

Diseño de una práctica de laboratorio de procesos de fundición para la elaboración de piezas metálicas a partir de impresión 3D en el programa de Ingeniería Metalúrgica.

Julieth Natalia Chacón Agredo y Ada Alejandra Rozo Murallas

Trabajo de Grado en la modalidad ‘práctica en docencia’  
para optar al título de Ingeniero Metalúrgico

Director

Andrés Giovanni González Hernández

Doctor en Ingeniería

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales

Ingeniería Metalúrgica

Bucaramanga

2022

### **Dedicatoria Natalia**

Con toda mi gratitud y amor dedico este proyecto de grado a Dios ya que Él fue mi fiel compañero en cada alegría y obstáculo que se pudo presentar en el camino, me enseñó que puedo cumplir cada meta que me propongo y sobre todo que los esfuerzos que realizamos hoy son las bendiciones del mañana.

A mi madre Sandra Agredo que siempre confió en mí y con el amor más bonito me acompañó en cada una de las etapas de este proceso, siendo un ejemplo a seguir pues con su esfuerzo y dedicación logró brindarme apoyo en mi formación como Ingeniera Metalúrgica, también a mi padrastro Jairo Ayala por brindarme un cariño incondicional, aportar con cada una de sus enseñanzas valores a mi vida los cuales me permitieron lograr esta meta. A ellos que son las personas más importantes para mí, a quienes más amo, mi motivación y por quienes hoy puedo contar con una formación profesional, con todo mi cariño les dedico este proyecto de grado.

A mi amiga y compañera de tesis Ada Rozo, por su entrega, disciplina, pasión y excelente trabajo en equipo. Además, por su apoyo en los momentos difíciles y su compañía durante toda la carrera. También, agradezco su confianza y que me permitiera soñar junto a ella con un proyecto de grado como este. A todos los docentes de la escuela de Ingeniería Metalúrgica por ser los mejores en su profesión y darnos excelentes herramientas de aprendizaje.

Finalmente, a mis amigos, Juan Arrieta, Vivian Arrieta, Adrián Cárdenas y Alejandra Espinosa que siempre estuvieron junto a mí impulsándome a ser mejor cada día, por su cariño, por aguantarme con cada uno de mis estados de ánimo y darme la oportunidad de crecer con ellos aportando de manera positiva en nuestras vidas profesionales.

Julieth Natalia Chacón Agredo

### **Dedicatoria Ada**

Dedico el éxito de esta tesis a Dios, por permitirme tener vida, salud, paciencia y sabiduría para poder realizar este proyecto como se planeó y con ello cumplir uno de mis sueños que es ser Ingeniera Metalúrgica de la UIS, y por hacerme sentir su compañía y presencia por medio de personas maravillosas que no dejaron que me apartara de Él a pesar de las dificultades.

A mis padres Ricardo Rozo y Yanneth Murallas, por siempre ser el apoyo, la guía y la fuerza que me han impulsado a ser mejor cada día, por enseñarme a luchar por lo que merezco y por celebrar junto a mí cada uno de mis logros.

A mis compañeros Laura Velasco y Andrés Rincón por acompañarme en todo este proceso y enseñarme lo que es un verdadero equipo de trabajo y un buen “trío dinámico”.

A mi compañera de tesis Natalia Chacón por su valiosa amistad, por su paciencia y apoyo que fue primordial durante la realización de este trabajo, y por soñar conmigo desde el comienzo de la carrera con hacer este proyecto juntas.

A mis profesores Andrés González, Ana Emilse Coy, Ángel Melendez, Sergio Blanco y Ana María Pérez, por la confianza puesta en mí, por su amor a los estudiantes y a la Metalurgia, por su apoyo y por las enseñanzas que me inspiraron a ser la profesional que soy ahora.

Ada Alejandra Rozo Murallas

### **Agradecimientos**

Al profesor Andrés Giovanny González Hernández, por su disposición, confianza y compañía durante la realización de nuestro trabajo de grado. Gracias por sus consejos, orientaciones y aportes profesionales, fueron indispensables en el éxito de este.

A los técnicos de laboratorio de procesos de fundición y pirometalurgia, Mario Navarrete y Javier Gaitán, por enseñarnos a utilizar las instalaciones y los equipos de manera correcta y por ser nuestra guía en diferentes momentos del proyecto.

A la Universidad Industrial de Santander, por permitirnos acceder a las diferentes bases de datos, por disponer las instalaciones y recursos para realizar de manera satisfactoria. También agradecemos a la UIS-VIE, por el apoyo en algunas pruebas de este trabajo de grado, a través del proyecto No. 2512, titulado “Evaluación de la microestructura, propiedades mecánicas y resistencia a la corrosión de recubrimientos de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  y  $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$  elaborados a partir de proyección térmica por combustión para aplicaciones en ambientes marinos”.

A nuestros familiares y amigos, que siempre nos apoyaron y acompañaron en las crisis y en las victorias relacionadas con este proyecto y con nuestra carrera profesional.

Natalia Chacón y Ada Rozo

**Tabla de Contenido**

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	12
1. Objetivos.....	13
1.1 Objetivo General.....	13
1.2 Objetivos Específicos.....	13
2. Marco teórico y revisión de antecedentes .....	14
2.1. Técnicas de impresión 3D.....	14
2.2. Proceso de fundición en cera perdida .....	15
3. Metodología .....	18
3.1. Selección del diseño del modelo para la impresión 3D usado en fundición en el proceso de cera perdida.....	18
3.2. Preparación del modelo en impresión 3D mediante la técnica de estereolitografía .....	20
3.3. Fabricación del molde cerámico (yeso) y tratamiento térmico del mismo .....	25
3.4. Proceso de fundición.....	28
3.5. Diseño de la práctica de laboratorio.....	33
4. Resultados .....	33
4.1. Ensayo 1 .....	34
4.2. Ensayo 2.....	35
4.3. Ensayo 3.....	36
5. Conclusiones .....	45
6. Recomendaciones .....	46
Referencias Bibliográficas .....	47
Anexos .....	50

**Lista de Tablas**

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Proporciones agua/yeso en función de la cantidad de moldes a preparar.....	26
Tabla 2. Características de cada ensayo realizado.....	33

**Lista de Figuras**

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Etapas de la fabricación de piezas metálicas por medio de fundición a la cera perdida	16
Figura 2. Diseño 'Yer Twisted Heart' seleccionado como modelo para ser impreso en 3D. ....	19
Figura 3. Canal de alimentación diseñado en SolidWorks. ....	20
Figura 4. Impresora 3D Anycubic Photon .....	21
Figura 5. Software Photon Workshop.....	22
Figura 6. Pasos para configurar el archivo en el slicer. ....	23
Figura 7. Ajuste de la plataforma móvil .....	24
Figura 8. Montaje del modelo en la tapa de caucho del molde metálico.....	25
Figura 9. Ilustración de los pasos a seguir para la preparación del molde cerámico.....	26
Figura 10. Tratamiento térmico del yeso según ficha técnica. ....	28
Figura 11. Aleación Bronce baja en Cinc (Herculoy).....	29
Figura 12. Horno de inducción Pressovac ASEG GALLONI y sus respectivas conexiones .....	30
Figura 13. Proceso de fundición y enfriamiento del molde .....	31
Figura 14. Limpieza y remoción del yeso en la pieza final .....	32
Figura 15. Modelo impreso con especificaciones del ensayo 1 .....	35
Figura 16. Modelo impreso con especificaciones del ensayo 2.....	36
Figura 17. Modelo impreso con las especificaciones del ensayo 3 .....	37

**Lista de anexos**

	<b>pág.</b>
Anexo 1. proporciones agua / yeso .....	50
Anexo 2. Ficha técnica yeso omnicast premium .....	51
Anexo 3. Ficha técnica de la aleación Herculoy .....	52

## Glosario

**Canal de alimentación:** canal que permite la distribución del metal fundido en la cavidad del molde a condiciones adecuadas de velocidad y temperatura.

**Cera perdida:** proceso de fabricación para crear piezas metálicas que requieran muy poco o ningún maquinado mediante la fundición de un modelo o patrón que originalmente se diseñó en cera u otros polímeros. Conocido también como microfundición, o fundición de precisión.

**Estereolitografía (SLA):** es una tecnología de manufactura aditiva mediante la cual se consiguen piezas de resina epoxi con excelente reproducción de detalles y alta precisión que permite gran variedad de acabados superficiales.

**Fraguar:** proporcionar la consistencia deseada o requerida.

**Fundición:** proceso de fabricación de piezas que se basa en fundir un material y vaciarlo en una cavidad previamente diseñada en donde ocurre la solidificación de la pieza final.

**Horno de inducción:** horno eléctrico que utiliza procesos controlados para fundir el metal sin hacer contacto con el elemento de calentamiento.

**Impresión 3D:** proceso de manufactura aditiva basado en convertir un modelo digital en un objeto tridimensional sólido.

**Modelo:** réplica de la pieza que se desea obtener, diseñada en materiales que posean propiedades de fácil extracción o desmoldeo como madera, metal, poliestireno, plástico, resinas o cera.

**Molde:** recipiente con una cavidad que tiene la forma geométrica exacta de la pieza modelo por la que se vierte el material fundido.

**Programa CAD:** herramienta que por medio de un computador permite crear, editar, analizar y optimizar planos o modelos en 2D y 3D.

## Resumen

**Título:** Diseño de una práctica de laboratorio de procesos de fundición para la elaboración de piezas metálicas a partir de impresión 3d en el programa de Ingeniería Metalúrgica.

**Autor:** Chacón Agredo Julieth Natalia  
Rozo Murallas Ada Alejandra

**Palabras Clave:** fundición, microfundición, cera perdida, impresión 3D, horno de inducción.

**Descripción:** La implementación de nuevas tecnologías como la impresión 3D en procesos de fundición, permite garantizar una mejor calidad y precisión en los productos finales disminuyendo la cantidad de desechos generados durante el proceso, esta técnica a su vez aumenta la posibilidad de reproducir y personalizar las piezas con mayor facilidad. Con este proyecto se busca implementar esta tecnología en el laboratorio de la asignatura “procesos de fundición” del programa de Ingeniería Metalúrgica, produciendo directamente patrones de cera perdida por medio de manufactura aditiva que serán usados en la fabricación de piezas de joyería metálicas; adicionalmente se diseñó una guía de laboratorio junto con un video explicativo que podrán ser usados con fines educativos en la Universidad, favoreciendo el proceso de enseñanza - aprendizaje práctico por parte de los estudiantes. En esta experiencia se realizaron ensayos preliminares que permitieron definir los tiempos, costos, temperaturas, materiales y equipos necesarios para la realización de la práctica, y de esta manera determinar la factibilidad de la ejecución en el laboratorio. Para estos ensayos, se elaboraron modelos con sus bebederos en resina haciendo uso de la impresora Anycubic Photon, los cuales fueron colocados en moldes metálicos y cubiertos con yeso como revestimiento. Luego, al fraguarse el yeso de los moldes, se llevaron a un horno tipo mufla con el fin de evaporar la resina y aplicarle el tratamiento térmico al yeso y así disminuir los choques térmicos en el momento de la colada del metal fundido en la cavidad con la forma que tenía el modelo en resina. Finalmente, la colada se realizó en un horno de inducción para luego retirar la pieza metálica del refractario con ayuda de agua. De esta manera, se concluyó que el proyecto permitió diseñar una práctica de laboratorio de procesos de fundición para la elaboración de piezas metálicas a partir de impresión 3d dando como resultado satisfactorio la evidencia del cumplimiento de los objetivos propuestos.

### Abstract

**Title:** Design of a laboratory practice of casting processes for the manufacture of metal parts from 3d printing in the metallurgical engineering program.

