

Diseño de una guía de práctica para laboratorio de procesos de fundición usando un horno de inducción y máquina de impresión 3D para obtener componentes metálicos

Cristian Bianey Araque Prada

Modalidad: Práctica en docencia

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Metalúrgico

Director

Andrés Giovanni González Hernández

PhD. Ingeniería de Materiales

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales

Ingeniería Metalúrgica

Bucaramanga

2024

Dedicatoria

Primero que todo a Dios por darme la sabiduría necesaria en este camino de aprendizaje y la fortaleza requerida para no desfallecer en los momentos más complicados en mi carrera universitaria.

A mi novia Paula Andrea Toloza que siempre confió en mí, me apoyo incondicionalmente en esta lucha y a quien le debo por siempre este título como Ingeniero Metalúrgico.

A mis padres que a pesar de sus dificultades económicas fueron un sustento en esta etapa de mi vida acompañándome no solo desde lo económico sino también desde lo moral, anímico y religioso con el fin de cumplir con todas las metas propuestas en mi vida.

A mis amigos de la universidad que hicieron parte de este camino de formación académica y que con su apoyo sortearon de manera eficaz y correcta todos los momentos de dificultades vividas en el campus universitario.

A toda la gente que me apoyó incondicionalmente y que aportaron su granito de arena tanto económicamente como espiritualmente durante mi estancia académica en la Universidad Industrial de Santander.

Agradecimientos

A mi novia Paula Andrea Toloza quien me motivó en luchar por mis sueños y metas desde el inicio hasta el final de mi carrera universitaria.

A mi director Andrés Giovanni González Hernández por su confianza, apoyo, conocimiento, servicio y tiempo durante todo el transcurso del desarrollo y sustentación de mi proyecto de grado.

Al profesor Huber Alexander Anaya y a los técnicos de laboratorio de Pirometalurgia y Procesos de fundición, Javier Gaitán y Mario Navarrete, por su gran colaboración, orientación y compromiso al permitirnos el uso de las diferentes instalaciones, máquinas y equipos para la elaboración de esta guía

A Yaddy Gómez por su ayuda incondicional durante toda mi etapa universitaria, por la paciencia y el apoyo desinteresado ante cualquier inquietud, duda o información que necesitaba en relación con la carrera.

A la universidad Industrial de Santander, por elegirme como un miembro más de esta institución académica y brindarme todo el conocimiento adquirido y los espacios necesarios para la enseñanza como parte fundamental de mi vida profesional.

A mis padres, hermanos y familiares que confiaron en mí y aportaron un granito de arena en esta etapa formativa.

Tabla de Contenido

Introducción	13
1.Objetivos... ..	15
1.1.Objetivo General	15
1.2.Objetivos Específicos.....	15
2.Marco teórico y revisión de antecedentes	16
2.1.Técnicas de impresión 3D.....	16
2.2.Generalidades del proceso de fundición Investment Casting	17
2.3.Proceso de fundición en horno de inducción	18
2.4.Fabricación de piezas en Zamak	19
3.Metodología	20
3.1.Conceptos básicos para el manejo de la impresora Creality CR-10 Smart Pro, UltiMaker Cure, Fusión 360 y Meshmixer	20
3.2.Fabricación del modelo en PLA, molde en yeso y el proceso de fundición en horno de inducción.....	21
3.2.1.Selección y diseño del modelo	21
3.2.2.Fabricación del modelo en la impresora 3D.....	22
3.2.3.Elaboración del molde en yeso y tratamiento térmico del mismo	23
3.2.4.Proceso de fundición.....	25
3.3.Fabricación del modelo en PLA, molde en arena y proceso de fundición en horno de inducción.....	27
3.3.1.Selección y diseño de los modelos	27
3.3.2.Fabricación de los modelos en la impresora 3D.....	28

3.3.3.Elaboración del molde en arena.....	28
3.3.3.1.Modelo Moai fabricado en aluminio.....	29
3.3.3.2.Modelo caballo de ajedrez fabricado en fundición gris.	30
3.3.4.Proceso de fundición.....	31
3.3.4.1.Pieza en aluminio.....	31
3.3.4.2.Pieza en fundición gris.....	32
3.4.Diseño del modelo en Fusión 360, fabricación del molde metálico y proceso de fundición en horno mufla.	33
3.5.Charla teórico-práctica a los estudiantes de Escuela de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad industrial de Santander	35
3.6.Diseño de la práctica y guía de laboratorio.....	36
4.Resultados	37
4.1.Escultura en bronce	37
4.1.1.Ensayo 1	37
4.1.2.Ensayo 2	38
4.1.3.Ensayo 3.....	40
4.2.Pieza Moai en aluminio	42
4.3.Pieza caballo de ajedrez en fundición gris	44
4.4.Recordatorio en Zamak.....	46
5.Conclusiones	49
6.Recomendaciones	50
Referencias Bibliográficas	52
Apéndices.....	54

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 <i>Condiciones de trabajo 1</i>	37
Tabla 2 <i>Condiciones de trabajo 2</i>	39
Tabla 3 <i>Condiciones de trabajo 3</i>	41
Tabla 4 <i>Condiciones de trabajo Moai</i>	43
Tabla 5 <i>Condiciones de trabajo Caballo de ajedrez</i>	44

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 <i>Modelado por deposición fundida</i>	17
Figura 2 <i>Modelo Pensador de Rodin</i>	21
Figura 3 <i>Tratamiento térmico del yeso modificado</i>	25
Figura 4 <i>Modelo del Moai y del Caballo de ajedrez</i>	27
Figura 5 <i>Recordatorio en Zamak</i>	34
Figura 6 <i>Evidencia de los defectos obtenidos en la escultura Ensayo 1</i>	38
Figura 7 <i>Evidencia de los defectos obtenidos en la escultura Ensayo 2</i>	40
Figura 8 <i>Evidencia de los defectos obtenidos en la escultura Ensayo 3</i>	41
Figura 9 <i>Pensador de Rodin en bronce</i>	42
Figura 10 <i>Moai en aluminio</i>	43
Figura 11 <i>Pieza final del Caballo de ajedrez en fundición gris</i>	44
Figura 12 <i>Pruebas de ensayos de la fundición</i>	45
Figura 13 <i>Recordatorio en Zamak</i>	46

Lista de Apéndices

pág.

Apéndice A. Planos esquemáticos de los modelos modificados en UltiMaker Cure	54
Apéndice B. Diseño de respiraderos y bebedero en Meshmixer del modelo	54
Apéndice C. Fabricación del modelo. (1) Impresión en PLA (2) Unión de las piezas (3) Aplicación de cera (4) Inserción de puntillas (5) Aplicación de esmalte.....	55
Apéndice D. Etapas de la elaboración del molde en yeso para la fundición de bronce en el modelo del Pensador de Rodin. (1) Moldes metálicos (2) Compra y corte de chatarra de bronce (5kg) (3) Montaje del modelo en el molde (4) Pesaje del yeso y medición del agua en relación con el volumen (5) Agitador metálico (6) Agitación mecánica de la mezcla (7) Vertido de la mezcla dentro del molde (8) Colocación del molde dentro de la mufla.	56
Apéndice E. Horno de inducción Galloni Furnace	57
Apéndice F. Proceso de fundición y colada del bronce en horno de inducción Galloni k10. (1) Crisol de grafito para fundiciones no ferrosas (2) Temperatura de trabajo del horno de inducción (3) Colocación del metal dentro del crisol (4) Retiro de la escoria (5) Extracción del molde de la mufla (6) Colada del metal líquido sobre el molde de yeso (7) Retiro de la pieza del molde y arreglos finales.	57
Apéndice G. Planos esquemáticos de los modelos modificados en UltiMaker Cure	58
Apéndice H. Fabricación de modelos. 1) Impresión en PLA 2) Modelos separados en dos partes para moldeo en arena	58
Apéndice I. Etapas de la elaboración del molde en arena para la fundición de aluminio en el modelo del Moai. (1) Preparación arena de contacto (2) Colocación de modelo en caja inferior (3) Adición de la arena de contacto al molde (4) Apisonamiento de la arena de relleno (5) Retiro de arena del	

molde y arreglo de la superficie de contacto (6) Unión de las partes del modelo y aplicación de polvo de grafito al molde (7) Colocación del bebedero (8) Adición de la arena de contacto al molde (9) Apisonamiento de la arena de relleno (10) Retiro del bebedero (11) Proceso de aireación (1) Elaboración de canales de alimentación (13) Adición del respiradero (14) Colocación final del molde para su posterior colada.	59
Apéndice J. Elaboración del molde en arena para colar fundición gris con el modelo del caballo de ajedrez. (1) Preparación arena de contacto (2) Elaboración de canales de alimentación y respiradero (3) Calentamiento de la arena de contacto de los moldes.	61
Apéndice K. Proceso de fundición y colada del aluminio en horno de inducción Galloni k10. (1) Introducción del metal en el crisol (2) Llenado del crisol (3) Retiro de la escoria (4) Colada del metal en el molde (5) Destrucción y retiro de la pieza del molde.	62
Apéndice L. Proceso de fundición y colada de la fundición gris en horno de inducción Galloni k10. (1) Cambio de equipos para fundición de metales ferrosos (2) Corte de la barra (3) Introducción del metal en el crisol (4) Llenado del crisol (5) Colada del metal en el molde (6) Destrucción y retiro de la pieza del molde.	63
Apéndice M. Charla teórico-práctica. (1) Impresora 3D (2) Horno de inducción (3) Colada en molde de arena y yeso.	64
Apéndice N. Diseño de respiraderos y bebedero en Meshmixer del modelo Ensayo 2	65
Apéndice O. Diseño de respiraderos y bebedero en Meshmixer del modelo Ensayo 3	65
Apéndice P. Guía para el laboratorio de procesos de fundición “ Diseño y fabricación de una pequeña escultura de bronce o aluminio a partir de impresión 3D y un horno de inducción”	66

Apéndice Q. Guía para el laboratorio de procesos de fundición “Elaboración de un molde arena a partir de un modelo realizado en impresión 3D para colar una fundición gris y aluminio fundido en un horno de inducción.”	72
Apéndice R. Ficha técnica impresora 3D CREALITY CR-10 Smart Pro.....	76
Apéndice S. Ficha técnica filamento PLA Esun.....	77
Apéndice T. Proporciones agua / yeso.....	78
Apéndice U. Ficha técnica para Revestimiento Unicast Prestige	79
Apéndice V. Ficha técnica horno de inducción Galloni Furnace	80

Resumen

Título: Diseño de una guía de práctica para laboratorio de procesos de fundición usando un horno de inducción y máquina de impresión 3D para obtener componentes metálicos *

Autores: Cristian Bianey Araque Prada y Andrés Giovanni González Hernández **

Palabras Clave: Horno de inducción, impresión 3D, esculturas, moldeo.

