion de piezas fundidas* .
- Chachapoya Guevara, J. J., & Garcia Mendoza, M. I. (2019). DISEÑO Y MANUFACTURA DE UN BLOQUE MOTOR MONOCILÍNDRICO PARA UNA MOTOCICLETA DE 150C.C. CON UNA ALEACIÓN DE ALUMINIO 7075. Riobamba, Chimborazo, Ecuador .
- Cholino Jose o, e. H. (s.f.). *Minera Jose Cholino e Hijos S.R.L.* Obtenido de <http://www.mineracholino.com.ar/producto/bentonitas-para-arenas-de-moldeo-f-40>
- Comara, S. (s.f.). *Herramientas joyeria*. Obtenido de <https://comrashop.es/ligas-productos-para-fundir/580-borax-en-polvo-envase-1kg.html>
- Dayana, M. A. (2012). *Determinación del porciento óptimo de humedad de la mezcla para la elaboración del vaso inferior de la cafetera EINPUD*. Santa Clara.
- Descubrearduino. (s.f.). Obtenido de <https://descubrearduino.com/materiales-de-impresion-en-3d/>
- Djurdjevie, Z. O.-K. (2010). Fundir control de calidad en plantas de aluminio.
- Ecured. (s.f.). *Ecured* . Obtenido de Ecured : <https://www.ecured.cu/H%C3%A9lice>
- Fernandez, V. M. (2006). Proceso de fundicion en espuma perdida para la fabricacion de autopartes. *Proceso de fundicion en espuma perdida para la fabricacion de autopartes*, 1-2.
- Figuroa M, J. L. (15 de 01 de 2009). *Fundytec de fundidor a fundidor* . Obtenido de http://fundytec.com.mx/index.php?option=com_content&task=view&id=6&Itemid=6
- Frax, J. (s.f.). *Frax Desing*. Obtenido de <http://joelfrax.com/disenio/acabado%20superficial.html>
- Garrido Meneses, A. R., & Sanchez Taco, V. H. (07 de 02 de 2011). *Determinacion de la metodoligia para la obtencion de aleaciones de aluminio de fundicion maquinables sin porosidades*. Quito, Pichincha, Ecuador.
- Gracomaq. (2018). *HORNOS VASCULANTES PARA FUNDICON DE ORO, ALUMINIO , BRONCES Y LATONES*. Obtenido de HORNOS VASCULANTES PARA FUNDICON DE ORO, ALUMINIO , BRONCES Y LATONES: https://www.gracomaq.net/index_archivos/HORNOSMETALES.htm
- Groover, M. P. (2007). *Fundamentos de manufactura moderna*. Mexico: McGraw-Hill.

- Henson, J. (2019). *Hacker mecanico*. Obtenido de Hacker mecanico:
<https://hackermecanico.com/>
- Higinio Rubio, A. (s.f.). *Rugosidades superficiales*. Madrid, Espana .
- Higueta Garro, J., Orlando Vásquez, O., Sepúlveda, J., & Ceballos, M. (s.f.). INFORME #1 LABORATORIO DE ARENAS. *INFORME #1 LABORATORIO DE ARENAS*, 3-11.
- Informatica, T. (2019). *Tecnologia Informatica*. Obtenido de Tecnologia Informatica:
<https://tecnologia-informatica.com/impresoras-3d-que-son-como-funcionan-impresion-3d/>
- Instop. (01 de 02 de 2108). *Instop su especialista en productos leica*. Obtenido de Instop su especialista en productos leica: <http://blog.instop.es/qu%C3%A9-%C3%A9s-un-escaner-laser-3d>
- Kalpakjian, R. S. (2002). *Manufactura, ingeniería y tecnología*. Mexico: Mexicana Reg.Num.1031.
- laboratorio, E. p. (s.f.). *ACEQUILABS*. Obtenido de <https://acequilabs.com.co/blog/guias-de-uso/que-es-una-mufla-de-laboratorio/>
- Loizaga, J. S. (2008). Defectos metalurgicos generados por la presencia de gases en el metal fundido. 1-2.
- Medina, V. d. (09 de 01 de 2020). *Acido Polilactico*. Obtenido de Acido Polilactico:
<http://www.eis.uva.es/~biopolimeros/alberto/index.htm>
- Ordinola Castillo, J. C. (2011). *CARACTERIZACIÓN DE LAS TIERRAS DE MOLDEO DE EL PORVENIR DE LA PROVINCIA DE SULLANA*. Piura.
- Pallo Morocho, E. L., & Valdivieso Godoy, A. E. (11 de 2018). ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES DE LAS ARENAS Y SU INFLUENCIA EN LAS PIEZAS FUNDIDAS EN CIERTOS TALLERES DE FUNDICION DE LA CIUDAD DE QUITO. Quito, Pichincha, Ecuador.
- Pastor, M. (s.f.). *Apuntes de fundicion Epoch Riobamba*.
- Pino Tarrago, J. C., Teran Herrera, H. C., Mena mena, E. R., & Navas Medina, E. (2015). *Calculos de fusion en la metalurgia*. Sangolqui.
- Posada Bustamante, B. (s.f.). *La degradacion de los plasticos* .
- Printalot. (27 de 02 de 2017). *Insumos para imprsion 3D*. Obtenido de www.printalot.com.ar
- Quimica, F. y. (s.f.). *Blogdiario.com*. Obtenido de <http://jaap.blogspot.es/>
- Quipasur. (1980). *Empresa Quipasur*. Obtenido de Empresa Quipasur:
<http://www.quipasur.cl/fundicion/arena-para-fundicion/>
- Rodriguez, O. F. (s.f.). *Máquinas, Métodos y Control Dimensional del Procesamiento*.
- Salcines Merino, C. (1985). *Mezclas autofraguantes con vidrio liquido*. Habana Cuba: Pueblo Y educacion.