**Author(s):** Chacón Agredo Julieth Natalia  
Rozo Murallas Ada Alejandra

**Key Words:** casting, micro-casting, lost wax, 3D printing, induction furnace.

**Description:** Description: The implementation of new technologies such as 3D printing in casting processes, allows to ensure better quality and precision in the final products by reducing the amount of waste generated during the process, and this technique in turn increases the possibility of reproducing and customizing parts more easily. This project seeks to implement this technology in the laboratory of the subject "casting processes" of the Metallurgical Engineering program, directly producing lost wax patterns by additive manufacturing that will be used in the manufacture of metallic jewelry pieces. Additionally, a laboratory guide was designed together with an explanatory video that can be used for educational purposes at the University, favoring the practical teaching-learning process for the students. In this experience, preliminary tests were carried out to define the times, costs, temperatures, materials and equipment necessary to carry out the practice, and thus determine the feasibility of the execution in the laboratory. For these tests, models were made with their resin sprues using the Anycubic Photon 3D printer, which were placed in metal molds and covered with plaster. Then, the molds was put to a muffle furnace in order to evaporate the resin and apply the thermal treatment to the plaster and thus reduce the thermal shocks at the time of casting the molten metal in the cavity with the shape of the resin model. Finally, the casting was carried out in an induction furnace and then the metal part was removed from the refractory with the help of water. Thus, it was concluded that the project allowed the design of a laboratory practice of casting processes for the production of metal parts from 3D printing, giving as a satisfactory result the evidence of the fulfillment of the proposed objectives.

### **Introducción**

El interés que tienen las empresas por desarrollar nuevas tecnologías dentro de sus diferentes procesos cada vez es mayor, puesto que les permite participar en el mercado global de manera eficiente y competitiva; en este contexto, se ha hecho evidente la falta de experiencia de los nuevos profesionales en temas innovadores relacionados con la industria 4.0 que conlleven a mejorar y optimizar la producción y calidad de los servicios ofrecidos por estas empresas.

Por lo tanto, con este proyecto se propone implementar durante la formación de los futuros ingenieros metalúrgicos de la UIS, la impresión 3D como tecnología de la industria 4.0 aplicada en un proceso de fundición conocido como cera perdida, en donde además de la manufactura aditiva para la fabricación del modelo, se hace uso de un horno de inducción para la obtención de una pieza final, lo que favorece los resultados de aprendizaje de los futuros profesionales y a largo plazo un avance tecnológico a nivel nacional.

Para lograr este proyecto se realizaron múltiples ensayos y se determinó la metodología a seguir, con la que se diseñó una práctica de laboratorio que consta de una guía y un video explicativo como apoyo audiovisual de la misma, ya que se trata de una técnica de fabricación nueva para el estudiante. Por otro lado, en caso de no poder realizar la práctica de manera presencial (debido a diferentes escenarios como la pandemia del COVID-19 u otras pandemias), el video permite un buen acercamiento a lo realizado dentro del laboratorio, favoreciendo el proceso de aprendizaje a los profesores y estudiantes de la asignatura “procesos de fundición”.

## **1. Objetivos**

### **1.1 Objetivo General**

Diseñar una práctica de laboratorio con material audiovisual para la elaboración de piezas metálicas a partir de impresión 3D en el programa de Ingeniería Metalúrgica.

### **1.2 Objetivos Específicos**

Evaluar el tiempo, materiales y parámetros para la realización de un modelo en impresión 3D para ser usado en el proceso de fundición a la cera perdida.

Elaborar una guía de laboratorio con la finalidad de llevar a cabo el desarrollo de la práctica de laboratorio.

Elaborar un vídeo explicativo de la metodología a seguir en la práctica de laboratorio en la asignatura de procesos de fundición.

## 2. Marco teórico y revisión de antecedentes

La impresión 3D también conocida como “manufactura aditiva” (*additive manufacturing*), es un proceso mediante el cual se fabrica un objeto con dimensiones tridimensionales en base a un plano o archivo digital (.stl), que fue diseñado en un software de diseño asistido por computador (CAD, *computer-aided design*) u otro especializado en modelado. Para la creación del objeto, la impresora 3D adiciona material en capas sucesivas hasta completar las dimensiones deseadas (Avendaño, 2012). Esta tecnología da un giro en la fabricación de un modelo o componente, ya que usualmente se retira material para elaborarlo como en los procesos de fresado o torneado (manufactura sustractiva), mientras la impresión 3D combina materias primas de manera más precisa evitando generación de desechos obteniendo menores costos (Prada, 2018).

### 2.1. Técnicas de impresión 3D

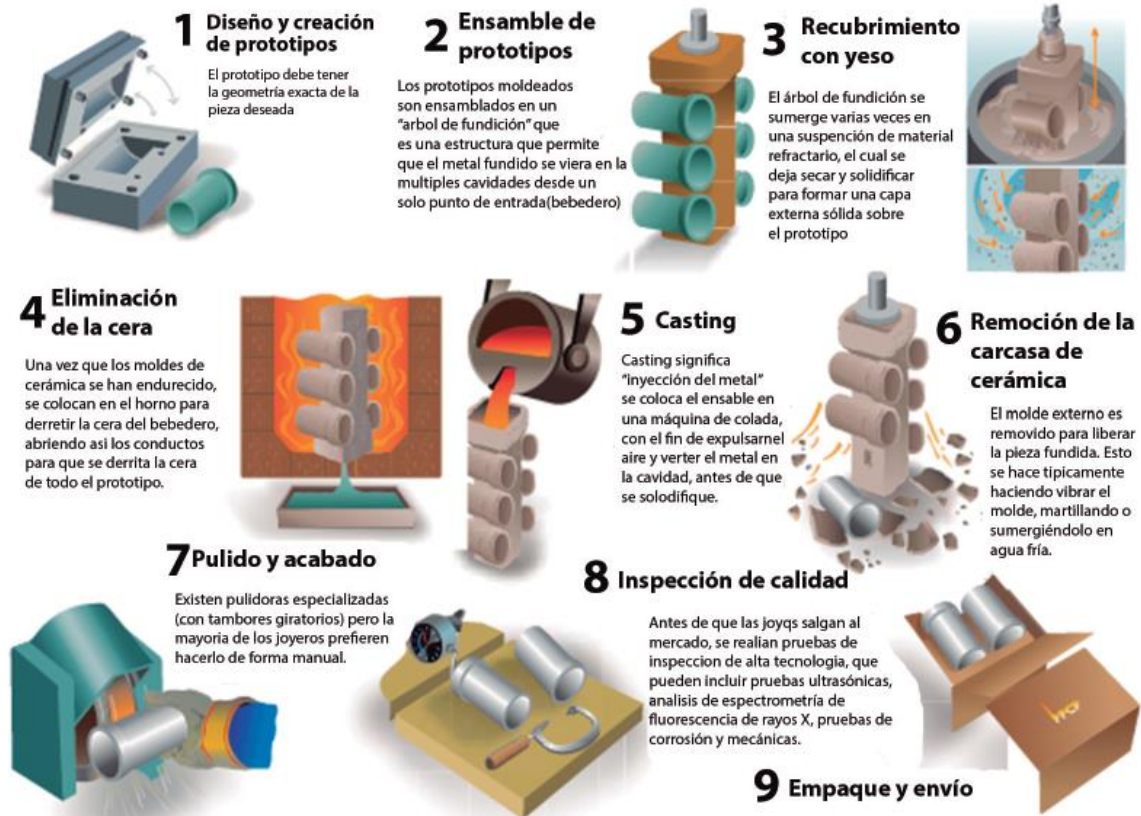
Existen varias técnicas para el uso de la impresión 3D que difieren entre sí en la manera en que se elaboran las capas para construir el objeto. La técnica más común es impresión por deposición de material fundido (*FDM*), que consiste en la superposición de finas capas de un filamento almacenado inicialmente en rollos, el cual es transportado a un extrusor que al final tiene una boquilla que se encuentra unos grados arriba de la temperatura de fusión del material, para luego depositarse en la placa o cama de impresión (Macas Montaña & Pilco Llerena, 2016). Por otra parte, se tiene la estereolitografía también conocida como *SLA* por sus siglas en inglés ‘*stereo lithography appearance*’, siendo la tecnología más antigua creada desde el año 1984 por Charles Hull con el propósito de crear maquetas como prototipo y evaluarlas antes de realizar la fabricación en serie (Muñoz Mesa & Sánchez Trujillo, 2016). Esta tecnología utiliza una máquina que tiene un rayo láser o pantalla monocromática con una longitud de onda entre 355 y 455 nm, el cual se encuentra en la parte inferior del tanque de la resina líquida. Esta resina se solidifica al interactuar

con el rayo láser de tal forma que elabora la capa y al mismo tiempo se adhiere a una plataforma que se mueve hacia arriba. El objeto de impresión 3D se construye por la solidificación capa por capa de la resina y su formación se controla con los movimientos del láser o la exposición de la luz en el caso de la pantalla monocromática (M. Asif, 2017). La técnica SLA es rápida, tiene alta precisión en sus detalles, superficies lisas, genera estructuras complejas y tamaños variables (Jie Wang, 2016). Teóricamente, el rayo láser o pantalla monocromática se puede mover sobre un gran espacio y así, se pueden imprimir modelos de gran tamaño, pero hay que tener en cuenta que entre mayor sea el tamaño del modelo, menor será la velocidad de impresión de este (Haoyuan Quan, 2020).

Teniendo en cuenta que las resinas poseen propiedades mecánicas bajas por lo cual se consideran responsables de limitaciones de esta tecnología, actualmente no se utilizan las impresiones 3D como reemplazo directo de piezas estructurales (Haoyuan Quan, 2020), pero sí como materiales temporales en modelos, diseño de prototipos, material de cera perdida y una gran cantidad de aplicaciones más en diferentes campos causando una verdadera innovación en las industrias.

## **2.2. Proceso de fundición en cera perdida**

La fundición en cera perdida es el proceso principal en la creación de joyería debido a su capacidad de cubrir cada detalle de las especificaciones requeridas, esto ya que es posible copiar figuras complejas y/o de secciones muy finas, además con alta precisión. (Vega Rodríguez & Muñoz Mesa, 2019). La Figura 1Figura presenta un resumen del proceso que realiza convencionalmente.

**Figura 1.** Etapas de la fabricación de piezas metálicas por medio de fundición a la cera perdida

*Nota.* La figura muestra cada una de las etapas que se realizan en el proceso de fundición a la cera perdida. Tomado de (Vega Rodríguez & Muñoz Mesa, 2019)

Inicialmente en este proceso se hace el diseño de la pieza, el cual antiguamente se realizaba mediante bocetos de una figura imaginaria y actualmente son usados programas CAD que facilitan la creación de modelos complejos. Posterior a esto, en el caso de la joyería, por ejemplo, se construye el prototipo a partir de un bloque de cera y con ayuda de herramientas para tallar, se va transformando en el modelo de la pieza. Quién realice este proceso debe estar altamente calificado puesto que es necesario que copie cada detalle del diseño inicial (Molner, 2020). Para este paso, se ha implementado la impresión 3D ya que permite reproducir detalles de geometrías muy complejas como lo es en joyería. Seguidamente se procede a colocar los modelos en un árbol que

los interconecta por medio de un conducto al que se le llama bebedero y por allí entrará y fluirá el metal fundido al interior del molde; y de acuerdo con el tamaño y peso del molde se toma la decisión de ensamblar dos o más modelos. (Molner, 2020)

El árbol se inserta en la tapa de caucho de un molde metálico preferiblemente de acero inoxidable para continuar con la preparación del revestimiento cerámico, en la cual se hace una mezcla de yeso y agua que se vierte en el molde hasta cubrirlo completamente y se deja solidificar durante unas horas. Luego se procede a realizar un tratamiento térmico al revestimiento (yeso), donde se evapora la cera o resina usada en el modelo de la pieza creando una cavidad que está lista para verter el metal fundido. Posteriormente, el molde se coloca en un horno de colada con asistencia al vacío, lo cual protege el baño metálico de oxidación, además facilita el rápido vertimiento dentro de la cavidad antes de solidifique la aleación (Vega Rodríguez & Muñoz Mesa, 2019). Por último, se remueve el yeso sumergiendo el molde en agua a temperatura ambiente para liberar el árbol metálico y después cortar cada pieza. Una de las ventajas de este método es que la pieza final no requiere o requiere de poco mecanizado o acabado, lo cual disminuye costos.