Descripción: La impresión 3D o fabricación aditiva es un proceso que aporta eficientemente a la fundición moderna en la producción piezas metálicas de alta calidad siendo una herramienta útil para crear de manera rápida modelos con geometrías complejas y reduciendo técnicas de mecanizado en su acabado final. En el siguiente trabajo de grado se ve descrito el desarrollo, la elaboración y la implementación de cada una de las guías de laboratorio basadas en los ensayos realizados buscando un mayor aprendizaje práctico a estudiantes de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad Industrial de Santander como complemento al componente teórico de la materia de procesos de moldeo y de fundición. Todas las piezas fueron impresas en material de PLA, algunas de estas se utilizaron como modelos en el proceso de moldeo en arena y las demás como modelos en el proceso de cera perdida enfocándose en el buen desarrollo de la práctica. Estos ensayos se realizaron en un horno de inducción Galloni Furnace, el cual permitió que el proceso de fundición fuera de manera más rápida en metales con diferentes puntos de fusión. Cabe resaltar la ejecución de ensayos preliminares en cada práctica que permitieron conocer y manejar los parámetros, tiempos, costos y materiales requeridos para la ejecución de la experiencia de laboratorio con los estudiantes de la asignatura. Adicionalmente, se participó en clases educativas tanto a los estudiantes de procesos de moldeo como de procesos de fundición en el manejo, manipulación y uso adecuado de la impresora 3D y del horno de inducción en compañía del profesor. Por último, se realizó una práctica de laboratorio utilizando un molde metálico en acero para la elaboración de una pieza en Zamak. Se obtuvo en cada proceso de fundición las piezas metálicas propuestas con resultados concluyentes buenos y satisfactorios para la elaboración de cada práctica de laboratorio.

* Trabajo de Grado (Modalidad, práctica en docencia).

** Facultad de Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los materiales. Director: Andrés Giovanni González Hernández, PhD. Ingeniería de Materiales.

Abstract

Title: Design of a practice guide for a foundry process laboratory using an induction furnace and 3D printing machine to obtain metallic components*

Author (s): Cristian Bianey Araque Prada y Andrés Giovanni González Hernández**

Key Words: Induction furnace, 3D printing, sculptures, molding.

Description: 3D printing or additive manufacturing is a process that efficiently contributes to modern foundry production of high-quality metal parts, being a useful tool to quickly create models with complex geometries and reducing machining techniques in their final finish. The following degree work describes the development, preparation, and implementation of each of the laboratory guides based on the tests carried out seeking greater practical learning for students of Metallurgical Engineering at the Industrial University of Santander as a complement to the theoretical component of the matter of molding and casting processes. All the pieces were printed in PLA material, some of these were used as models in the sand molding process and the others as models in the Investment Casting process, focusing on the good development of the practice. These tests were carried out in a Galloni Furnace induction furnace, which allowed the casting process to be faster in metals with different melting points. It is worth highlighting the execution of preliminary tests in each practice that allowed us to know and manage the parameters, times, costs, and materials required for the execution of the laboratory experience with the students of the subject. Additionally, both students of molding processes and foundry processes participated in educational classes on the handling, manipulation and proper use of the 3D printer and the induction oven in the company of the teacher. Finally, a laboratory practice was carried out using a metal steel mold to make a piece in Zamak. In each casting process, the proposed metal parts were obtained with good and satisfactory conclusive results for the elaboration of each laboratory practice.

* Degree Work (Modality in teaching practice).

**Faculty of Physics-chemistry. School of Metallurgical Engineering and Materials Science. Director: Andrés Giovanni González Hernández, PhD. Materials Engineering

Introducción

El manejo de nuevas tecnologías como el horno de inducción y el diseño de modelos poliméricos (PLA) a través de la impresión 3D busca mejorar los laboratorios de fundición de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica con el fin de que los estudiantes accedan a las temáticas establecidas en cada guía propuesta. De esta manera, los estudiantes van a afianzar sus conocimientos teórico-prácticos, van a evitar el uso incorrecto de los equipos y adquieran experiencia sobre el manejo de los mismos y fortalezcan sus habilidades hacia las herramientas educativas, de tal forma que sean útiles para su vida profesional entendiendo los distintos procesos de fundición que se le pueden realizar a las aleaciones ferrosas y no ferrosas.

En la actualidad, la Escuela cuenta con este tipo de hornos e impresoras 3D necesarias para realización de guías prácticas de laboratorio adecuadas donde se tendrán en cuenta los objetivos establecidos, normas de seguridad a seguir, materiales y equipos a utilizar, metodología indicada, variables del proceso, tratamiento de resultados, análisis de los datos y bibliografía consultada generando calidad, desarrollo y reconocimiento a los programas de Ingeniería donde se fomentará la innovación, la investigación y creatividad a los futuros profesionales metalúrgicos del país.

Para ello se realizarán dos (2) guías, la primera con un modelo obtenido de UltiMaker Thingiverse de una escultura hueca impresa en 3D usando filamento PLA (ácido poliláctico), luego pasará al proceso de Investment Casting para colar bronce o aluminio fundido proveniente del horno de inducción con el objetivo de crear una pequeña escultura. La segunda guía será un modelo descargado de Cults3d impreso en 3D usando PLA y se aplicará a través de la técnica de moldeo en arena para luego colar aluminio y fundición gris obteniendo una pieza maciza y sin defectos posibles.

Por último, se realizará una práctica con un modelo diseñado en Fusión 360; este modelo se fabricará en un molde de caucho vulcanizado o en un molde metálico en acero elaborado por CNC y será utilizado posteriormente para colar Zamak fundido dando la forma a una pieza que represente la Escuela de Ingeniería Metalúrgica posiblemente como un detalle para los futuros graduados o detalle de recuerdo para estudiantes que cursen la asignatura.

Finalmente, se analizaron los parámetros indicados en el proceso de moldeo y de fundición para la elaboración de piezas metálicas con el objetivo de determinar la calidad final de la escultura en bronce y de los modelos en aluminio y fundición gris obtenidos en cada práctica.

1. Objetivos

1.1.Objetivo General

Diseñar tres prácticas de laboratorio de procesos de fundición para la elaboración de componentes metálicos de bronce, aluminio, fundición gris y Zamak a partir de impresión 3D y fundición con horno de inducción.

1.2.Objetivos Específicos

Elaborar una guía práctica de laboratorio para el diseño y fabricación de una pequeña escultura de bronce o aluminio a partir de impresión 3D y un horno de inducción.

Obtener una guía práctica de laboratorio con el fin del aprendizaje en la elaboración de un molde arena a partir de un modelo realizado en impresión 3D para colar una fundición gris y aluminio fundido en un horno de inducción.

Elaborar una práctica de laboratorio para la fabricación de una pieza en Zamak.

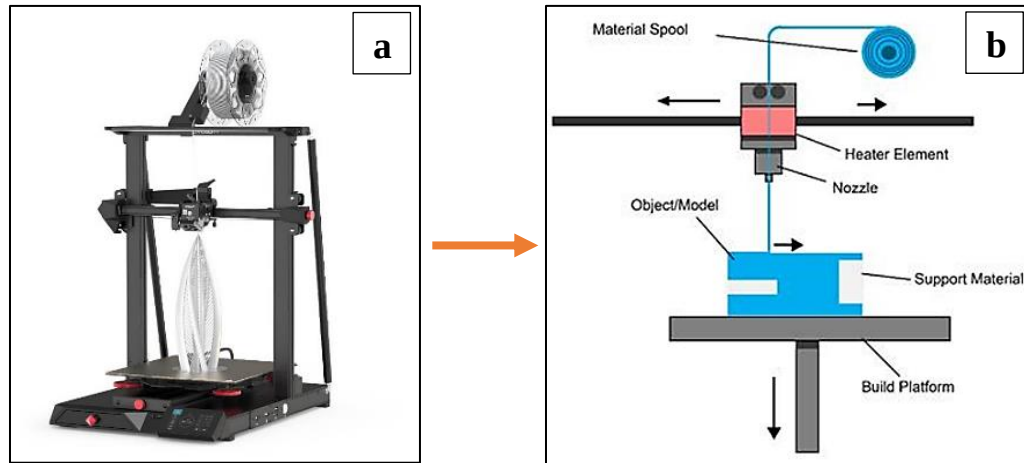
2. Marco teórico y revisión de antecedentes

La impresión 3D es 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, el cual 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 sucesivamente hasta completar las dimensiones (Avendaño, 2012).

2.1. Técnicas de impresión 3D

El método más usado de impresión 3D es el de modelado por deposición fundida (FDM, “fused deposition modeling”) donde la impresora (Figura 1a) calienta el polímero, que está enrollado en una bobina, hasta fundirlo y extruye mediante una boquilla (Figura 1b) un hilo muy fino de material plástico, depositándolo sobre una base de impresión plana. Es el tipo de técnica más extendido con una gran diferencia tanto en impresoras 3D domésticas como en las de uso profesional debido a su bajo costo tanto de la propia máquina como del filamento y a la amplia variedad tanto de materiales como de colores disponible (Lipson, 2014).

Los modelos creados en impresión 3D se han implementado en la fundición moderna en los últimos años con el fin de fabricar modelos para producir piezas más precisas y complejas lo que aumenta la calidad y eficiencia en la empresa. Además, es una herramienta útil para crear de manera rápida estos modelos y pueden imprimir en diferentes materiales como plásticos, resinas y ceras (Miranda, 2020).

Figura 1*Modelado por deposición fundida*

Nota. En la figura se representa el modelado por deposición fundida (FDM) en impresoras 3D.

Tomado de <http://www.mkstechgroup.com/fused-deposition-modeling-fdm/>

2.2.Generalidades del proceso de fundición Investment Casting

También denominado fundición a la "cera perdida", se utiliza para elaborar piezas metálicas a partir de un molde o cáscara cerámica. En este proceso, se realiza el modelo de la pieza generalmente en cera y se coloca dentro de un cilindro de metal (Barrera, 1992). Luego, se vierte yeso húmedo en el cilindro alrededor del modelo de cera. Después de que el yeso se ha endurecido, el cilindro que contiene el patrón de cera se lleva a un horno y se calienta hasta que la cera se haya derretido por completo y finalmente se sinteriza. Después, el cilindro con el yeso se retira del horno y el metal fundido proveniente del horno de inducción se vierte en la cavidad dejado por la cera. Cuando el metal se ha enfriado, el yeso se rompe para obtener la pieza metálica lista para un posterior acabado superficial (Sarojrani Patnaik, 2012) .

Este tipo de fundición es muy útil para crear objetos escultóricos, piezas de joyería o componentes de ingeniería con geometrías complejas. Las piezas fundidas tienen un aspecto único

a diferencia de las piezas mecanizadas. Una de sus ventajas es que existe menos desperdicio de material para la mayoría de las formas, ya que, a diferencia del mecanizado, la fundición no es un proceso sustractivo. Sin embargo, la precisión lograda a través de la fundición no es tan buena como el mecanizado (Prasad, 1994), aunque su acabado superficial a simple vista es excelente (Green-Spikeskey, 1975).

Los modelos de fundición en resina son una alternativa a los modelos de fundición en cera. La resina es un material plástico generalmente PLA que se utiliza para crear modelos tridimensionales a partir de diseños CAD o impresiones 3D. Esta técnica de fundición permite crear modelos precisos y detallados en una variedad de tamaños y formas; muy comunes en la última década, especialmente en la producción de piezas de joyería, prótesis dentales, piezas para la industria médica y piezas de fundición de precisión en general. Además, estos modelos de PLA una vez que se ha impreso son muy utilizados para moldeado en arena en verde reemplazando los modelos de madera, los metálicos y los de poliestireno expandido comunes en los procesos de fundición generando piezas metálicas de buena calidad (Company, 2021) (Falcón Ganfornina, 2023).