- Salueña Berna, X., & Napoles Alberro, A. (2000). *Tecnologia Mecanica*. Catalunya: Edicions de la Universitat Politecnica de Catalunya.SL.
- Schey, J. A. (2001). *Procesos de manufactura* . Mexico: McGraw Hill.
- Silva, E. (14 de 11 de 2019). *Propiedades y ensayos de las arenas de moldeo y noyería*. Obtenido de <https://es.scribd.com/document/435015193/Indice-Afs#>
- Smith, H. J. (2006). *Fundamentos de la ciencia e ingenieria de materiales*. Mexico: McGRAW-HILL INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V.
- Tartera, J. (2013). Inventario de fundicion . *FUNDIPrESS59*, 41,42.
- Tecnologia. (s.f.). Obtenido de <https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/06/abs.html>
- Thirugnanam, M. (2013). Procesos modernos de fundicion a presion a alta presion para piezas de fundicion de aluminio. 1-2.
- TRD. (10 de 02 de 2019). *Materiales disponibles en impresion 3D*. Obtenido de <https://www.trdimension.com/blog/materiales-impresion-3d>
- Tresdpro. (2018). *Tresdpro*. Obtenido de Tresdpro: <https://tresdpro.com/que-es-el-material-pla/>
- Trimaker. (2010). Obtenido de <https://trimaker.com/nosotros/>
- Vargas D, J. (2015). *Dokumen*,. Obtenido de <https://dokumen.tips/documents/tolerancias-acabado-metrologia2015-30.html>
- Yoshihiro, A. K. (2001). *Thermal degradation of poly[(R)-3-hydroxybutyrate]*,. Yokojama .

ANEXOS

ANEXO A. Proforma de fabricación de una hélice en centro de mecanizado CNC H-630

							
INGENIERIA MECANICA APLICADA				RUC: 1803302130001			
FABRICANTE DE PARTES PARA LA INDUSTRIA METALMECANICA							
PROFORMA 0,041							
PARA:	Ing. Santiago Reyes			FECHA:	25/11/2019		
ATENCION:	Ing. Santiago Reyes			telefono	987923729		
DE:	Ing. Willian Naula						
ASUNTO	Construcción de helice conica en aluminio						
ITEM	CANTIDAD	DETALLE	PLAZO DE ENTREGA	VALOR UNITARIO	HORAS	SUBTOTAL	
1	1	Fabricación de hélice en centro de mecanizado CNC H-630	Una vez puesto la orden de compra, se entregara en 24 horas	45	11	495	
						Subtotal	495
						Total desc	0
						IVA 12%	59,4
						Total	554,4
VALOR INCLUYE IVA							
SON:	SEIS MIL CUATROCIENTOS SIETE CON VEINTE CENTAVOS						
Forma de pago, 50% anticipo una vez aprobado la orden de compra, el saldo se receptara cuanto se entregue la helice al cliente							
Valides de oferta 30 días.							
Tiempo de entrega: una vez aprobada la orden de Compra 24 hora laborables							
ATT.							
Ing. Willian Naula							
VANWEY							

Fuente: Autor

ANEXO B Fundición aplicando el método tradicional

Pasos para la fundición		Procedimiento	Detalle	Descripción	Tiempo empleado
1	Moldeo	Fabricación del modelo Fabricación del corazón Sistema de alimentación		La manufactura en madera de los moldes (hélice con tres alabes y un alabe aparte) demanda un tiempo estimado de 20h, debido a la complejidad geométrica.	20h
2	Arena	Molde		Para esta fundición se utilizo la misma arena empleada para la fundición del método innovador.	4h
3	Fusión del metal (Aluminio)	Hornos		El metal fue fundido bajo los mismos parámetros que del método innovador.	30min
4	Vaciado en el molde	Solidificación		Para el vaciado del aluminio de igual forma se consideró los mismos parámetros que del método innovador.	10min
5	Pieza fundida	Sacudido Eliminación de canales de alimentación y mazarotas		Las mazarotas y canales de alimentación fueron retiradas aplicando herramienta manual (cierra).	1h
6	Tratamiento térmico	Ninguno	Ninguno	Ninguno	-