Para finalizar esta sección, este proyecto de práctica en docencia está enfocado en el uso de impresión 3D aplicado a la industria de la fundición, el cual consiste en la producción directa de patrones de cera perdida por medio de la técnica SLA de la manufactura aditiva utilizando resinas disponibles comercialmente. Estos patrones fueron utilizados para la fabricación de piezas de joyería metálicas dentro de un laboratorio. De esta forma, se mostrará a los estudiantes de “procesos de fundición” de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica, todo lo relacionado con la elaboración del modelo de cera a partir de impresión 3D y su uso en una práctica de laboratorio para que los estudiantes puedan apreciar este tipo de tecnologías actuales, así como mostrar el proceso de fundición en un horno de inducción de baja capacidad (max 100 gramos).

### 3. Metodología

Para el diseño de la práctica de laboratorio se definió la metodología en cinco etapas: selección del modelo, impresión 3D del mismo, fabricación del molde cerámico junto con el tratamiento térmico, fundición y por último el diseño de una práctica de laboratorio que será implementada por los estudiantes dentro de la asignatura “Procesos de fundición”. A continuación, se detallan cada una de las etapas.

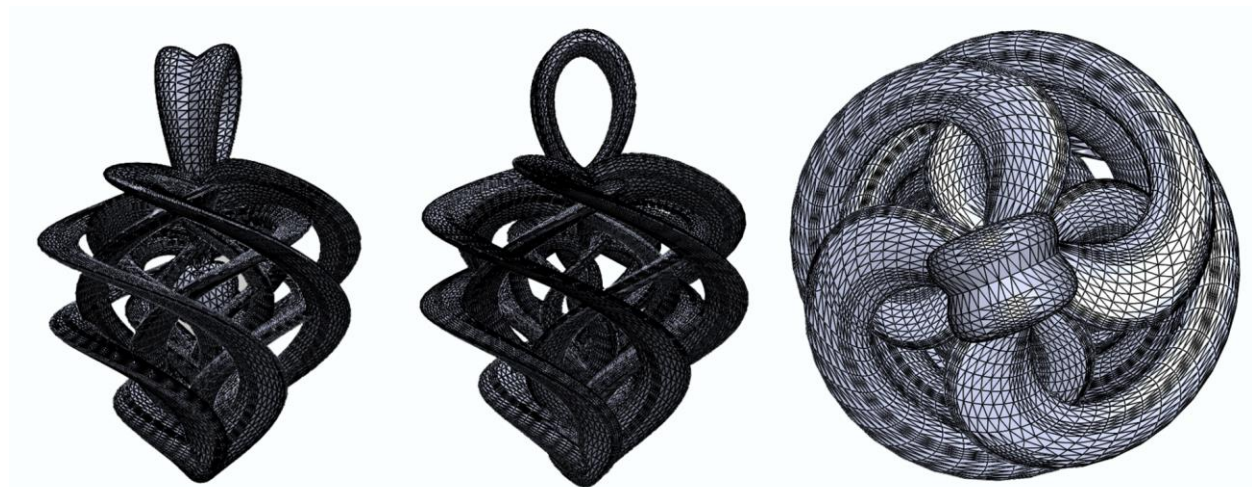
#### 3.1. Selección del diseño del modelo para la impresión 3D usado en fundición en el proceso de cera perdida

El diseño del modelo fue impreso en 3D, así que lo primero a considerar fue el formato del archivo, en este caso, la impresora Anycubic photon acepta formato STL, como la mayoría de las impresoras. Un archivo en STL, se obtiene por medio de un software CAD, en donde los más conocidos son CREO, FUSION 360, 4D ADDITIVE, AUTOCAD, CATIA, INVENTOR, SOLID EDGE Y SOLIDWORKS (Contreras, 2022). Sin embargo, hay algunos recursos web que nos permite acceder a archivos descargables con formato STL y; uno de estos es el repositorio “open access” MyMiniFactory, el cual cuenta con una comunidad de usuarios que suben archivos originales o derivados con este formato (Marchante, 2021).

Teniendo en cuenta que el objetivo del diseño seleccionado está enfocado en la enseñanza de la técnica de fundición a los estudiantes, es importante destacar que las dimensiones de los moldes metálicos para montar el yeso con los que cuenta el laboratorio son  $2 \frac{1}{5}'' \times 2 \frac{1}{5}''$ , por lo tanto, las dimensiones del modelo debían ser menores a estas.

En el caso de este proyecto, se partió de un pre-diseño de 0.866 in de altura disponible en MyMiniFactory con el nombre ‘Yer Twisted Heart’ el cual está diseñado para imprimirse en una impresora SLA de alta resolución, el cual se observa en la Figura 2.

**Figura 2. Diseño 'Yer Twisted Heart' seleccionado como modelo para ser impreso en 3D.**



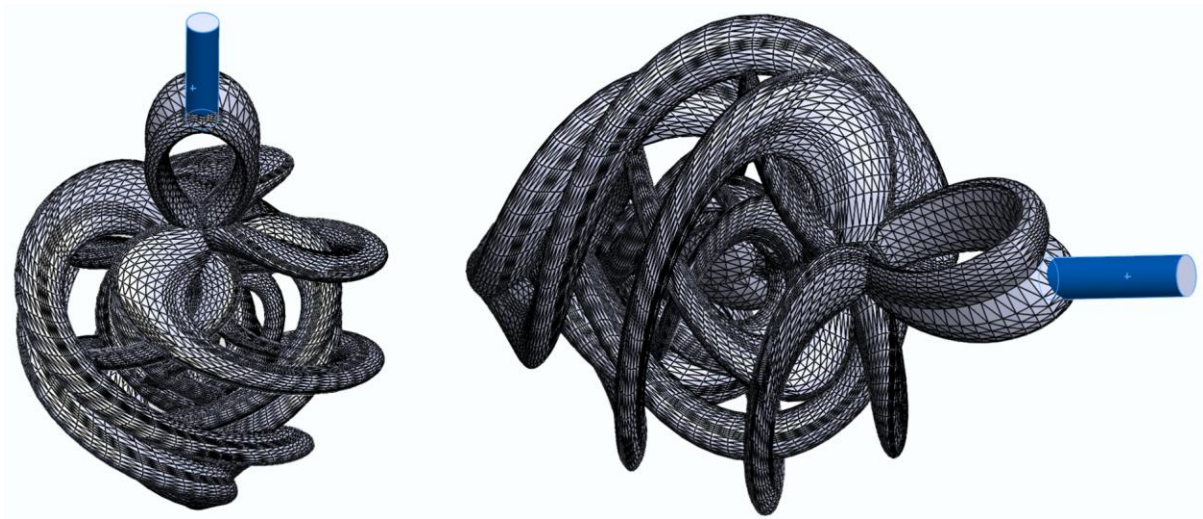
*Nota.* La figura muestra el diseño seleccionado como modelo en diferentes vistas. Tomado de *Palko, 2015*.

Posteriormente, para hacer posible el proceso de fundición, se diseñó el sistema de colada por medio de SolidWorks siguiendo las siguientes consideraciones (Chacón, 2016):

- Es un modelo pequeño, por lo que se ubica un único canal de alimentación.
- Debido a la morfología del diseño escogido y su falta de zonas planas, el canal de alimentación se sitúa en el extremo del modelo.
- El canal debe ser corto, para evitar enfriamientos prematuros, acumulación de posibles residuos, y turbulencias, con esto a su vez se le proporciona mayor resistencia para soportar el modelo una vez sea montado en el molde de yeso.

Siendo así, el sistema de colada o canal de alimentación diseñado en el software es el mostrado en azul en la Figura 3.

**Figura 3.** Canal de alimentación diseñado en SolidWorks.

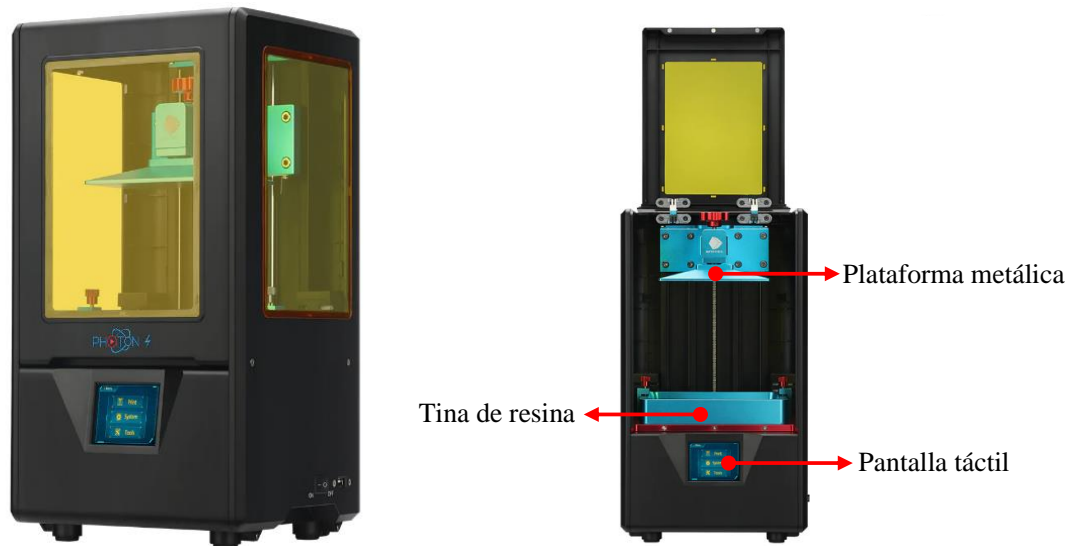


*Nota.* La figura resalta el canal de alimentación establecido para el diseño del modelo seleccionado.