2.3.Proceso de fundición en horno de inducción

Un horno de inducción es un horno eléctrico donde el calor es generado por calentamiento a través de la inducción electromagnética de un medio conductor (un metal) en un crisol, alrededor del cual se encuentran las bobinas magnéticas. Los principales componentes de un sistema de calentamiento por inducción son: la bobina de inducción, la fuente de alimentación, la etapa de acoplamiento de la carga, una estación de enfriamiento y el crisol con la carga de la aleación a fundir. El rango de frecuencias de operación va desde la frecuencia de red (50 o 60 Hz) hasta los 10 kHz, en función del metal o aleación que se quiere fundir, la capacidad del horno y la

velocidad de fundición. Las fundiciones más modernas utilizan este tipo de horno y cada vez más fundiciones están sustituyendo los cubilotes por los de inducción, debido a que aquellos generaban mucho polvo y emisiones, entre otros contaminantes. El rango de capacidades de los hornos de inducción abarca desde menos de 1 kilogramo, hasta 320 toneladas y puede fundir metales como aleaciones de hierro, cobre, aluminio, metales preciosos, entre otros. Cuando el metal es cargado en el horno, el campo electromagnético penetra la carga y le induce la corriente que lo funde; una vez la carga está fundida, el campo y la corriente inducida agitan el metal para luego ser colado en el molde y así obtener la pieza deseada (Howarth, 1990). Una ventaja del horno de inducción es que es limpio, eficiente desde el punto de vista energético (eficiencia del 97%), es un proceso de fundición y de tratamiento de metales más controlable que con la mayoría de los demás modos de calentamiento y además con la capacidad para generar una gran cantidad de calor de manera rápida (Fishman, 2000).

2.4.Fabricación de piezas en Zamak

El uso del Zamak ha ido aumentando durante las últimas décadas gracias a sus propiedades físicas, mecánicas y de fundido. Su capacidad para ser revestido, le permite diferentes tipos de acabados, sus bajos puntos de fusión (aprox. 395°C a 485°C) le dan al molde una larga vida y permiten la producción de grandes series de productos fundidos, y su gran fluidez hace más fácil el obtener piezas con formas complejas y paredes finas. Actualmente, las piezas hechas de Zamak son utilizados en diferentes industrias como construcción, electricidad, automotriz, eléctrica, juguetería, joyería, decoración, artículos, móviles, entre otros (Uribe, 2019). La aleación de Zinc Zamak Z-331 es usada para elementos decorativos, fantasías de joyería, tiradores de cierres relámpago, medallas, escudos, llaveros.

3. Metodología

La metodología para este trabajo de grado en la modalidad de práctica en docencia se basó en cuatro (4) etapas. En la primera se conocieron y se pusieron en práctica conceptos básicos para el manejo de la impresora 3D CREALITY CR-10 SMART PRO, del software UltiMaker Cure y los programas CAD (Fusión 360 y Meshmixer). La segunda etapa se determinaron, compraron y ejecutaron todos los materiales necesarios y equipos para desarrollar la práctica de cada laboratorio teniendo en cuenta el tipo de metal y las variables de trabajo. En la tercera etapa, se realizó una breve charla teórico-práctica sobre el manejo de las impresoras 3D y del horno de inducción que cuenta el laboratorio a los estudiantes de la materia “Procesos de moldeo y fundición” de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica de la UIS. Y la última etapa, se basó esencialmente en la elaboración de las guías para cada actividad del laboratorio.

3.1. Conceptos básicos para el manejo de la impresora Creality CR-10 Smart Pro, UltiMaker Cure, Fusión 360 y Meshmixer

Se inició este trabajo grado conociendo el manejo del software UltiMaker Cure y de la impresora 3D a través de videos educativos y manuales de operación de los mismos; de esta manera se logró identificar que parámetros de trabajo son los más relevantes a la hora de modificar el diseño original de un modelo basándonos en el tipo de material del filamento, la calidad del modelo, la velocidad de impresión y la temperatura recomendada para el extrusor y la base de impresión. Además, se buscó el método más eficaz y sencillo de imprimir piezas evitando pérdidas de material, tiempo y daños a los equipos.

Una vez establecidos dichos conocimientos con el profesor, se estableció los modelos que se iban a imprimir para cada guía de laboratorio y se rediseñaron geometrías específicas requeridas

para el proceso de fundición con la ayuda de los softwares CAD de los cuales también se necesitó información detallada sobre el manejo de las herramientas de trabajo presentes en el programa.

3.2.Fabricación del modelo en PLA, molde en yeso y el proceso de fundición en horno de inducción

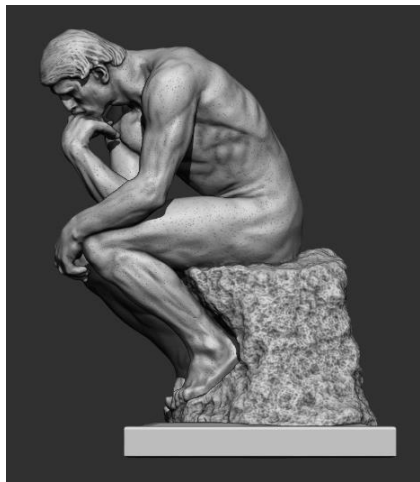
Para el proceso de cera perdida en la elaboración de una escultura en bronce se utilizó como modelo el Pensador de Rodin; este diseño se descargó de la página web UltiMaker Thingiverse. A continuación, se describen los pasos del proyecto que corresponde a esta guía de laboratorio.

3.2.1. Selección y diseño del modelo

Se seleccionó como modelo el Pensador de Rodin (Figura 2) para la realización de la práctica.

Figura 2

Modelo Pensador de Rodin



Nota. En la figura se representa el modelo del Pensador de Rodin descargado en UltiMaker Thingiverse.

Se modificó el tamaño del modelo (Apéndice A) con la ayuda de UltiMaker Cure con el fin de realizar una escultura de buen tamaño. Una vez realizados estos cambios del modelo

utilizando el programa Meshmixer se editó el diseño; lo primero que se hizo fue hacer una la pieza hueca con un espesor de pared de 3 mm (en la opción Edit-Hollow) y lo segundo se realizaron los respiraderos correspondientes (en la opción Edit-Add Tube) en algunas zonas críticas del modelo donde se requería la entrada del metal líquido y la salida de los gases durante el proceso. El bebedero se creó en el programa Fusión 360 con las medidas correspondientes al modelo y las especificaciones para la entrada y llenado del metal líquido; se descargó en formato stl y se insertó en el modelo respectivo en Meshmixer (Apéndice B).

En la opción de Meshmixer Analysis-Stability se determinó el volumen del modelo con el fin de calcular la cantidad de bronce requerido para la escultura teniendo en cuenta la densidad del metal y además de la capacidad con que cuenta el crisol del horno de inducción.

Antes de iniciar la fabricación del modelo del pensador con sus respectivas modificaciones se llevó al UltiMaker Cure y ajustando las variables; se evidenció que este proceso de impresión de todo el modelo tendría un tiempo aproximado de 3 días de terminación; por tal motivo, se consideró cortar en varias secciones el modelo (en la opción Edit-Plane Cut de Meshmixer) reduciendo el tiempo y asegurando un mejor trabajo de las impresoras del laboratorio.

Nota. Las modificaciones realizadas a los modelos se explicaron paso a paso a través de contenido audiovisual creado y se pueden observar a través de los enlaces de YouTube anexados al final de cada guía de laboratorio.

3.2.2. *Fabricación del modelo en la impresora 3D*

Cada pieza cortada del modelo se realizó con material de PLA (ácido poliláctico, material termoplástico biodegradable el cual se contaba en el laboratorio de fundición, con una temperatura de fusión entre 180-220 °C y una densidad de 1.24 g/cm³) en la impresora 3D Creality CR-10 Smart Pro (Apéndice C1) teniendo en cuenta los parámetros y las variables de impresión las cuales

se modificaron en UltiMaker Cure. Las piezas que se fabricaron en las impresoras se unieron con pegamento Super Bonder un adhesivo instantáneo usado en materiales como porcelana, metal, caucho, madera y plástico (Apéndice C2) y los espacios de unión se llenaron con cera al igual que en el interior del modelo hueco (Apéndice C3). Por último, se pegaron los bebederos al modelo y se le insertaron puntillas alrededor del él con el objetivo de sostener el molde de yeso después de su tratamiento térmico (Apéndice C4) y se le aplicó una capa de esmalte Rust-Oleum Ultra Cover 2x para proteger la superficie del modelo y darle mayor resistencia al momento del llenado con yeso (Apéndice C5).

3.2.3. *Elaboración del molde en yeso y tratamiento térmico del mismo*

Para esta práctica se tuvo que hacer nuevos moldes metálicos debido al tamaño de la escultura deseada teniendo en cuenta las dimensiones de la mufla que se iba a utilizar para el proceso (Apéndice D1). Con el profesor del proyecto, se decidió comprar chatarra de bronce debido a los costos del material y teniendo en cuenta los cálculos de volumen ya establecidos se necesitaron 5 kg del metal, con la ayuda de la pulidora se cortaron en trozos más pequeños para que pudieran entrar dentro del crisol del horno (Apéndice D2).

Se montó el modelo sobre la tapa de madera ajustada en el cilindro metálico de manera que estuviera listo para recibir la mezcla preparada. Se necesitó de unos tornillos para ajustar la tapa de madera con el bebedero del modelo en PLA teniendo en cuenta colocarlo en una posición adecuada dentro del molde (Apéndice D3).

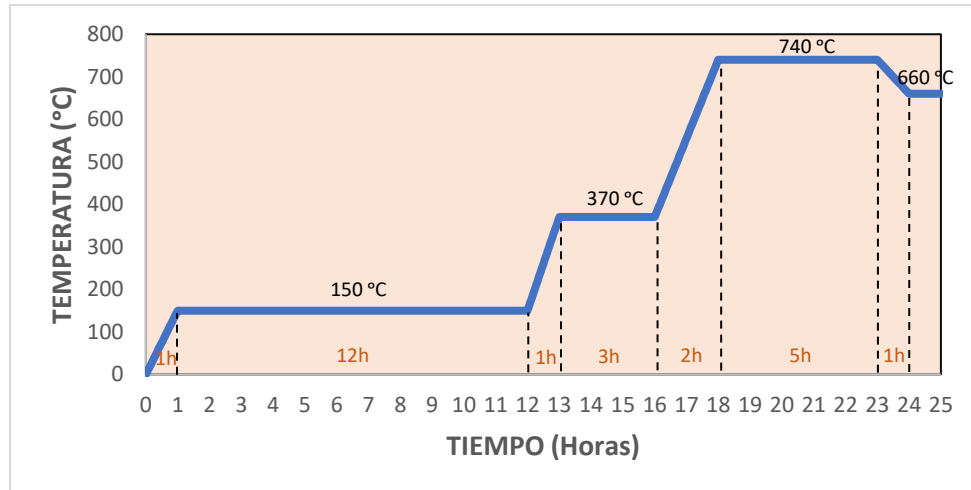
El yeso Prestige UNICAST fue el seleccionado para la fabricación del molde cerámico, puesto que ofrece buenas características de expansión térmica, permeabilidad y distribución del tamaño de partículas, muy utilizado en procesos de fundición en joyería. Para determinar las proporciones agua/yeso, se tuvo en cuenta la relación que había entre las dimensiones del molde

metálico con la cantidad de agua a mezclar (Apéndice T) y la relación agua/yeso dada por los fabricantes del yeso Prestige UNICAST. El molde metálico utilizado tenía un volumen de 17180 cm³ por tal motivo se pesaron 22.1 kg de yeso y una relación de agua de 8898.8 cm³ (Apéndice D4). Luego, se elaboró un mezclador metálico ya que el laboratorio no contaba con este equipo para grandes cantidades utilizando pedazos de varillas y recortes de chatarra (Apéndice D5).