7	Limpieza y terminado	Tratamiento térmico adicional		<p>El alabe y el cuerpo poseían rebabas y geometría defectuosa, estas se mecanizaron haciendo uso de un yunque y una lima de media caña, por último, se aplicó por toda la superficie papel abrasivo fino y brocha para remover los residuos de arena y manchas de humo adquiridos en la fundición.</p>	2h
8	Soldadura de alabes			<p>Ya fundidas todas las alabes se procedió asoldar las mismas al cuerpo mediante soldadura GTAW</p>	2h
9	Inspección	Defectos Compacidad por presión Dimensiones		<p>Finalmente se realizó una inspección visual del elemento obtenido y posterior a esto se procedió a la medición del acabado superficial de las alabes cuyos resultados se detallan en el anexo 3.</p>	1min (visual) 15min (medición de las superficies de cada alabe empleando el rugosímetro)

Fuente: Autor

ANEXO C Acabado superficial

Número de alabe	$R_a(\mu m)$			
	Valores de rugosidad		Valores de rugosidad	
1	6.886	 <p>Superficie frontal</p>	8.994	 <p>Superficie posterior</p>
2	9.993		8.942	
3	8.697		8.932	
4	8.962		9.472	
5	9.590		9.832	
6	9.975		9.983	
Total	54.103		56.155	

$$R_a = \frac{a + b + c + d \dots}{n}$$

$$R_a = \frac{(54.103 + 56.155)\mu m}{12} = 9.188\mu m$$

Fuente: Autor



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

**DIRECCIÓN DE BIBLIOTECAS Y RECURSOS DEL APRENDIZAJE
UNIDAD DE PROCESOS TÉCNICOS Y ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO Y DOCUMENTAL**

REVISIÓN DE NORMAS TÉCNICAS, RESUMEN Y BIBLIOGRAFÍA

Fecha de entrega: 29 / 06 / 2021

INFORMACIÓN DEL AUTOR/A (S)
Nombres – Apellidos: <i>Aquiles Santiago Reyes Romo</i>
INFORMACIÓN INSTITUCIONAL
<i>Instituto de Posgrado y Educación Continua</i>
Título a optar: <i>Magister en Diseño Mecánico</i>
f. Analista de Biblioteca responsable: <i>Lic. Luis Caminos Vargas Mgs.</i>

**LUIS ALBERTO
CAMINOS
VARGAS**

Firmado digitalmente por LUIS
ALBERTO CAMINOS VARGAS
Nombre de reconocimiento (DN):
c=EC, l=RIOBAMBA,
serialNumber=0602766974,
cn=LUIS ALBERTO CAMINOS
VARGAS
Fecha: 2021.06.29 17:32:39 -05'00'



0075-DBRAI-UPT-IPEC-2021

Redactar

Recibidos

- ★ Destacados
- 🕒 Pospuestos
- Enviados
- 🗑 Borradores

Meet

- 🗣 Nueva reunión
- 👤 Unirse a una reunión

Hangouts

Santiago +

No hay chats recientes

[Iniciar uno nuevo](#)



LUIS ALBERTO CAMINOS VARGAS

17:33 (hace 14 minutos) ☆ ↶ ⋮

para mí

Saludos

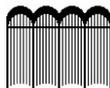
Adjunto la certificación de revisión #0075-DBRAI-UPT-IPEC-2021 (agregue al final del documento físico y digital)

Para su conocimiento: (Uso de información para Repositorio Académico ESPOCH)
Entregar en el IPEC.

- CDS CARATULADOS en caja plástica CADA CD CON 2 ARCHIVOS DEL Trabajo de Titulación UNO WORD (solo texto) Y OTRO PDF (con firmas físicas o electrónicas del Tribunal, Resumen y Certificación de revisión con firma y sello. **REVISE QUE LOS CD CONTENGAN LA INFORMACIÓN.**
- Los archivos digitales deben incluir ANEXOS, el formato pdf debe tener un peso máximo de 4MB

Un gusto servirle.

Atte.



Luis Caminos Vargas
 Coordinador Unidad Recursos del Aprendizaje
 Escuela Superior Politécnica de Chimborazo
 Panamericana Sur km 1.5 Edif. DBRA 2 piso
 Tlf. (+593 3) 2998 200 Ext. 1067