Adaptado de: *Palko, 2015 en SolidWorks.*

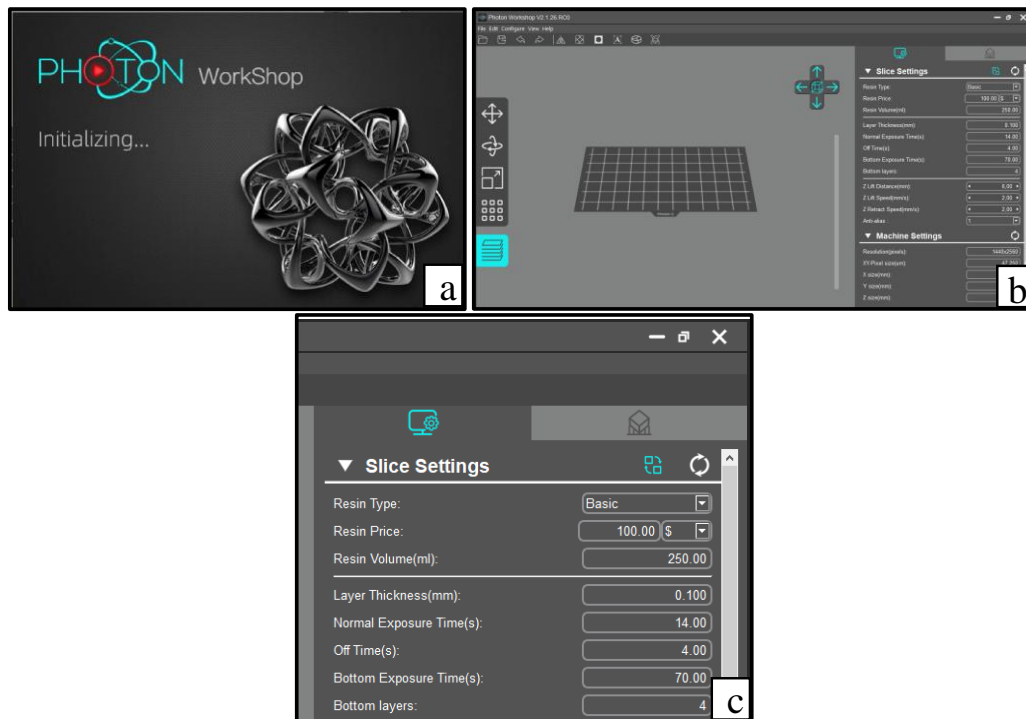
### **3.2. Preparación del modelo en impresión 3D mediante la técnica de estereolitografía**

Para la impresión del modelo, se usó la impresora Anycubic Photon (ver Figura 4) empleando como material de impresión una resina fotosensible de 405nm. Este equipo se caracteriza por ser un modelo asequible, con excelente calidad de impresión, además con alto detalle en las imágenes a un costo menor y su operación es muy simple (ANYCUBIC, 2015). La impresora cuenta con un software denominado Photon Workshop el cual se llama comúnmente para las impresoras 3D “slicer” ya que además de ser un intérprete de los archivos de los modelos (en este caso formato STL) y la impresora, también divide la figura que se desea imprimir en capas horizontales a lo largo del eje Z y; al mismo tiempo produce la trayectoria que seguirá la fuente de luz para construir capa por capa del modelo. Todo esto es traducido en un código G (lenguaje de programación) que maneja la impresora. (INGENIUS, s.f.)

**Figura 4.** Impresora 3D Anycubic Photon

*Nota.* La figura muestra el equipo usado para el proceso de impresión en 3D. Adaptado de: (ANYCUBIC, 2015)

Se programó el panel de configuración del software Photon Workshop mostrado en la Figura 5a según las recomendaciones del fabricante variando algunos parámetros de acuerdo con los ensayos realizados. Luego, se abrió el programa mostrando la pantalla de inicio evidenciada en la Figura 5b, donde se estableció un grosor de capa o “Layer Thickness” de 0,1 mm y un tiempo de exposición normal (Normal Exposure Time) de 14 s ya que el rango recomendado esta entre 6-20 s. Además, para los parámetros “Off time”, “Botton Exposure Time” y “Bottom Layers” (Figura 5c) se implementaron las cifras de 4s, 70s y 4 capas, respectivamente, debido a que se sugieren valores entre los intervalos 3-6s, 30-80s y 3-6 capas (ANYCUBIC, 2020). Estos tres valores hacen referencia a la impresión de las primeras capas, ya que deben tener una mayor exposición de luz para que proporcione una buena adherencia a la placa de impresión (ver plataforma metálica en la Figura 4).

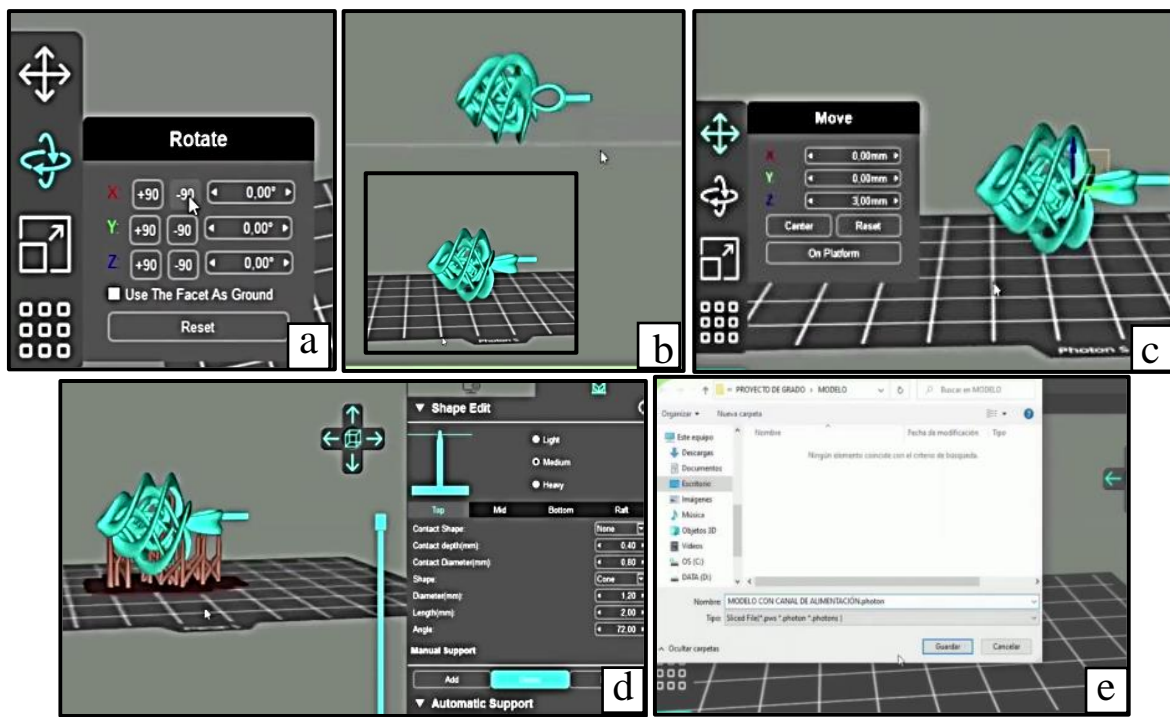
**Figura 5.** Software Photon Workshop

*Nota.* La figura muestra el slicer de la impresora Anycubic Photon. a) Icono representativo del programa, b) Pantalla inicial al abrir el software y c) Parámetros de impresión. Adaptado en: Photon Workshop

Seguidamente se abrió el modelo en el Slicer con las dimensiones del archivo original la cuales fueron 15 x 15 x 22 mm, se dio un giro de 90° en el eje Y (con la opción mostrada en la Figura 6a para asegurar que el agujero superior del modelo (Figura 6b) se imprimiera correctamente, ya que esta parte sería un voladizo. Luego se agregó un valor de altura (Figura 6c) en el eje Z de 2 milímetros con el fin de separar la placa inferior con la figura a imprimir, esto para evitar fracturas al momento de remover los elementos que conectan las dos partes antes mencionadas. Además, se construyeron los soportes con la opción “Platform” (Figura 6d) y se ubicaron en las partes críticas de impresión, de esta manera se logró relacionar esas zonas con la

placa inferior para obtener un resultado satisfactorio. Posteriormente se guardó el archivo (Figura 6e), es necesario escribir “.photon” después del nombre de este ya que la impresora únicamente reconoce este formato para imprimir. Al guardar el archivo, el programa proporciona el tiempo aproximado de impresión, en este caso fue 1 hora con 24 minutos.

**Figura 6.** Pasos para configurar el archivo en el slicer.



*Nota.* La figura muestra el paso a paso para la configuración del archivo en el slicer de la impresora.

a) Opción para dar giro, b) Modelo girado en 90°, c) Icono para dar altura al modelo, d) Adición de soportes y e) Ruta para guardar el archivo de manera que la impresora lo pueda leer. Adaptado en: Photon Workshop.

Para comenzar a imprimir inicialmente se realizó la nivelación de la impresora en el lugar siguiendo las indicaciones del fabricante, se verificó que la pantalla LCD y la plataforma metálica móvil estuvieran libres de polvo y teniendo en cuenta que en este equipo anteriormente se realizaron otras impresiones, también fue necesario lijar y limpiar esta plataforma delicadamente.

Posteriormente, se enciende la impresora y se calibra siguiendo el manual de esta, es decir, se aflojó el tornillo de la plataforma y se colocó una hoja de papel A5 en la pantalla LCD (Figura 7a), en la pantalla táctil se hizo clic en la opción “Tools”, luego “Mover Z” y por último “HOME” así comienza a descender la plataforma. Así, se verificó que quedara en el encuadre de la pantalla LCD y a su vez que estuviera paralela como se muestra en la Figura 7b y en ese momento se ajustó lo más apretado posible el tornillo con una llave Allen. Seguidamente se comprobó que la hoja de papel tiene resistencia cuando es halada, luego con la opción de 0,1 mm y la flecha hacia arriba se realizaron solo 2 clics para liberar un poco la firmeza y se estableció la altura actual del eje Z como la posición cero (ANYCUBIC).

**Figura 7.** Ajuste de la plataforma móvil



*Nota.* La figura muestra el ajuste para la plataforma móvil de la impresora. a) Ubicación de una hoja de papel A5 en la pantalla y b) Plataforma móvil paralela al soporte principal.

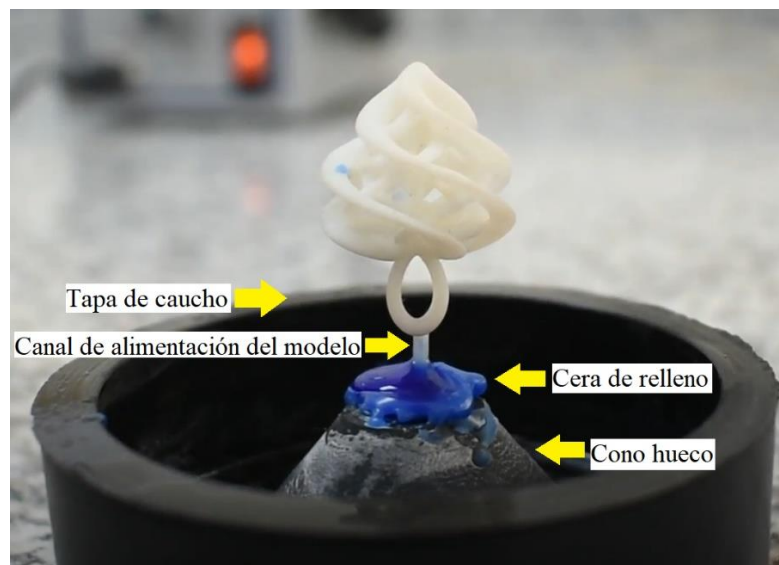
Por último, se midieron en un vaso de precipitado 40 ml de resina y se agregaron por medio de un colador a la tina de resina para evitar que se adicionaran grumos de impresiones anteriores. Luego, se ubicó el recipiente dentro de la impresora, se aseguró la puerta y se procedió a colocar la USB con el archivo listo para imprimir y se esperó el tiempo aproximado de impresión para

quitar la plataforma con el modelo 3D y con ayuda de la espátula se retiró. Además, se aplicó alcohol al modelo impreso para luego dejarlo secar al aire y finalmente remover los soportes.

### 3.3. Fabricación del molde cerámico (yeso) y tratamiento térmico del mismo

Con el fin de cumplir con los tiempos establecidos para la preparación del yeso, es necesario primero preparar el molde metálico, es decir, montar el modelo sobre la tapa de caucho de este y sellarlo, de manera que esté listo para recibir el yeso preparado. Para facilitar este montaje, se cuentan con unas tapas de caucho con un cono hueco en donde se encaja el canal de alimentación del modelo y se rellena con cera común, así como se muestra en la Figura 8.