Se inició la mezcla adicionando de manera lenta yeso y agitándola constantemente durante 2 minutos de tal forma que esta quedara completamente homogénea y se evitara la creación de grumos de yeso que posteriormente podrían llegar a generar inconvenientes en el desarrollo normal del proceso (Apéndice D6). Primero, se llenó con yeso la parte hueca del moldeo teniendo en cuenta el cálculo del volumen interior, una vez seco se vertió la mezcla dentro del molde y se colocaron contrapesos para evitar la salida del mismo (Apéndice D7).

En este proceso no se utilizó la bomba de vacío debido a las dimensiones del molde. Posteriormente, la mezcla se dejó solidificar entre 1 y 2 horas, terminado este tiempo se retiró la tapa de madera, se limpió la superficie y se procedió al tratamiento térmico del yeso.

El tratamiento térmico de endurecimiento del yeso se realizó en base a la ficha técnica del yeso (Apéndice U) en el horno tipo mufla que pertenece al laboratorio de Pirometalurgia (Apéndice D8). Sin embargo, por las dimensiones del molde se tuvieron que ajustar estos parámetros para obtener un mejor resultado en el ensayo (Figura 3).

Figura 3*Tratamiento térmico del yeso modificado*

Nota. En la figura se representa el tratamiento térmico del yeso Prestige UNICAST modificado para el proceso de fundición.

El molde se mantuvo en el horno hasta el momento de la colada y se iba verificando las temperaturas debido a que el horno era nuevo y se trabajaba por primera vez; en algunos casos se requirió la ayuda del técnico de mantenimiento porque el panel de control digital arrojaba errores de temperatura en la mufla.

3.2.4. *Proceso de fundición*

El horno de inducción Galloni Furnace (Apéndice E) utilizado en la práctica, es un horno eléctrico de media frecuencia con posición estática apto para la colada en lingotera, de fácil montaje, tiempos de precalentamiento y fundición cortos. Cuenta con dos tipos de crisoles, uno de ellos de grafito recubierto con una funda cerámica para el uso de metales no ferrosos (aluminio, bronce, latón) y el otro de cerámica de menor capacidad para metales ferrosos (fundición gris, nodular, aceros). Además, el horno presenta un sistema de refrigeración en el interior del equipo y una sonda térmica capaz de llegar hasta 1150 °C que está alojada en la pared del crisol de grafito

permitiendo el control digital automático y la estabilización de la temperatura para lograr que el metal se desplace con mayor fluidez y logre su temperatura deseada de fusión. Su rápida transferencia de calor proporciona tiempos de fusión estipulados entre 10 a 20 minutos según sea la cantidad y tipo de material a fundir. Adicionalmente, el horno permite visualizar lo que ocurre con la aleación dentro del crisol teniendo en cuenta el uso de elementos de protección personal.

Para la práctica de la escultura se utilizó el crisol de grafito recubierto con una funda cerámica (Apéndice F1) para el bronce, el cual posee una temperatura de fusión entre 900-1020°C, con una densidad de 8.7 g/cm³ y una temperatura de colada entre 1100-1150°C. El cálculo del peso requerido para el bronce se realizó en base al volumen del modelo (este dato se halló utilizando Meshmixer en la opción Analysis-Stability) y su valor de densidad. Durante el procedimiento, se prendió el equipo, se inició el sistema de refrigeración y se ajustó la temperatura de trabajo del horno a 1150 °C (Apéndice F2) para la práctica. Una vez pesadas y precalentadas las piezas se introdujeron dentro del crisol con ayuda de unas pinzas metálicas (Apéndice F3). Durante la fusión del metal se iba observado el cambio de color del crisol y el aumento de metal líquido en él (Apéndice F4). El tiempo de fusión total del bronce fue de 15 minutos y al final con una cuchara se le retiró la escoria presente en el metal.

Terminado el tratamiento térmico del molde de yeso (Apéndice F5), este fue inmediatamente trasladado hacia el laboratorio de fundición y se realizó el proceso de colada del metal líquido sobre el molde de yeso (Apéndice F6) y se dejó enfriar entre 30-40 minutos. Posteriormente se extrajo la pieza metálica del molde utilizando agua a presión con la ayuda de una manguera (Apéndice F7) y se cortó con la segueta los respiraderos y el bebedero para obtener el diseño original del Pensador de Rodin en bronce. Por último, se realizó el pesaje de la pieza buscando conocer la cantidad de material perdido durante el proceso.

Para este ensayo no se utilizó cámara de vacío debido a las dimensiones del molde y a la falta de equipos para dicho proceso.

3.3.Fabricación del modelo en PLA, molde en arena y proceso de fundición en horno de inducción

Para el proceso de moldeo en arena se utilizó como modelo “el Moai” y “el caballo de ajedrez”; estos diseños se descargaron de páginas web Cults3d. A continuación, se describen los pasos del proyecto que corresponde a esta guía de laboratorio.

3.3.1. Selección y diseño de los modelos

Se seleccionaron y descargaron dos modelos uno de ellos el Moai y el otro el caballo de ajedrez (Figura 4) para la realización de la práctica.

Figura 4

Modelo del Moai y del Caballo de ajedrez



Nota. En la figura se representa los modelos del Moai y del Caballo de ajedrez descargados en Cults3d.

Se modificó el tamaño de los modelos (Apéndice G) con la ayuda de UltiMaker Cure teniendo en cuenta la capacidad de los crisoles del horno de inducción para establecer el volumen indicado de cada uno de los modelos en base a la densidad del metal a trabajar calculando la masa requerida para la fundición y respectiva colada en el molde de arena evitando pérdidas o falta de metal.

Una vez modificado estos modelos con la ayuda de Meshmixer se editó la geometría de cada uno (en la opción Edit-Plane Cut) para generar dos partes iguales que luego serán separadas para colocar una de ellas en la caja superior de molde y la otra en la caja inferior. Además, se le adicionó al diseño unos pines o printos cuya función consiste en fijar las dos partes del modelo cortado y también los orificios para poder retirar cada pieza de la arena de contacto, una vez hecho el molde. Por último, se guardó el nuevo diseño y utilizando nuevamente UltiMaker Cure se ajustaron las variables requeridas para el buen desempeño del modelo, al momento de realizar el moldeo. Por otro lado, las modificaciones realizadas a los modelos se explicaron paso a paso a través de contenido audiovisual y se pueden observar en los enlaces de YouTube anexados al final de cada guía de laboratorio.

3.3.2. *Fabricación de los modelos en la impresora 3D*

Los modelos se realizaron con material de PLA en la impresora 3D Creality CR-10 Smart Pro (Apéndice H1) teniendo en cuenta los parámetros y las variables de impresión para obtener en cada modelo dos piezas separadas (Apéndice H2) que luego fueron utilizadas en el proceso de moldeo en arena.

3.3.3. *Elaboración del molde en arena*

Para la fabricación de los moldes en arena, se tuvo en cuenta el tipo de metal que se iba a fundir (aluminio y fundición gris), además se retroalimentó nuevamente la manera correcta de

realizar el molde de acuerdo con lo visto y estudiado semestres anteriores en la materia de “Procesos de moldeo”.

3.3.3.1. Modelo Moai fabricado en aluminio. Una vez elegido el modelo a trabajar se preparó la arena de contacto en este caso se introdujo en el mezclador rotatorio arena sílice fina y bentonita (aprox. 6%) agregándole entre un 6-8 % de agua (Apéndice I1). Se ajustó en la caja inferior la posición más favorable del modelo con su respectivo bebedero (Apéndice I2), se retiró el bebedero y se añadió la arena de contacto ya preparada dentro de la caja inferior y se iba aplicando presión sobre el modelo con los dedos de las manos evitando que hubiese desplazamiento en la base del molde (Apéndice I3).

Ya cubierto el modelo en su totalidad con la arena de contacto se agregó arena de relleno sobre esta y se compactó con la ayuda de los apisonadores de mano que cuenta el laboratorio (Apéndice I4). Se eliminaron los residuos de arena que quedaban en la superficie del molde con la llana metálica, se retiró la caja inferior de la superior con el propósito de preparar la superficie de contacto del molde utilizado la espátula metálica (Apéndice I5).

Se unieron las dos partes del modelo y se agregó polvo separador de grafito a la superficie de contacto con el fin de evitar la adherencia de la arena de la caja inferior con la superior (Apéndice I6). Posteriormente se insertó el bebedero sobre la arena colocándolo a una distancia adecuada para la elaboración del canal de alimentación (Apéndice I7), se colocó la caja superior y se agregó arena de contacto (Apéndice I8). Al compactar correctamente la arena de contacto con los dedos de las manos se agregó arena de relleno y se apisonó nuevamente teniendo cuidado con no introducir dicha arena dentro del bebedero (Apéndice I9), luego se eliminó la arena de la superficie con la llana metálica y se retiró el bebedero cuidadosamente (Apéndice I10).

Luego se realizaron los respiradores con la ayuda del punzón utilizado como medida de profundidad la distancia de la superficie del molde con la altura máxima de la pieza modelo (Apéndice I11). Se retiró la caja superior de la inferior y utilizando la espátula, los ganchos, alisadores, entre otras herramientas se hizo el canal de alimentación y el ataque al modelo de la caja superior e inferior y también el pie de colada (Apéndice I12); este paso es muy delicado ya que se tiende a dañar la geometría de la pieza ya moldeada.

Una vez terminado los canales de alimentación y el ataque, se eliminaron los residuos de arena presentes dentro y fuera del molde con la manguera de compresión de aire; al final se hizo un respiradero en la base de la cavidad (Apéndice I13). Listos los moldes, se coloca la caja superior con la inferior en un lugar seguro y plano para continuar con la colada del metal (Apéndice I14).

3.3.3.2. Modelo caballo de ajedrez fabricado en fundición gris. En esta etapa con la arena de contacto ya preparada anteriormente para el molde del Moai se agregó en el mezclador rotatorio carbón bituminoso fino (aprox. 5-6%) cuya función es la de proteger la superficie del molde contra la acción del metal fundido causado por las altas temperaturas de trabajo, reduciendo la ocurrencia de penetración del metal y proporcionando buena permeabilidad. Además, este carbón es un aditivo que mejora la separación de la pieza y provee un adecuado acabado superficial (Tartera, 2008). También, se le agregó de 50-100 ml de agua (Apéndice J1) a la mezcla. Se realizaron los mismos pasos utilizados en la elaboración del molde en arena de la Apéndice I; y una vez terminado el molde, se separaron las dos cajas y se diseñaron los canales de alimentación y el respiradero (Apéndice J2).

Por último, con la ayuda del soplete se calentó la arena de contacto del molde en ambas caras con el fin de secarla y darle una mayor rigidez al momento de colar el metal (Apéndice J3).