**Figura 8.** Montaje del modelo en la tapa de caucho del molde metálico.



El yeso Omnicast Premium fue el seleccionado para la fabricación del molde cerámico, puesto que ofrece buenas características de expansión térmica, permeabilidad y distribución del tamaño de partículas, lo que significa una gran calidad en la micro-fundición de aleaciones preciosas con punto de fusión hasta 1350°C (Terriza, 2022).

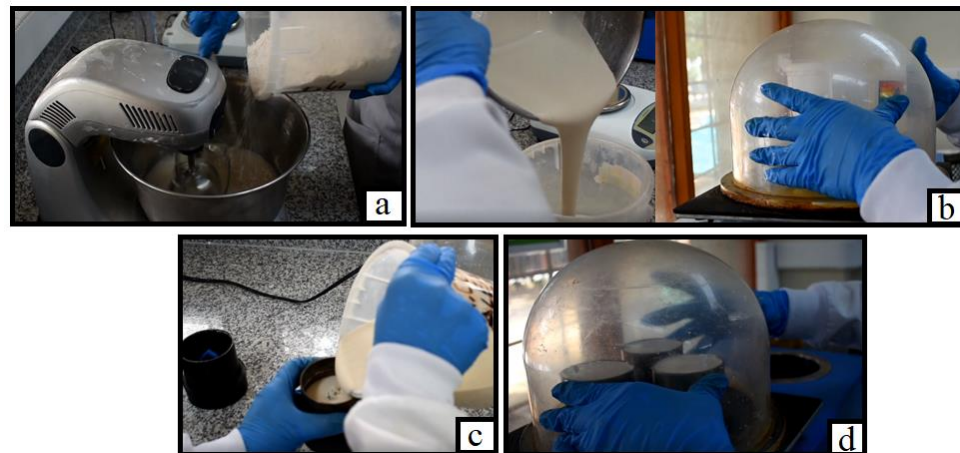
Para determinar las proporciones agua/yeso mostradas en la Tabla 1, se tuvo en cuenta la relación que había entre las dimensiones del molde metálico con la cantidad de agua a mezclar (Anexo 1) y la relación agua/yeso dada por los fabricantes del yeso Omnicast Premium.

**Tabla 1.** Proporciones agua/yeso en función de la cantidad de moldes a preparar.

# Moldes	Yeso (g)	Agua (ml)
1	285	114
2	570	228
3	855	342

Teniendo esto, se procedió a la preparación del molde cerámico que, siguiendo las recomendaciones de la ficha técnica del yeso, donde este proceso no debe durar más de 9 minutos distribuidos en los pasos ilustrados en la Figura 9 y posteriormente descritos individualmente.

**Figura 9.** Ilustración de los pasos a seguir para la preparación del molde cerámico.



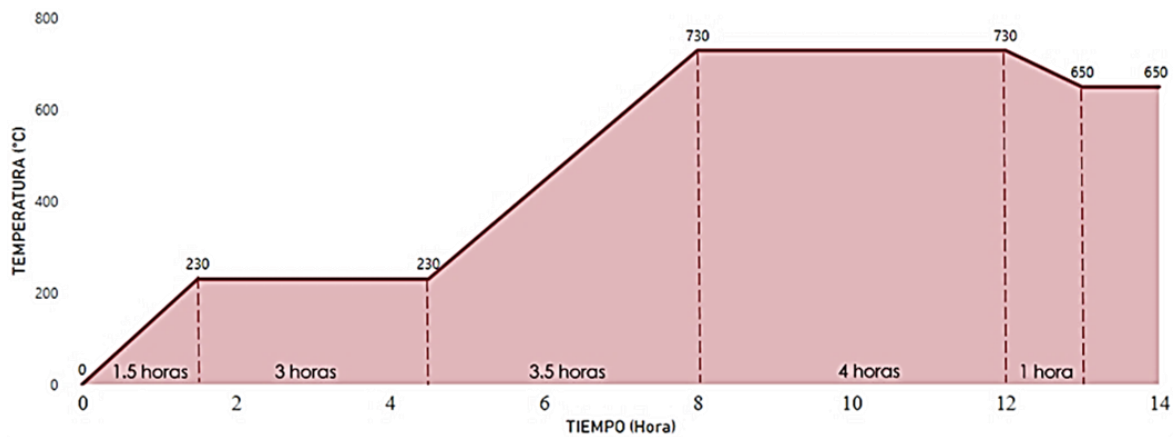
*Nota.* La figura muestra el procedimiento a seguir para la preparación del molde cerámico. a) mezclar agua y yeso, b) llevar al vacío la mezcla, c) verter mezcla en el molde metálico, d) llevar moldes junto con la mezcla al vacío nuevamente.

El procedimiento para elaborar el molde en yeso se describe a continuación:

- 4 minutos: añadir el agua en la mezcladora y al encenderla adicionar lentamente la cantidad de yeso adecuada, con apoyo de un mezclador de laboratorio se remueven los bordes constantemente y de esta manera se evitan los aglomerados o desperdicios de material indeseados **Figura 9a**
- 2 minutos: agregar la mezcla en un recipiente y llevarla a la bomba de vacío para eliminar por medio de burbujas el aire que se encuentra atrapado en la mezcla **Figura 9b**.
- 1 minuto: verter la mezcla en el molde metálico **Figura 9c**.
- 2 minutos: colocar nuevamente el molde en la bomba de vacío **Figura 9d**.
- Posterior a esto, la mezcla se deja fraguar entre 1 y 2 horas, terminado este tiempo se retira la tapa de caucho y se procede al tratamiento térmico del yeso.

El tratamiento térmico de endurecimiento del yeso se realizó en base a la ficha técnica del yeso en el horno tipo mufla que pertenece al laboratorio de micro - fundición.

Este proceso consta de 5 pasos: descerado, transición térmica, sinterizado, reducción y estabilización y tiene una duración aproximada de 13 horas. A continuación, en la Figura 10 se presenta de manera gráfica el tratamiento térmico realizado y en el Anexo 2 se observa la ficha técnica completa del yeso Omnicast Premium.

**Figura 10.** Tratamiento térmico del yeso según ficha técnica.

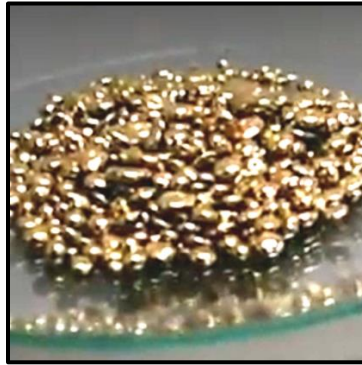
Nota: la temperatura final del tratamiento térmico depende de la aleación que se vaya a utilizar, y debe sostenerse hasta el momento en el que se vaya a realizar la fundición.

### 3.4. Proceso de fundición

En esta etapa se hizo uso de la aleación granulada bronce al silicio bajo en zinc UNS C87610 denominada comúnmente como ‘Herculoy’ mostrada en la Figura 11, es especialmente utilizada en piezas de arte y joyería ya que presenta alta ductilidad, tiene excelente fluidez, forma poca escoria y su gran capacidad de transcribir detalles hace que requiera de poco acabo superficial (Belmont Metals, s.f.). La aleación posee una temperatura de fusión de 977°C, temperatura de colada para piezas pesadas de 1010°C y para piezas livianas de 1090°C, y una densidad de 7,96 g/cm<sup>3</sup>. Además, esta aleación presenta un color amarillo, todo esto se encuentra en la ficha técnica al final en el Anexo 3. El cálculo del peso para la aleación se realizó en base al volumen del modelo (dato que se revisó en el programa SolidWorks), el peso del modelo luego de imprimirlo y su valor de densidad, se adicionaron algunos gramos más de dicha aleación para que el termopar del horno de inducción estuviera sumergido en el baño metálico y de esta manera arrojara un dato confiable

de temperatura, la carga adicionada al crisol de grafito fue de 30g. Además, esto fue posible hacerlo ya que esta aleación presenta el 70% de reciclabilidad según su ficha técnica.

**Figura 11.** Aleación Bronce baja en Cinc (Herculoy)



Para esta etapa es posible hacer uso de gran variedad de hornos de acuerdo con el tamaño de las piezas a fundir, y para este proyecto se utilizó el horno de inducción Pressovac marca ASEG GALLONI observado en la Figura 12a especializado en fundición de aleaciones preciosas. Este equipo cuenta con un ciclo de colado completamente automático que permite obtener piezas con superficies lisas evitando defectos como porosidades, contracciones y faltas de fusión (ASEG GALLONI, 2020). El horno cuenta con dos bombas, una que está encargada de la cámara de vacío (Figura 12d) activada automáticamente al momento de cerrar la compuerta y otra que se encarga de la refrigeración de la cámara de fundición, especialmente la bobina (Figura 12c). Además, el horno permite instalar una conexión a un gas protector que para este caso fue Argón (Figura 12b). La temperatura se controla mediante un sistema óptico que alcanza hasta 2100°C, este pirómetro de usa para aceros y platino, mientras que en el caso de bronce, oro y plata se revisa por medio de un termopar de inmersión que llega hasta 1450°C y se introduce en el crisol de grafito (ASEG GALLONI, 2020).

**Figura 12.** Horno de inducción Pressovac ASEG GALLONI y sus respectivas conexiones

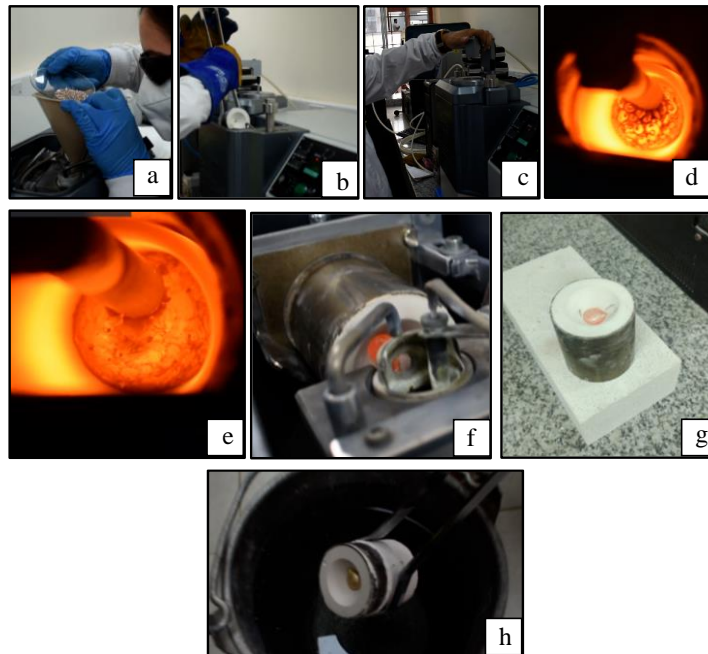


*Nota.* La figura muestra el horno de inducción Pressovac con sus respectivas conexiones, a) Horno de inducción Pressovac, b) Cilindro de gas Argón, c) Bomba de agua para refrigeración y d) Bomba de vacío.