3.3.4. *Proceso de fundición*

3.3.4.1. Pieza en aluminio. Para esta etapa se utilizaron lingotes, bebederos y probetas que contaba el laboratorio procedente de prácticas anteriores de la materia “procesos de fundición”, por tal razón se escogió este material con el fin de reducir costos y además de reutilizarlo nuevamente para nuevas prácticas. Las aleaciones de aluminio presentan alta ductilidad, excelente fluidez, forma poca escoria y requiere de poco acabado superficial en las piezas producidas en moldes de arena (Rooy, 2005). Posee una temperatura de fusión de 660°C , con una densidad de 2.7 g/cm^3 y una temperatura de colada entre $700\text{-}780^{\circ}\text{C}$. El cálculo del peso requerido para la fundición de la aleación se realizó en base al volumen del modelo (este dato se halló utilizando Meshmixer en la opción Analysis-Stability) y su valor de densidad. Del mismo modo, se midieron las dimensiones del bebedero y del canal de alimentación determinando la cantidad de aluminio requerido para ocupar todo el espacio dentro del molde de arena. El valor total de la carga de aluminio utilizada fue de 1200 g.

Antes de iniciar la fundición, se realizaron las medidas del crisol de grafito del horno con el fin de determinar su volumen y de acuerdo con la densidad del metal calcular la cantidad máxima de metal fundido buscando evitar el derrame del mismo, la capacidad del crisol es de 1250 g si se tiene en cuenta que vamos a trabajar con aluminio. Se inició el sistema de refrigeración y se ajustó la temperatura de trabajo del horno a 780°C para la fundición del aluminio, una vez pesadas y precalentadas las piezas se introdujeron dentro del crisol de grafito con ayuda de unas pinzas metálicas (Apéndice K1). Durante la fusión del metal se iba observado el cambio de color del crisol y el aumento de metal liquido en él (Apéndice K2). El tiempo de fusión total del aluminio fue de aproximadamente 10 minutos y al final con una cuchara se le retiró la escoria presente (Apéndice K3).

Posteriormente, se realizó el proceso de colada del metal líquido utilizado contrapesos sobre el molde de arena y se dejó enfriar por algunos minutos (Apéndice K4). Se extrajo la pieza metálica del molde de arena utilizando el apisonador de manos, se llevó con unas pinzas la pieza para enfriarla en agua (Apéndice K5) y se cortó con la segueta el canal de alimentación para obtener el diseño original del Moai en aluminio.

Finalmente, se realizó el pesaje de la pieza buscando conocer la cantidad de material perdido durante el proceso.

3.3.4.2. Pieza en fundición gris. Lo primero que se hizo fue el adecuamiento del horno, donde se cambió la bobina de calentamiento del horno, el crisol, la peana y el pin para fundiciones ferrosas (Apéndice L1). Una vez realizados estos cambios se hicieron las medidas del crisol para determinar su volumen y de acuerdo con la densidad del metal hallar la cantidad máxima de metal fundido requerido. Luego se calculó del peso del modelo, el bebedero y el canal de alimentación en base al volumen de cada uno y a la densidad del metal de trabajo reduciendo errores de llenado dentro del molde de arena. Se utilizó una barra de fundición gris de 2 pulg. de diámetro por 40 cm de largo con un peso apróx. de 1750 g, con una densidad de 7.1 g/cm^3 y con punto de fusión de 1300°C . En este caso no se pudo ajustar la temperatura de trabajo ya que este equipo no cuenta con un medidor (termopar) que registre temperaturas mayores a los 1200°C . Fue necesario precalentar el crisol en una mufla a 200°C por 1 hora, además cortar en pedazos la barra de fundición gris (Apéndice L2) y luego precalentarlos en la parte superior del horno para luego ser introducidas dentro del crisol (Apéndice L3).

Una vez comenzó la fusión del metal en el crisol se le añadió unas cucharadas de FeSi (Ferro-silicio) que además de ser un inoculante para promover la formación de grafito mejora la colabilidad del metal (Gomez, 2022). El tiempo de fusión total de la fundición gris fue de

aproximadamente 20 minutos observándose sobre la superficie del crisol un color amarillo incandescente (Apéndice L4).

Por último, se realizó el proceso de colada del metal líquido dentro del molde de arena y se dejó enfriar por algunos minutos (Apéndice L5) para luego extraer la pieza metálica del molde (Apéndice L6) y retirarle el canal de alimentación.

3.4.Diseño del modelo en Fusión 360, fabricación del molde metálico y proceso de fundición en horno mufla

Se realizó una práctica de laboratorio cuyo objetivo principal era elaborar un recordatorio pequeño en Zamak. Lo primero que se hizo fue buscar junto con el profesor un diseño que identificara a los estudiantes con nuestra universidad, en este caso un pisa papel con el logo de la UIS y elaborarlo de acuerdo con la mediciones y parámetros de trabajo estipuladas utilizando Fusión 360 (Figura 5a y Figura 5b) , después de terminar el diseño se exportó el archivo en stl y se imprimió en la impresora 3D como una referencia visual del diseño original que se deseaba obtener (Figura 5c).

Luego de crear el diseño se llevó a una máquina CNC (Control Numérico Computarizado) para que fabricara un molde metálico en acero con la forma del pisa papel (Figura 5d). Teniendo en cuenta el volumen de la pieza y la densidad del metal se calculó la cantidad de Zamak 331 requerida para el proceso de fundición; en este caso fue de 132 g de carga. Una vez cortada la pieza del lingote se introdujo en un crisol y se colocó en la mufla a una temperatura de trabajo de 485 °C por 30 minutos para fundir el metal.

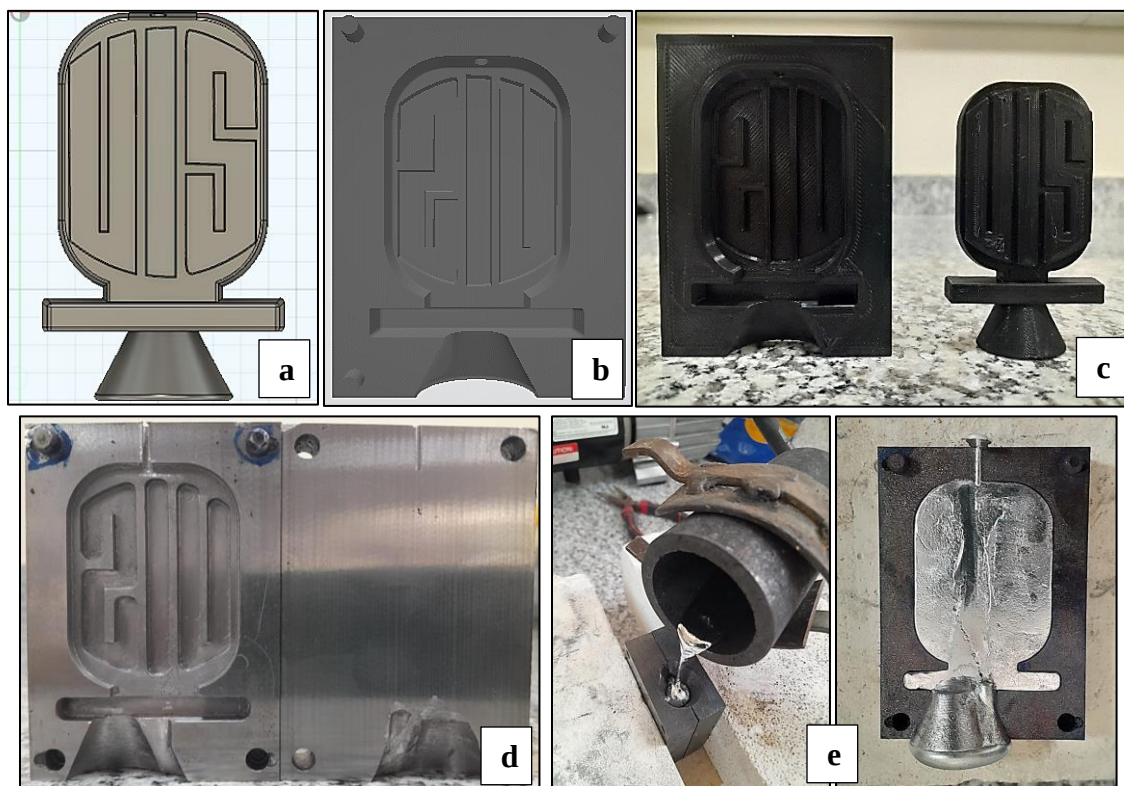
Antes de iniciar la colada del metal se le agregó a la superficie de las dos piezas del molde metálico polvo separador de grafito para evitar la adherencia o unión de los dos metales expuestos

y se llevó el molde a precalentamiento dentro de la mufla. Se retiró el molde y la placa del horno y con la ayuda de una prensa se juntaron las dos partes.

Por último, se realizó el proceso de colada del metal dentro del molde metálico, se dejó enfriar por unos minutos y se desmoldeo el recordatorio para terminar con el corte del bebedero y su acabado superficial (Figura 5e).

Figura 5

Recordatorio en Zamak



Nota. En la figura se representa el recordatorio en Zamak. **(a)** Diseño de la pieza en Fusión 360 **(b)** Negativo de la pieza de Fusión 360 **(c)** Impresión en PLA **(d)** Elaboración molde metálico por CNC **(e)** Proceso de fundición y colada del Zamak en el molde metálico.

3.5.Charla teórico-práctica a los estudiantes de Escuela de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad industrial de Santander

Afianzados los conocimientos en el manejo de las impresoras 3D, equipos, herramientas y de los diferentes programas utilizados para la elaboración de los modelos en PLA, además del desarrollo de cada uno de los ensayos de laboratorio; se acordó con el profesor del proyecto y con el profesor Huber Anaya realizar unas clases de enseñanza en el laboratorio a los estudiantes de las materias de “Proceso de moldeo y de fundición” semestre 2023-II de la escuela de Ingeniería Metalúrgica.

En la primera clase se hizo una breve reseña sobre el termino de “Fabricación aditiva”, aplicaciones en la industria, se explicó cada una de las partes de la impresora 3D con sus correspondientes funcionalidades y los ajustes en el panel de control de acuerdo con el material de trabajo que vaya a usar. Luego se les mostró el programa UltiMaker Cure con el cual trabaja la impresora, las variables más importantes junto con los parámetros requeridos y las modificaciones se pueden hacer a un modelo tridimensional. Una vez terminada la charla se realizó la impresión de un Moai con el objetivo de hacer una práctica en el horno de microfusión utilizando el proceso de Investment Casting. Además, se acompañó a algunos estudiantes a realizar sus propios diseños en Fusión 360, pasarlos a formato stl, guardarlos en un archivo, modificar las variables en UltiMaker y ajustar el panel de control de la impresora para que fueran impresos en PLA (Apéndice M1).

En la segunda clase se explicó el funcionamiento del horno de inducción Galloni, algunas características del equipo, las aplicaciones en la industria, los metales que se pueden fundir en él, las condiciones de trabajo seguro, la temperatura máxima que alcanza y el tiempo de fusión dependiendo del tipo de metal. Se hace una práctica con los estudiantes utilizando aluminio y

bronce para fundir en el horno, a cada uno de ellos se le ajustó la temperatura de trabajo y se pesó la cantidad de metal requerida para cada pieza (Apéndice M2). Una vez terminada la fusión de los metales se realizó la colada de cada uno; para el aluminio en el molde de arena y para el bronce en el molde de yeso (Apéndice M3). Estas prácticas se ejecutaron en compañía del profesor y del técnico del laboratorio.

3.6.Diseño de la práctica y guía de laboratorio

Se planteó una experiencia basada en tres momentos:

1. Selección del modelo, diseño de respiraderos y del bebedero (en el caso que el profesor y los estudiantes decidan cambiar el moldeo estipulado en la guía) teniendo en cuenta los parámetros de trabajo establecidos en la práctica.

2. Impresión 3D de las piezas modificadas en la carpeta “Guía de laboratorio–Escultura en bronce (Pensador de Rodin)”, fabricación del molde en yeso y elaboración del molde en arena con los modelos ya impresos del Moai y del Caballo presentes en el laboratorio.

3. Manejo adecuado del horno de inducción y posterior colada del metal líquido.

En la guía de laboratorio se detalla la metodología a seguir apoyada con videos complementarios que le permitirá a los estudiantes comprender la temática de la mejor manera. El docente tendrá total autonomía para el desarrollo de los 3 momentos que conforman la experiencia práctica diseñada.

4. Resultados

4.1. Escultura en bronce

Para esta práctica de laboratorio se desarrollaron tres ensayos variando en cada una de ellas condiciones óptimas de trabajo que determinaron el acabado final de las piezas obtenidas.

4.1.1. Ensayo 1

Tabla 1

Condiciones de trabajo 1

Volumen del cilindro (cm³)	17180
Cantidad de yeso (kg)	22.1
Cantidad de agua (cm³)	8.9
Cantidad máxima de bronce ocupado en el crisol (g)	4350
Total de bronce escultura (g)	4540

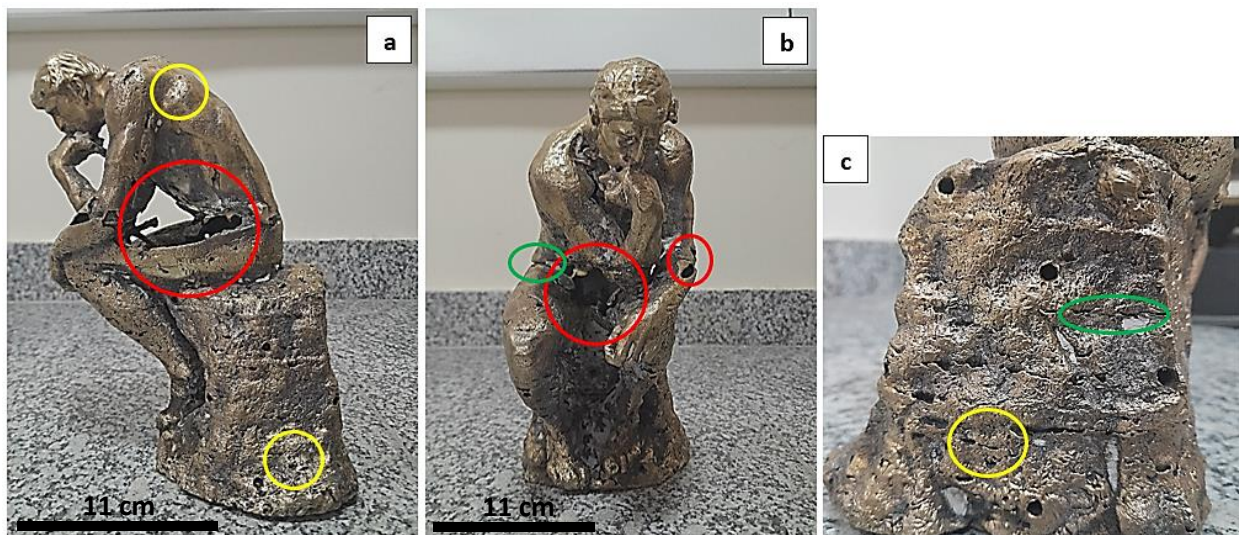
Nota. Esta tabla muestra las condiciones de trabajo para el ensayo 1 de la escultura en bronce.

De acuerdo con el modelo diseñado en Meshmixer del pensador de Rodin en la **Apéndice B** y con las modificaciones respectivas del tratamiento térmico del yeso de la **Figura 3**, se pudo observar en la escultura de bronce (Figura 6a, Figura 6b, Figura 6c) defectos muy notorios que comprenden desde la falta de llenado del metal en algunas zonas (pierna izquierda, brazo izquierdo, abdomen, entre otros) señalados en color rojo causados posiblemente por alta temperatura de llenado del metal líquido, material de fundición inadecuado (sucio, sin desgasificante) y tratamiento térmico incorrecto del molde de yeso. También, se evidenció porosidades visibles en la superficie destacados en color amarillo que pueden ser efecto de las pequeñas burbujas de aire

que quedaron comprimidas en el momento de verter el yeso líquido al cilindro metálico ya que no se pudo realizar vacío, además del aire atrapado al momento de colar el metal en el molde y que no pudo salir por los respiraderos del modelo. Grietas alargadas señaladas en color verde posiblemente causadas durante el proceso de enfriamiento y solidificación, allí el material se fracturó debido a la tensión dentro y fuera de él (Echevarría, 2022). Por último, se notó en algunas partes de la escultura zonas quemadas o negras posiblemente generadas por residuos de PLA presentes en el yeso después del tratamiento térmico que generaron una reacción al estar en contacto con el metal líquido.

Figura 6

Evidencia de los defectos obtenidos en la escultura Ensayo 1



Nota. Esta figura muestra los defectos obtenidos en el proceso de fundición de la escultura en el ensayo 1.

4.1.2. Ensayo 2

En este ensayo se cambió el tamaño del modelo con el propósito de reducir gastos en el uso del yeso y se rediseñó nuevamente los respiraderos (mayor diámetro) y el bebedero para

mejorar la salida de gases durante la colada del metal y obtener un buen llenado del mismo en algunas zonas críticas (Apéndice N). Se reutilizó, corto y limpio el metal de bronce utilizado en el Ensayo 1.

Tabla 2

Condiciones de trabajo 2

Volumen del cilindro (cm³)	12164
Cantidad de yeso (kg)	14.1
Cantidad de agua (cm³)	5.67
Cantidad máxima de bronce ocupado en el crisol (g)	4350
Total de bronce escultura (g)	4340

Nota. Esta tabla muestra las condiciones de trabajo para el ensayo 2 de la escultura en bronce

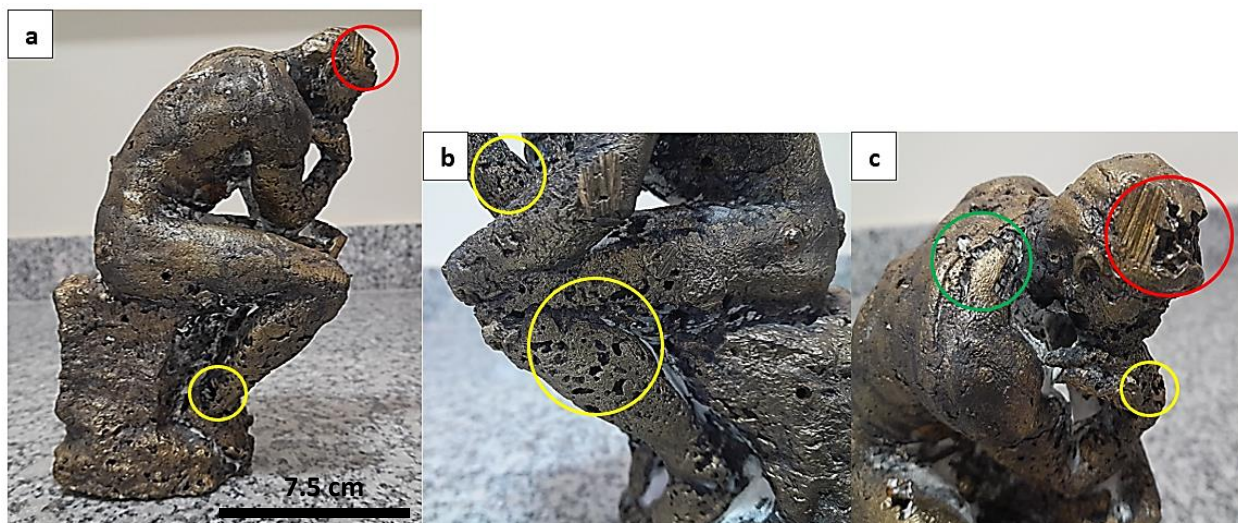
Se realizaron las mismas etapas mostradas en la **Apéndice D** y **Apéndice F**, lo único que se modificó fue tratamiento térmico del yeso debido a que fue una de las causas de los defectos que se presentaron en el Ensayo 1; de este modo se estableció en la mufla:

- Calentamiento: 0 °C a 150 °C en 1 hora
- Secado: sostenimiento por 12 horas a 150° C
- Transición térmica: 150 °C a 370° C por 2 horas
- Fundición PLA: sostenimiento por 6 horas a 150° C
- Transición térmica: 370 °C a 740° C por 3 horas
- Sinterizado: sostenimiento por 6 horas a 740° C
- Reducción y estabilización: 740 °C a 660° C por 1 hora

Se observó en la escultura de bronce (Figura 7a, Figura 7b, Figura 7c) nuevamente los mismos defectos que se reflejaron en el Ensayo 1 como la falta de llenado del metal (cabeza, brazos y piernas señalados en color rojo), porosidades en la superficie (en color amarillo), grietas alargadas (en color verde) y zonas quemadas o negras (causados por condiciones de trabajo ya mencionadas anteriormente).

Figura 7

Evidencia de los defectos obtenidos en la escultura Ensayo 2



Nota. Esta figura muestra los defectos obtenidos en el proceso de fundición de la escultura en el ensayo 2.

4.1.3. Ensayo 3

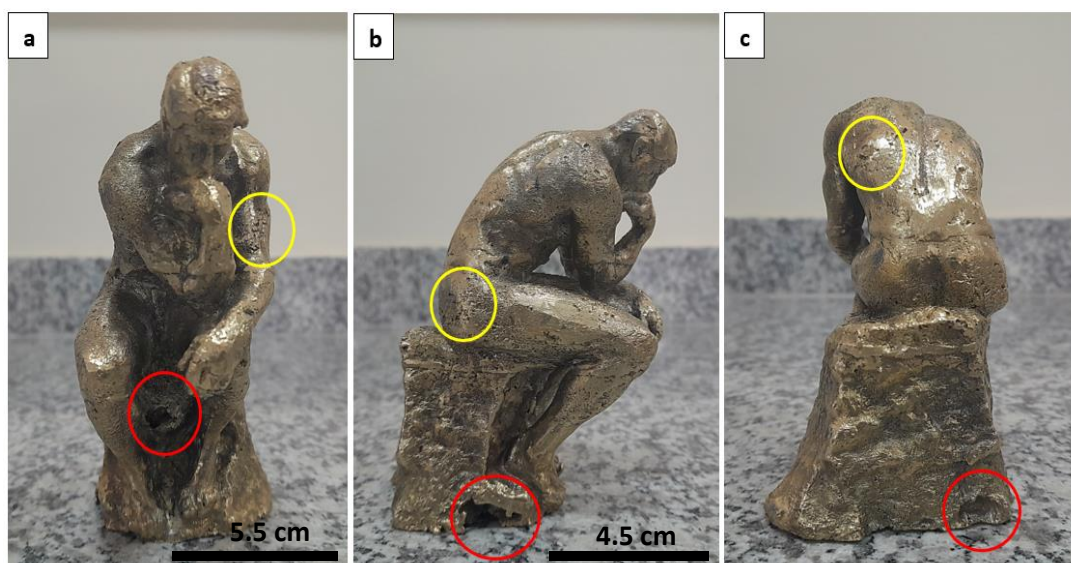
En este último ensayo se redujo aún más el tamaño del modelo y se rediseñó nuevamente los respiraderos y el bebedero, la escultura ya no sería hueca sino maciza con el fin de mejorar el acabado final y asegurar el llenado total de la pieza en el molde (Apéndice O). Se compró nueva chatarra de bronce; se realizaron las mismas etapas mostradas en la **Apéndice D** y **Apéndice F** y por ser un molde más pequeño se trabajó con el tratamiento térmico del yeso de la **Figura 3**.