Se precalentó el horno y el crisol por un tiempo aproximado de 5 min con una intensidad de 1 hasta lograr  $200^{\circ}\text{C}$  aproximadamente, debido a su diseño en la resistencia con forma de bobina permite una excelente transferencia de calor, por lo que se necesita de tiempos cortos al momento de alcanzar temperaturas altas. Se introdujo directamente la aleación previamente pesada con ayuda de un embudo (Figura 13a) junto con el molde recién retirado del horno tipo mufla (Figura 13b), donde en ese momento su temperatura estaba alrededor de los  $650^{\circ}\text{C}$ . Luego, se programó el “Set Point” que refleja la temperatura de colada de la aleación escogida y se procedió a cerrar la compuerta activándose automáticamente (Figura 13c) el vacío dentro de la cámara, donde allí se puede observar el color rojo intenso del crisol mientras el metal aún está sólido (Figura 13d). Se subió lentamente el potenciómetro del horno de inducción hasta 40% de la potencia, luego de

10 minutos la aleación se fundió por completo (Figura 13e). Así mismo, cuando el horno detectó que se llegó a la temperatura seleccionada solo resta pulsar el botón que se enciende en color verde, de esta manera todo el sistema crisol y metal fundido girarán 90° garantizando un vertido completamente controlado y de manera espontánea el horno presurizado mediante gas argón fue indispensable para un correcto llenado del molde de una forma homogénea. Se contabilizó que, al pasar dos minutos después del vertido de la aleación fundida, el horno se abre automáticamente, donde se pudo observar aún el color rojo del metal (Figura 13f). Por último, se sacó el molde para dejarlo enfriar al aire por 25 minutos (Figura 13g), luego de esto se introdujo en agua a temperatura ambiente removiéndolo constantemente por un corto tiempo (Figura 13h).

**Figura 13.** Proceso de fundición y enfriamiento del molde

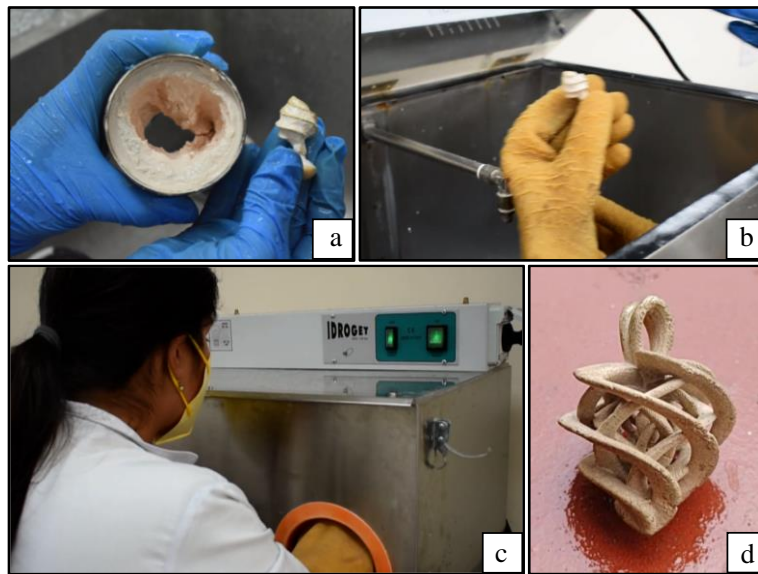


*Nota.* La figura muestra detalles del proceso de fundición, a) Introducción de la aleación al horno, b), Inserción del molde en el horno, c) Cierre de compuerta y encendido del horno, d) Aleación Herculoy sin fundir en la cámara de fusión, e) Aleación Herculoy fundida en la cámara de fusión,

f) Molde colado dentro del horno, g) Molde expuesto a enfriamiento al aire a temperatura ambiente y h) Introducción del molde colado en agua a temperatura ambiente.

Finalmente, al sacar la pieza del molde como se observa en la Figura 14a se continuó el proceso haciéndola pasar por una hidro-lavadora (Figura 14b y 12c), la cual emite un chorro de agua a presión que ayudó a remover el exceso de yeso. De esta manera se obtuvo la pieza fundida mostrada en la Figura 14d que posteriormente puede llevarse a pulido especializado esto por su complejidad geométrica.

**Figura 14.** Limpieza y remoción del yeso en la pieza final



*Nota.* La figura muestra el proceso de limpieza del yeso en la pieza final. a) Separación pieza – molde luego de sumergirlo en agua, b) Introducción de la pieza a la hidro-lavadora, c) Remoción del exceso de yeso en la hidro-lavadora y d) Pieza fundida.

### 3.5. Diseño de la práctica de laboratorio

Se planteó una experiencia basada en tres momentos: 1. selección del modelo y diseño del canal de alimentación. 2. impresión 3D y fabricación del molde cerámico y 3. la comprensión del funcionamiento del horno de inducción y la obtención de la pieza final por medio de micro - fundición. En la guía de laboratorio se detalla la metodología a seguir y se apoya con un video complementario que le permitirá al estudiante comprender la temática de la mejor manera. Siendo así, se le ofrece total autonomía al docente para el desarrollo de los 3 momentos que conforman la experiencia práctica diseñada.

## 4. Resultados

Para la evaluación del tiempo, materiales y parámetros del modelo impreso en 3D usado en el proceso de fundición a la cera perdida, se realizaron 3 ensayos, en busca de las condiciones óptimas para reproducir la impresión. A continuación, en la Tabla 2 se resumen las características a las que se sometieron cada una de las pruebas y seguidamente se presentan los ensayos con sus especificaciones.

**Tabla 2.** Características de cada ensayo realizado.

<b>Número de ensayo</b>	<b>Soportes en zonas voladizas</b>	<b>Altura plataforma-modelo</b>	<b>Cantidad de resina</b>	<b>Proceso de nivelación</b>
Ensayo 1	No	0 mm	20 ml	No
Ensayo 2	Sí	0 mm	20 ml	Sí
Ensayo 3	Sí	2 mm	40 ml	Sí

#### 4.1. Ensayo 1

Con ayuda del software Photon Workshop de la impresora se leyó el modelo descargado anteriormente en formato STL, se colocaron los soportes que automáticamente construye el programa cuando seleccionamos la opción “Platform”. Para este primer ensayo no se situaron soportes en las zonas voladizas del modelo, tampoco se programó altura entre este y la placa de impresión con el fin de observar el acabado de la impresión final. El volumen de resina necesario para esta impresión sería de 2,207 ml, este valor se obtuvo en el software, sin embargo, se agregaron 20 ml ya que la cifra estimada no era suficiente para sumergir la plataforma móvil. El proceso de nivelación no se realizó para estudiar su influencia en el modelo impreso. Los resultados finales del ensayo se observan en la Figura 15, donde se evidencia la influencia de la falta de soportes en zonas voladizas, puesto que el modelo escogido es de gran complejidad geométrica y la máquina realiza una construcción de la imagen a partir de capas consecutivas. De esta manera aquellas zonas que no se encuentren en contacto con la plataforma directamente o por medio de dichos soportes no serán impresos correctamente en 3D. Además, no realizar el proceso de nivelación y limpieza al momento de iniciar la impresión dan como resultado que la plataforma móvil este configurada a una altura incorrecta lo que produce que las primeras 4 capas, las cuales son las más sensibles, se construyan erróneamente, por lo tanto, las otras capas no tendrán una base sólida para seguir la figura tridimensional.

**Figura 15.** Modelo impreso con especificaciones del ensayo 1

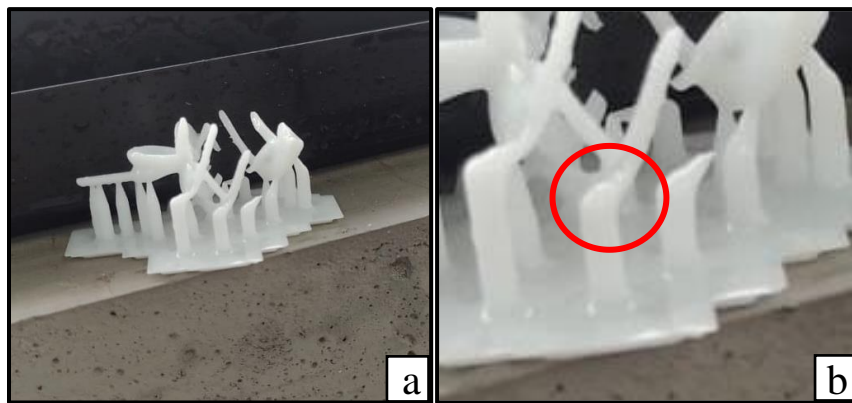


#### 4.2. Ensayo 2

Se realizó el mismo procedimiento del ensayo 1 en el software Photon Workshop donde se incluyeron algunos cambios. Para este caso se colocaron soportes en las zonas que se evidenciaban voladizos así se aseguró que cada parte de la figura estuviera en contacto con la placa de impresión. Además, se aplicó por completo el proceso de nivelación, se configuró a una altura determinada la posición  $Z=0$  con ayuda de una hoja de papel A4, permitiendo así que las primeras capas se construyan adecuadamente. La limpieza junto con la calibración se realizó exhaustivamente, es decir, además de remover polvo la plataforma móvil se lijo delicadamente para remover exceso de resina solidificada de la anterior impresión y se ajustó a la impresora por medio de un tornillo usando una llave Allen verificando que quedara en el recuadro de la pantalla la pantalla LCD. En la Figura 16a se evidencian los resultados obtenidos, se observa que existe una imagen en 3D por lo cual la adición de soportes en zonas voladizas y la correcta manipulación de proceso de nivelación junto con la limpieza son de gran influencia. Sin embargo, se puede observar que la impresión no está completa, además podemos ver como la parte inferior del modelo y la placa

donde se encuentran incrustados todos los soportes están unidas (Figura 16b), generando que al momento de removerlos pueda quebrarse la figura. Se pudo verificar que la tina de resina estaba casi vacía cuando el modelo se sacó de la impresora, así se llegó a la conclusión que 20 ml no eran suficientes para sumergir por completo la plataforma móvil y permitir que la luz irradie de manera correcta la resina.

**Figura 16.** Modelo impreso con especificaciones del ensayo 2



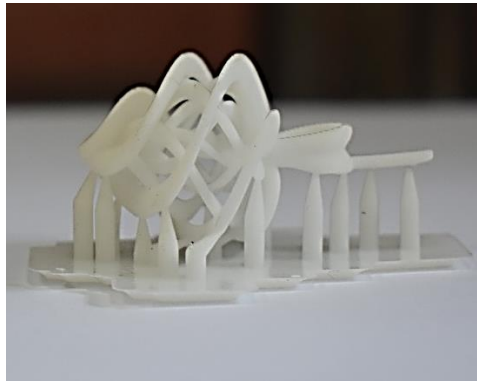
*Nota.* La figura muestra el modelo impreso en el ensayo 2, a) Modelo impreso en 3D con soportes en zonas voladizas y b) Evidencia de la unión entre el modelo y la placa de impresión.

### 4.3. Ensayo 3

Finalmente, en el ensayo 3 se construyeron detalladamente los soportes de las zonas voladizas en el modelo, se agregó también en el programa Photon Workshop un valor de altura de 2 mm en el eje Z entre la placa de impresión y la figura. Se reprodujo con exactitud el proceso de nivelación y limpieza realizado en el anterior ensayo sin saltar ningún paso. Además, se adicionaron 40 ml de resina en la tina, esto se realizó ya que lo que sobra es posible reutilizarlo atendiendo a los cuidados que se recalcan en este documento. El resultado final se puede ver en la Figura 17, donde se presenta un modelo completo impreso en 3D con las especificaciones necesarias y así se demostró que todos los parámetros expuestos en la Tabla 2 tienen influencia

para obtener un excelente modelo impreso y que permita al momento de remover los soportes que este no sufra ninguna fractura.