Tabla 3*Condiciones de trabajo 3*

Volumen del cilindro (cm³)	3310
Cantidad de yeso (kg)	4.26
Cantidad de agua (cm³)	1.7
Cantidad máxima de bronce ocupado en el crisol (g)	4350
Total de bronce escultura (g)	1740

Nota. Esta tabla muestra las condiciones de trabajo para el ensayo 3 de la escultura en bronce

Para esta escultura de bronce maciza se observó (Figura 8a, Figura 8b, Figura 8c) nuevamente los defectos mencionados en los anteriores ensayos como la falta de llenado del metal (señalados en color rojo) y porosidades en la superficie (en color amarillo). Sin embargo, no se generaron grietas ni quemaduras en la superficie de la pieza.

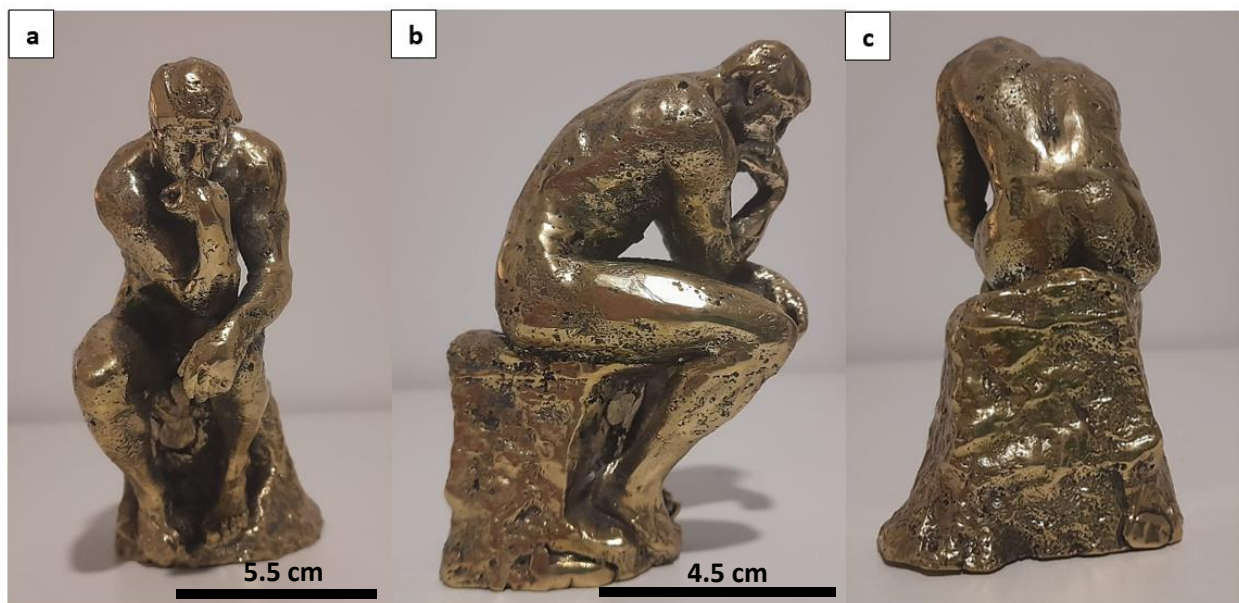
Figura 8*Evidencia de los defectos obtenidos en la escultura Ensayo 3*

Nota. Esta figura muestra los defectos obtenidos en el proceso de fundición de la escultura en el ensayo 3.

Con el fin terminar con la práctica de laboratorio debido a que los tiempo eran cortos y no era factible económicamente se arregló la escultura del Ensayo 3. Lo primero fue soldar con un soplete las partes huecas utilizando el mismo material (partes de los respiraderos) y lo segundo pulir con máquina toda la superficie del Pensador reduciendo las porosidades posibles para mejorar la calidad de la pieza fundida (Figura 9a, Figura 9b, Figura 9c).

Figura 9

Pensador de Rodin en bronce



Nota. Esta figura muestra la escultura final de Pensador de Rodin una vez realizados todos los arreglos pertinentes.

4.2. Pieza Moai en aluminio

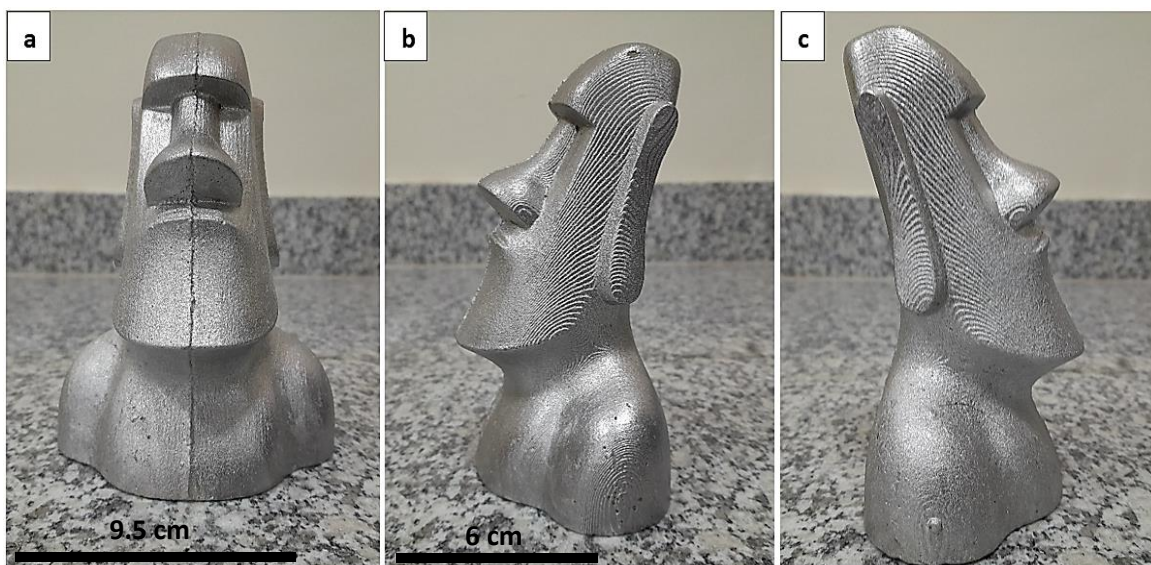
Para esta práctica de laboratorio se desarrolló un ensayo teniendo en cuenta condiciones de trabajo proceso de moldeo en arena.

Tabla 4*Condiciones de trabajo Moai*

Volumen total (cm³)	445
Cantidad máxima de aluminio ocupado en el crisol (g)	1250
Total de aluminio escultura (g)	1200

Nota. Esta tabla muestra las condiciones de trabajo para la pieza en aluminio.

En la pieza en aluminio maciza se observó (Figura 10a, Figura 10b, Figura 10c) algunas inclusiones de arena que son muy comunes en los procesos de moldeo en arena pero estas no ocasionan problemas en la estructura y funcionamiento de la pieza después del proceso de fundición; además se resaltan las líneas del modelo impreso dándole un aspecto más distinguido al diseño. Tanto las inclusiones de arena como la línea visible en la mitad de la pieza de la **Figura 10a** se eliminaron a través del mecanizado.

Figura 10*Moai en aluminio*

Nota. Esta figura muestra la pieza final del Moai elaborada en aluminio.

4.3. Pieza caballo de ajedrez en fundición gris

Para esta práctica de laboratorio también se desarrolló un solo ensayo teniendo en cuenta condiciones de trabajo proceso de moldeo en arena.

Tabla 5

Condiciones de trabajo Caballo de ajedrez

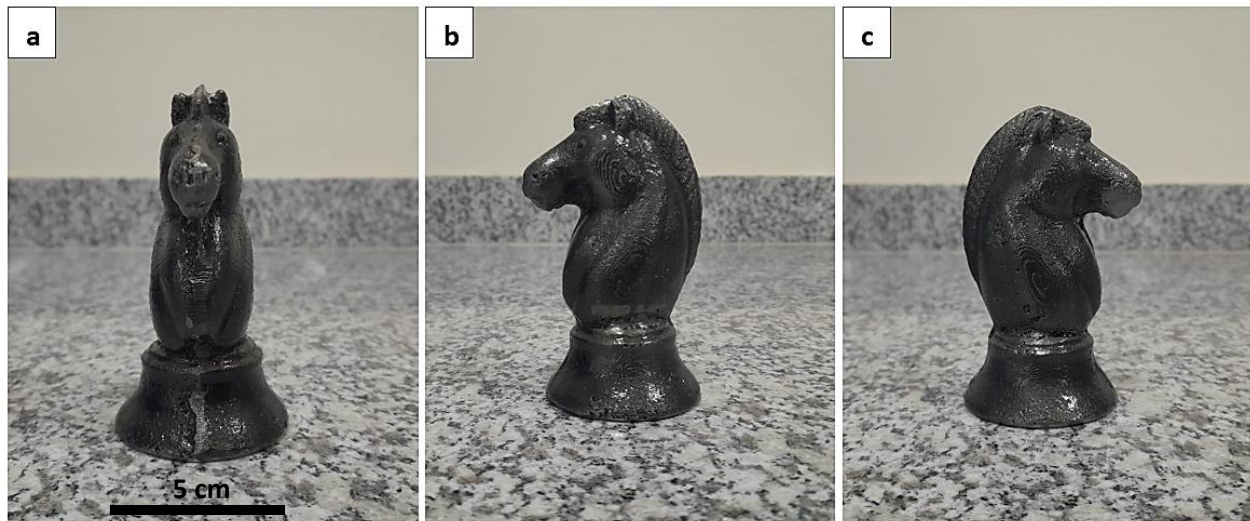
Volumen total (cm³)	156
Cantidad máxima de fundición gris ocupado en el crisol (g)	1200
Total de fundición gris escultura (g)	1108

Nota. Esta tabla muestra las condiciones de trabajo para la pieza en fundición gris.

Para la pieza maciza en fundición gris no se observó (Figura 11a, Figura 11b, Figura 11c) defectología ocasionada durante el proceso de fundición solamente la presencia de inclusiones de arena. Se le realizó mecanizado a la pieza para eliminar material y mejorar la apariencia de la misma; también para evitar el proceso de corrosión del caballo se aplicó el esmalte transparente utilizado en la protección del modelo en PLA.