**Figura 17.** Modelo impreso con las especificaciones del ensayo 3



Siguiendo con los parámetros, materiales y tiempo evaluados se diseñó la guía de laboratorio para la asignatura de procesos de fundición y se realizó un ensayo completo por parte de las autoras con el fin de comprobar el tiempo necesario para la misma. Inicialmente se realizó una explicación rápida de conceptos básicos como el proceso de impresión 3D por la técnica de estereolitografía, tipos de software a usar, cuidados del equipo y proceso de calibración, además la preparación del molde en yeso con su respectivo tratamiento térmico y proceso de microfundición. Seguidamente se definieron las partes del horno de inducción Pressovac y sus elementos complementarios, además se presentó el proceso que se va a realizar, posteriormente se comenzó el precalentamiento del horno. La práctica está diseñada para dos sesiones de 3 horas, en la primera se va a realizar todo el proceso de impresión en 3D, los modelos se seleccionan con anterioridad, se adecuan sus respectivos bebederos y se construyen los soportes. Cabe aclarar que esto puede variar de acuerdo a la cantidad de modelos a imprimir y el tiempo que cada uno podría demorarse, por esto se recomienda realizar máximo 3 impresiones de 30 minutos cada una o un de 1 hora con

30 minutos como la presentada en este documento. En la segunda sesión, se va a realizar el proceso de preparación del molde en yeso y la fundición, se destaca que la elaboración del molde en el recubrimiento cerámico solo será explicativa debido a las horas necesarias para el tratamiento térmico es mucho mayor que el tiempo de la práctica. Finalmente se evidencia el resultado final del trabajo de grado en la guía de laboratorio expuesta a continuación:

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**  
**ESCUELA DE ING METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES**  
**LABORATORIO DE PROCESOS DE FUNDICIÓN**  
**ELABORACIÓN DE PIEZAS METÁLICAS A PARTIR DE IMPRESIÓN 3D**  
**MEDIANTE FUNDICIÓN DE PRECISIÓN O CERA PERDIDA**

**PRÁCTICA No. #9**

**INTRODUCCIÓN**

El uso de tecnologías de la industria 4.0 como la impresión 3D aplicados a los procesos de fundición, es una alternativa novedosa para garantizar piezas metálicas finales con excelente calidad y precisión, además aumenta la posibilidad de personalizar y disminuye la cantidad de desechos generados. En esta práctica se hace uso de la impresora Anycubic Photon la cual utiliza como material de impresión una resina fotosensible de 405nm y del horno de inducción Pressovac utilizado para la micro-fundición de metales preciosos.

**OBJETIVO GENERAL**

Elaborar una pieza metálica por medio del proceso de fundición a la cera perdida implementando en el diseño del modelo la impresión 3D.

**OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Diseñar y fabricar el modelo reemplazando los métodos convencionales por la impresión 3D haciendo uso de programas CAD y el software Photon de la impresora.
- Preparar el molde de yeso teniendo en cuenta el tiempo estipulado en la ficha técnica para todo el proceso, el cual consta de etapas como fraguado, evaporación de la resina y el tratamiento térmico.

- Identificar las partes, funcionamiento y aplicaciones del horno de inducción, adicionalmente realizar el proceso de fundición para finalmente obtener las piezas metálicas diseñadas

## **MATERIALES Y EQUIPOS**

- Impresora Anycubic photon
- Resina fotosensible de 405 nm
- Yeso Omni-cast Premium
- Molde metálico con su respectiva tapa de caucho
- Mezcladora
- Equipo pirograbado (cautín)
- Cámara de vacío
- Horno tipo mufla
- Aleación bronce bajo en zinc
- Horno de inducción
- Hidrolavadora
- Equipo complementario (probetas, balanzas, pinzas, guantes, recipiente con agua, entre otro,)

## **METODOLOGÍA**

- **Selección, preparación e impresión en 3D del modelo.**
  1. Realizar la búsqueda del diseño para el modelo en formato STL, esto puede hacerse utilizando plataformas web como minifactory, o creándolo con ayuda de algún programa de diseño asistido por computador como SolidWorks, Fusion 360, INVENTOR, entre otros.

2. Diseñar los canales de alimentación de acuerdo con la geometría y dimensiones del modelo seleccionado o diseñado, para esto se utiliza un programa de diseño asistido por computador, en este caso se utiliza SolidWorks.
  3. En el software de la impresora denominado Photon 64, colocar a la pieza soportes que ayuden a la correcta impresión del modelo y dar altura en el eje Z. Registrar el tiempo aproximado que utiliza la impresora de acuerdo con el modelo escogido al momento de guardar el archivo, además al colocar el nombre de este se finaliza con “. photon”
  4. Calibrar, limpiar y lijar delicadamente la plataforma móvil de la impresora, también limpiar la tina de resina con alcohol y toallas de papel, todo esto según las indicaciones del profesor y el video explicativo de la práctica.
  5. Agregar por medio de un colador 40ml de resina en la tina de resina de la impresora, verificar todos los pasos y comenzar a imprimir.
- **Elaboración del molde en yeso**
    1. Con la ayuda del cautín y cera se hace el montaje del modelo en la tapa de caucho usada para el molde metálico.
    2. Se pesan 285 g de yeso Omni-cast Premium y se miden 114 ml de agua para un molde metálico de dimensiones  $2 \frac{1}{5}'' \times 2 \frac{1}{5}''$ . Se pueden utilizar entre 1 y 3 moldes, y las cantidades exactas en cada caso serían:

# Moldes	Yeso (g)	Agua (ml)
<b>1</b>	<b>285</b>	<b>114</b>
<b>2</b>	<b>570</b>	<b>228</b>
<b>3</b>	<b>855</b>	<b>342</b>

3. En la mezcladora se agrega el agua medida y poco a poco se adiciona el yeso pesado, con ayuda de una varilla se remueve los bordes, para evitar que se desperdicie material. Esto se hace por máximo 4 min (según ficha técnica)
  4. Pasado el tiempo mencionado se agrega la mezcla en un recipiente para posteriormente colocarlo en la bomba de vacío y así eliminar el aire atrapado por medio de burbujas. El tiempo Máximo para este paso es 2 minutos (según ficha técnica)
  5. Verter la mezcla en el molde esto debe hacerse en un tiempo menor a 1 min.
  6. Por último, volver a colocar el molde en la bomba de vacío y dejarlo ahí por aproximadamente 2min. Con esto se completan 9 min del proceso de preparación para el yeso, esto debe cumplirse con exactitud ya que podría fraguarse o endurecerse en alguno de los pasos anteriores y causar perdida de material o que algún equipo o el mismo modelo se dañe. A partir de este momento se deja fraguar una a dos horas, terminado este tiempo se quita la tapa de caucho para continuar con el proceso.
- **Proceso de fundición**
    1. Pesar 30g de Aleación Herculoy en una balanza con ayuda de un vidrio-reloj. Seguidamente encender el horno Pressovac y precalentarlo hasta 200°C por aproximadamente 5 minutos, programar un “Set point” de 1100°C que será la temperatura máxima a la que subirá el horno esto de acuerdo con la ficha técnica.
    2. Al terminar el tratamiento térmico introducir el molde inmediatamente y la aleación previamente pesada, luego cerrar el horno para activar el vacío y comenzar a elevar

el potenciómetro hasta 40, finalmente se esperan 10 minutos observando detalladamente el metal fundiendo.

3. Presionar el botón verde para que el horno realice la colada internamente y esperar 2 minutos para que automáticamente este se abra y poder retirar el molde colado. Luego de esto dejar enfriar al aire por 25 minutos.
4. Introducir el molde en agua, agitarlo para extraer la pieza fundida y remover el exceso de yeso con ayuda de una hidrolavadora.
5. Hacer los cortes de canales de alimentación para obtener la pieza final.

### TEMAS DE CONSULTA

Tipos de manufactura aditiva (impresión 3D)

Video para entender el funcionamiento básico del software Photon Workshop disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=0g-ruXEPgSQ&t=83s>

Video adicional para revisar el proceso de nivelación disponible en: [https://www.youtube.com/watch?time\\_continue=187&v=8tnmnrS23kU&feature=emb\\_logo](https://www.youtube.com/watch?time_continue=187&v=8tnmnrS23kU&feature=emb_logo)

Video complementario a la práctica, disponible en: <https://youtu.be/i7uBVjjjFJw>

Video explicativo sobre las partes y el funcionamiento del horno de inducción pressovac, disponible en: <https://youtu.be/aZsdqDuyvRY>

Recurso electrónico 'Myminifactory' para la descarga de archivos en formato stl

### CUESTIONARIO

1. ¿Qué relación tiene el tipo de material utilizado en la impresión con la calidad de la pieza final?
2. ¿Con qué finalidad se implementan los soportes en el diseño del modelo y qué se tiene en cuenta para la ubicación de estos?

3. ¿Qué se busca con la realización del tratamiento térmico al molde de yeso?
4. ¿Cuál es la función que tiene la cámara de vacío del horno de inducción dentro del proceso?

## 5. Conclusiones

- Se diseñó satisfactoriamente una práctica de laboratorio con material audiovisual (<https://youtu.be/i7uBVjjjFJw>) para la elaboración de piezas metálicas por micro - fundición partiendo de la impresión 3D, que podrá implementarse en la asignatura de procesos de fundición en el programa de Ingeniería Metalúrgica, fortaleciendo los métodos de enseñanza-aprendizaje por parte de los estudiantes.
- Se determinaron los parámetros de impresión necesarios y con estos se estableció un tiempo de impresión aproximado de 84min y un tiempo extra de preparación de 30min, además se requiere contar con la impresora Anycubic photon, resina Anycubic y equipo de limpieza para garantizar una buena impresión en 3D.
- Se establece como imprescindible tener en cuenta los diferentes factores que pueden afectar la calidad de la pieza final, por ejemplo: material de impresión, tipo de impresora, aleación a fundir, temperatura de fusión en condiciones de cámara de vacío de la aleación y el yeso adecuado para el molde cerámico de esta. No tenerlo en cuenta puede llevar a un mal acabado superficial por falta de precisión en la impresión 3D o porosidades, faltas de fusión y filtraciones al momento de la fundición.

## 6. Recomendaciones

- El diseño del canal de alimentación y los soportes deben ser adecuados al modelo seleccionado. Se debe tener en cuenta la cantidad de capas de impresión puesto que este parámetro influye directamente con la calidad y el tiempo de la duración de esta. Al momento de imprimir se recomienda usar 40ml de resina como mínimo ya que esto garantiza la inmersión adecuada de la plataforma. Además, verificar la adecuada limpieza de la plataforma en el momento de la preparación de la impresora y calibración de esta.
- Es necesario usar un revestimiento que sea adecuado para la aleación que se vaya a utilizar debido a que la incorrecta selección puede llevar a un mal acabado superficial, oxidación de la pieza final y/o daños en el molde. Evitar sobrepasar el tiempo de preparación del yeso indicado en la ficha técnica para no presentar complicaciones como que se fragüe precipitadamente o queden burbujas atrapadas.
- Se recomienda instalar una termocupla de inmersión en el horno de inducción ya que, en comparación con el medidor óptico del horno, esta presenta mayor precisión al momento de la lectura de temperatura de acuerdo con ensayos realizados en este trabajo. Con esto se evita colar a temperaturas incorrectas.
- Para mejores acabados superficiales se puede hacer uso de diferentes técnicas de pulido o electropulido, que van a depender del modelo, del tamaño y del tipo de aleación a utilizar.

### Referencias Bibliográficas

- ANYCUBIC. (2015). *ANYCUBIC*. Obtenido de ANYCUBIC:  
<https://www.anycubic.com/collections/3d-printers/products/anycubic-photon-s>
- ANYCUBIC. (2020). Installation and use of Photon S slicing software. *Installation and use of Photon S slicing software*. China. Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?v=0g-ruXEPgSQ&t=83s>
- ANYCUBIC. (s.f.). ANYCUBIC PHOTON S Unboxing. *ANYCUBIC PHOTON S Unboxing*. China. Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?v=8tnmnrS23kU&t=187s>
- ASEG GALLONI. (2020). *ASEG GALLONI*. Recuperado el Enero de 2022, de ASEG GALLONI:  
<https://galloni-aseg.com/en/company-profile/>
- Avendaño, A. A. (2012). *Democratización de la impresión 3D con fotopolímeros*. Trabajo de grado, UNIVERSIDAD DE CHILE, Santiago de Chile. Recuperado el Mayo de 2021, de <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/112106>
- Belmont Metals. (s.f.). *Belmont*. Recuperado el Enero de 2022, de Belmont:  
<https://www.belmontmetals.com/product/herculoy-uns-c87610/>
- Chacón, J. A. (2016). Estudio de la influencia de diferentes diseños de los sistemas de alimentación y compensación en la fundición de arena. En J. A. Chacón. Sevilla. Obtenido de [https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/60372/descargar\\_fichero/PFC+Jose+3+Dis e%C3%B1o+y+c%C3%A1lculo+del+proceso+de+fundici%C3%B3n+manual+en+arena.pdf](https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/60372/descargar_fichero/PFC+Jose+3+Dis e%C3%B1o+y+c%C3%A1lculo+del+proceso+de+fundici%C3%B3n+manual+en+arena.pdf)
- Coba Salcedo, M., & Serres Moliner, E. (2006). Estudio comparativo de dos tecnologías de mecanizado rápido; Coproinmold y sinterizado selectivo por láser. *Revista Facultad de*

- Ingeniería*, 64 - 72. Recuperado el Mayo de 2021, de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=43003806>
- Contreras, L. (26 de Mayo de 2022). *3D native*. Obtenido de el sitio web de la impresión 3D: <https://www.3dnatives.com/es/mejores-sofware-cad-programa-180320192/#!>
- Haoyuan Quan, T. Z. (Marzo de 2020). Photo-curing 3D printing technique and its challenges. *Bioactive Materials*, 5, 110-115. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2452199X19300714>
- INGENIUS. (s.f.). *INGENIUS*. Obtenido de INGENIUS: <https://eddm.es/blog-ingenius/software-para-impresion-3d-slicers-para-impresoras-con-tecnologia-fdm-fff/#:~:text=Un%20slicer%2C%20software%20para%20impresi%C3%B3n,la%20superficie%20de%20la%20pieza>.
- Jie Wang, A. G. (2016). Stereolithographic (SLA) 3D printing of oral modified-release dosage forms. *International Journal of Pharmaceutics*, 53, 207-212. Recuperado el Mayo de 2021, de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378517316302150>
- M. Asif, X. S. (2017). New 3D Printing Technique Using Extrusion of Photopolymer, Twenty Fifth International Conference on Process and Fabrication of Advanced Materials. *At University of Auckland, New Zealand*. Recuperado el Mayo de 2021
- Macas Montaña, C. C., & Pilco Llerena, K. J. (2016). *CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO DE FUNDICIÓN MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DE TECNOLOGÍA DE IMPRESIÓN 3D*. Riobamba: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Recuperado el Noviembre de 2021, de <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/4676>
- Marchante, A. (17 de Agosto de 2021). *3D native*. Obtenido de el sitio web de la impresión 3D: <https://www.3dnatives.com/es/myminifactory-web-archivos-stl-170820212/>

- Molner, A. G. (2020). *Uso de la impresión 3d en la fabricación de piezas de geometría compleja mediante fundición a la cera perdida*. Valencia: Universitat Politècnica de València. Recuperado el Noviembre de 2020, de <https://riunet.upv.es/handle/10251/156914>
- Muñoz Mesa, L., & Sánchez Trujillo, J. H. (2016). El impacto de la impresión 3D en la joyería. (16), 89 - 97. Recuperado el Mayo de 2021, de <https://doi.org/10.21501/21454086.2219>
- Palko, C. (28 de Enero de 2015). *MyMiniFactory*. Obtenido de <https://www.myminifactory.com/object/3d-print-yer-twisted-heart-4930>
- Prada, J. L. (2018). Fabricación aditiva y transformación logística: la impresión 3D. *OIKONOMICS*, 58 - 69. Recuperado el Mayo de 2021, de [https://oikonomics.uoc.edu/divulgacio/oikonomics/\\_recursos/documents/09/5\\_Lopez\\_Oikonomics\\_9\\_A4\\_cast.pdf](https://oikonomics.uoc.edu/divulgacio/oikonomics/_recursos/documents/09/5_Lopez_Oikonomics_9_A4_cast.pdf)
- Terriza*. (2022). Recuperado el 30 de Mayo de 2022, de Terriza e hijos: <https://www.terrizaehijos.com/producto/revestimiento-whip-mix-omni-cast-premium-2270-kgs/>
- Vega Rodríguez, L. Y., & Muñoz Mesa, L. (2019). Integración de la impresión 3D en el proceso de cera perdida para la producción de joyas, con fines de estandarización. *Informador Técnico*, 51-65. Recuperado el Noviembre de 2021, de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7030370>

Anexos

Anexo 1. Proporciones agua / yeso

TOP FIGURE – INVESTMENT  
LOWER FIGURE – WATER

HEIGHT OF FLASK

		2"	2½"	3"	3½"	4"	5"	6"	7"
DIAMETER OF FLASK	2"	5 oz. 57 cc.	6 oz. 68 cc.	7.5 oz. 85 cc.	9 oz. 102 cc.	10 oz. 114 cc.			
	2½"	8 oz. 91 cc.	10 oz. 114 cc.	12 oz. 136 cc.	14 oz. 160 cc.	16 oz. 182 cc.	20 oz. 228 cc.		
	3"	12 oz. 136 cc.	15 oz. 170 cc.	18 oz. 206 cc.	21 oz. 240 cc.	1½ lb. 274 cc.	30 oz. 340 cc.	<del>36 oz.</del> 410 cc.	2½ lb. 500 cc.
	3½"	1 lb. 182 cc.	1½ lb. 228 cc.	1½ lb. 274 cc.	1½ lb. 320 cc.	2 lb. 364 cc.	2½ lb. 456 cc.	3 lb. 548 cc.	3½ lb. 640 cc.
	4"	18 oz. 205 cc.	23 oz. 262 cc.	27 oz. 308 cc.	2 lb. 364 cc.	2½ lb. 410 cc.	3½ lb. 510 cc.	3 lb. 637 cc.	4 lb. 728 cc.
	5"					3½ lb. 687 cc.	4½ lb. 864 cc.	5½ lb. 1000 cc.	6½ lb. 1182 cc.

SATIN CAST 20, SUPERVEST, BRIL-CAST 20 and CRISTOBALITE INLAY investments have a water/powder ratio of 40/100

To determine the number of pounds of investment needed to fill any particular flask, divide the cubic inch content of the flask by 20.

## Anexo 2. Ficha técnica yeso omnicast premium



## SCHEDA TECNICA

### OMNICAST-PREMIUM – Gesso Per Micro-Fusione

#### Descrizione

Questo gesso per microfusione è perfetto per fusioni di leghe ad alta temperatura e garantisce un'ottima superficialità, ed inoltre, ha il miglior rapporto tra prezzo e qualità che il mercato possa offrire. Grazie all'alta qualità dei materiali e l'alta quantità di Cristobalite in esso contenuto, questo gesso ha le caratteristiche perfette per ogni tipo di esigenza.

#### Specifiche tecniche

Rapporto di miscelazione: 38 a 100 (miscelazione con sottovuoto) o 40 a 100 (miscelazione normale)

#### Modi d'uso

##### Miscelazione sottovuoto

1. Pesare la polvere e l'acqua rispettando il rapporto di miscelazione (38:100).
2. Miscelare la polvere e l'acqua in sottovuoto per 5 minuti
3. Inserire la miscela nel cilindro da micro-fusione
4. Inserire il cilindro nella macchina a sottovuoto ed attivare il sottovuoto per 1 minuto. Lasciare che il materiale si indurisca e procedere con il ciclo di burnout
- 5.

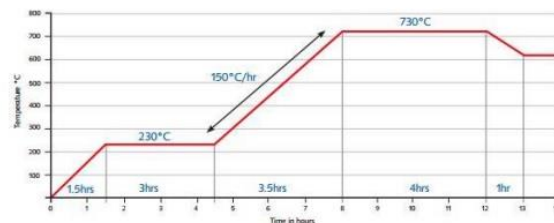
##### Miscelazione normale

1. Pesare la polvere e l'acqua rispettando il rapporto di miscelazione (40:100).
2. Aggiungere la polvere all'acqua e miscelare per 4 minuti
3. Mettere in sottovuoto la miscela per 2 minuti
4. Versare la miscela nel cilindro da micro-fusione
5. Mettere il cilindro in sottovuoto per 2 minuti

#### Ciclo di burnout

- Per il miglior risultato, si consiglia di seguire il ciclo di burnout qui indicato.

#### BURNOUT PROCEDURE



#### Considerazioni sullo smaltimento

Recuperare se possibile. Inviare ad impianti di smaltimento autorizzati o ad incenerimento in condizioni controllate. Operare secondo le vigenti disposizioni locali e nazionali.

#### Confezioni disponibili

- 903600 - BESTCAST PREMIUM Gesso - Confezione Kg. 22,5

Rev01.20181207


1

#### TOOLS & CONSUMABLES

LEGOR GROUP S.P.A. Via del Lavoro, 1, 36050 Bressanvido (VI), Italy | Reg. Imprese Vi - Nr. REA 147954 | Cap. Soc. i.v. 3.000.000€ | CF e PIVA IT 00844230284 | T. +39 0444 467911 - F. +39 0444 660677 | info@legor.com - www.legorgroup.com

**Anexo 3.** Ficha técnica de la aleación Herculoy

**IMPORTADOR MAYORISTA DE  
 HERRAMIENTAS Y PRODUCTOS  
 PARA LA INDUSTRIA DE LA JOYERIA**



**LIGA 935 DE CASTING**

<b>El Nombre de la liga:</b>	935 – Bronce, Cinc bajo.
<b>Nombres comunes:</b>	CDA 876, Herculoy
<b>Descripción general:</b>	Muy fluida con detalles buenos.
<b>Color:</b>	Amarillo
<b>Densidad:</b>	7.96 g/cm <sup>3</sup> o .302 lb/cu <sup>3</sup>
<b>Líquides:</b>	1790F 977c
<b>Vaciado:</b>	Fundición puede hacerse en cualquier atmósfera. No use Flux. La temperatura del vaciado para las piezas pesadas debe ser a 1850f (1010C) y para las piezas más livianas a 2000F (1090c). Ésta es una aleación de encogimiento alto que requiere unos árboles generosos. Esta Liga es muy fluida y da unos detalles buenos.
<b>Temperatura del frasco:</b>	Dependiendo de las partes pero como punto de partida 1100f serian para anillos con detalles de 3 dwt. 950f para los anillos pesados para hombres.
<b>Tiempo del templado:</b>	25 minutos después de vaciar. No temple demasiado pronto.
<b>Encurtiendo:</b>	Un removedor de revestimiento o un equivalente deben usarse. Calentar no es necesario y apropiada seguridad con guantes y gafas debe llevarse.
<b>Reusabilidad:</b>	Se recomienda un ratio de 30% fresco, 70% reciclado. No es necesario volver a granular.

Oficina Norte Calle 119 No. 7-54 Tel: 6120606 Fax 6120506  
 Oficina Centro Calle 12 No 6-19 Tel: 3423691 / 7423938 / 2813662 [www.tecnoinsumos.com](http://www.tecnoinsumos.com)  
 Email: [info@tecnoinsumos.com](mailto:info@tecnoinsumos.com) / [atencionalcliente@tecnoinsumos.com](mailto:atencionalcliente@tecnoinsumos.com)