Figura 11

Pieza final del Caballo de ajedrez en fundición gris

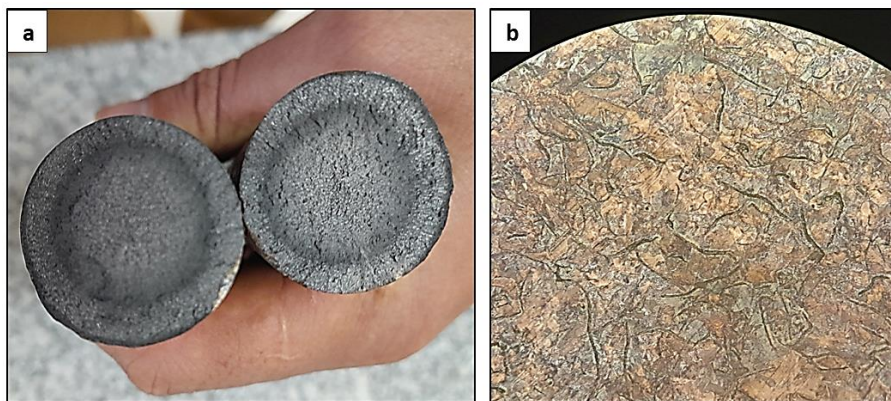


Nota. Esta figura muestra la pieza final del Caballo de ajedrez elaborada en fundición gris.

Para corroborar que la barra utilizada si fuera una fundición gris se le hicieron algunos ensayos mecánicos como la prueba de chispa en el esmeril, el tipo de fractura (Figura 12a) que es frágil y la apariencia de la superficie de rotura que presenta un gris oscuro. Además, se hizo metalografía utilizando como probeta un corte del bebedero de la pieza (Figura 12b) donde se puede observar una matriz de perlita con laminillas de grafito denominada fundición gris perlítica.

Figura 12

Pruebas de ensayos de la fundición



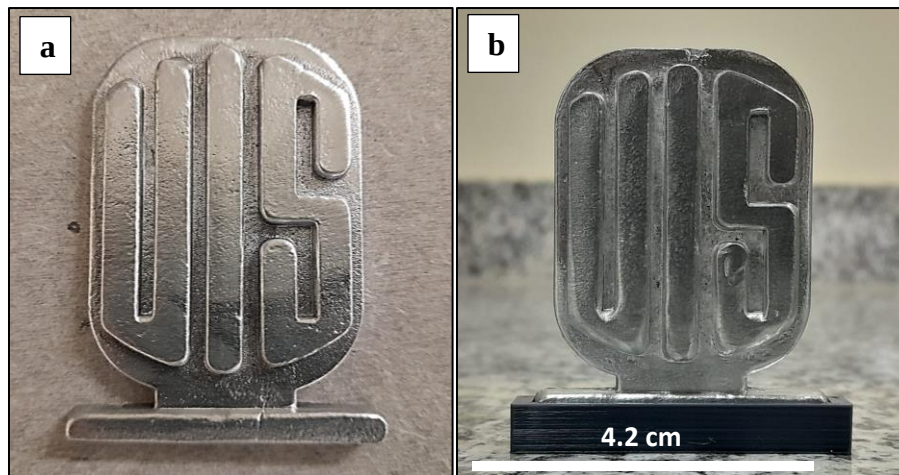
Nota. Esta figura muestra las pruebas de ensayos de la fundición. **a)** Fractura de la barra **b)** Metalografía de la pieza.

4.4.Recordatorio en Zamak

En esta etapa del trabajo de grado no se buscó hacer una guía de laboratorio sino en realizar varios ensayos con el molde metálico en acero para obtener un pisapapel con el logo de la UIS en Zamak; estas actividades tuvieron dificultades debido a los costos que implicaron la fabricación de dicho molde en CNC, la falta de llenado del metal dentro del molde y la adherencia del metal líquido con la cavidad del molde después de la colada donde se hizo difícil la extracción de la pieza y se requirió el uso herramientas como la espátula, el destornillador y el alicante. Sin embargo, al colocarle un respiradero en la parte inferior del molde metálico con un diámetro de 3 mm para que ayudara en la salida de gases. Al momento de colar el metal, dejarlo solidificar y retirar inmediatamente la pieza del molde caliente se pudo elaborar al final la pieza deseada (Figura 13a). Una vez obtenido el logo de la UIS se fabricó un soporte impreso en PLA para darle sostenimiento a la pieza al momento de colocarlo como pisapapeles (Figura 13b).

Figura 13

Recordatorio en Zamak



Nota. Esta figura muestra el recordatorio en Zamak. **a)** Fabricación del logo de la UIS **b)**

Elaboración soporte en PLA.

Siguiendo con los parámetros, materiales y tiempo evaluados se diseñó las guías de laboratorio para la asignatura de procesos de fundición y se realizó un ensayo completo para cada una estas con el fin de comprobar el tiempo necesario de la práctica. La práctica uno (1) está diseñada para tres sesiones de 3 horas, en la primera y segunda se va a realizar todo lo relacionado con el manejo y el proceso de impresión en 3D, el modelo ya se encuentra modificado en la carpeta **“Guía de laboratorio – Escultura en bronce (Pensador de Rodin)”** del escritorio donde se hallarán todas las piezas del pensador cortadas lista para imprimirlas. Cabe aclarar que estas piezas tardan entre 2 a 5 horas por tal motivo se debe iniciar lo más pronto posible y acordar con el profesor un horario para terminar las piezas faltantes; se deja en el laboratorio un modelo ya impreso y listo como guía a la hora de pegar las piezas.

Otra manera de realizar la práctica es que los estudiantes busquen otro diseño que requiera un menor tiempo de impresión cumpliendo con los parámetros establecidos en la guía y que se ajuste al molde metálico. Ya terminado el modelo en PLA se coloca dentro del molde y se realizará el proceso de preparación de la mezcla, en esta etapa se recomienda el uso de tiempo no mayor a 1 hora. En la tercera sesión, se va a realizar el proceso de fundición del metal, se recomienda iniciar el tratamiento térmico del yeso un día antes de la práctica con el fin de cumplir con la ficha técnica modificada y evitar posibles inconvenientes en el proceso.

Finalmente se evidencia el resultado final del trabajo de grado en la guía de laboratorio expuesta en el **Apéndice P**. La práctica dos (2) está diseñada para 2 sesiones de 2 horas, en la primera sección se realizará los moldes de arena tanto para el Moai como para el caballo de ajedrez, estos modelos ya se encuentran impresos en el laboratorio. Se debe iniciar haciendo el molde para colar aluminio en un tiempo no máximo a 1 hora, una vez terminado el molde se realizará el

proceso de fundición en el horno de inducción según la cantidad de metal y el tiempo de fusión. La segunda sección se elaborará el molde para colar fundición gris y ya que requiere preparar nuevamente la arena de contacto el tiempo deberá ser un poco mayor a 1 hora, luego se deberá cambiar el sistema en el horno de inducción para fundir aleaciones ferrosas y así terminar la práctica con el proceso de fundición. Finalmente se evidencia el resultado final del trabajo de grado en la guía de laboratorio expuesta en el **Apéndice Q**.

5. Conclusiones

Se realizó con éxito cada una de las guías prácticas para el laboratorio de procesos de moldeo y de fundición logrando que los estudiantes tuvieran un acercamiento a las impresoras 3D y al horno de inducción, conocieran su manejo y diseñarán modelos para luego imprimirlos basándose en los parámetros de trabajo correspondientes. Se complementó con material audiovisual instrucciones en la elaboración de las piezas metálicas partiendo de la impresión 3D, que podrá utilizarse como ayuda en las guías de la asignatura de procesos de fundición en el programa de Ingeniería Metalúrgica.

Se determinaron los parámetros y las variables de impresión partiendo de un diseño adecuado realizado en Meshmixer y Fusión 360 en relación con las características de trabajo tanto para moldeo en arena como para cera perdida; se estableció tiempos de impresión 3D no mayores a 5 horas y reducción de material de acuerdo con la calidad del modelo. Se requiere contar con las impresoras Creality CR-10 Smart Pro funcionales, filamento PLA y equipo de limpieza para garantizar una buena impresión en 3D.

Es imprescindible tener en cuenta los diferentes factores que pueden afectar la calidad de la pieza final, para el caso de la escultura de bronce se hace énfasis en el tipo de material de impresión, la aleación que se desea fundir y su temperatura de fusión, el tratamiento térmico adecuado para el yeso y el uso indispensable de una cámara de vacío. Para las piezas elaboradas en molde de arena se debe tener en cuenta la preparación de la arena de contacto y las dimensiones del bebedero y del canal de alimentación. No tenerlo en cuenta puede llevar a un mal acabado superficial, generando defectos y deformidades al momento de la fundición.

6. Recomendaciones

Para el proceso de fabricación de la escultura en bronce se proponen algunas recomendaciones las cuales mejorarían de manera significativa la práctica:

- Para que la pieza del modelo del Pensador de Rodin no presente falta de llenado a la hora de realizar la colada del metal es necesario rediseñar el bebedero a partir de un mayor diámetro y si se quiere cambiar el modelo del Pensador por otro modelo sugerido por el profesor o estudiantes se debe tener en cuenta el diseño de los respiraderos (en Meshmixer) en los puntos críticos de llenado y un bebedero acorde con el tamaño de la pieza. Al momento de imprimir se recomienda precalentar tanto el extrusor como la base magnética de la impresora con el fin de mejorar la adherencia del material y verificar la adecuada limpieza de la plataforma.
- Si se quiere utilizar chatarra es importante comprar solamente bronce limpio y no mezclarlo con el latón ya que al tener zinc en la aleación y superar su punto de ebullición (907 °C) en el proceso de fundición va a generar gases y de humos del crisol causando irritación en las mucosas de las personas. Debido a que el bronce de buena calidad es muy costoso se puede usar cobre puro comprado en chatarrería y con trozos de aluminio del laboratorio hacer una aleación de Cuproaluminio utilizando el horno de crisol agregándole desgasificante y limpiadores para obtener una aleación óptima para la práctica y así reducir problemas de colabilidad, formación de impurezas y salida de gases que puedan causar defectología en la pieza fundida.
- En relación con el proceso de tratamiento térmico del yeso es indispensable hacer uso de un horno programable para realizar las rampas de temperatura de forma automática

cumpliendo con la ficha técnica del material y para obtener mejores resultados en la pieza final; al momento de colar el metal líquido poder contar con una cámara de vacío ajustable al molde metálico.

Para el proceso de fabricación de piezas en molde de arena se proponen:

- Al momento de elaborar el molde en arena tener presente la colocación de un bebedero de buen diámetro para que ayude como mazarota al momento de colar el metal y realizar los respectivos respiraderos para evitar rechupes y falta de llenado en la pieza. Se deben hacer los cálculos adecuados para determinar la cantidad de metal que se requiere en el llenado del molde partiendo del volumen total del modelo y del crisol.
- Si se desea utilizar otros modelos diferentes a los de la práctica, se recomienda que al momento de diseñarlos en un CAD presente ángulos de desmoldeo para evitar daños en el molde a la hora de retirar la pieza o si quieren descárgalos en la web asegurar que cumplan con las características del proceso de moldeo; se deben apoyar con el profesor de la materia.
- Si se utiliza la chatarra de fundición gris que hay en planta de aceros se debe hacer una buena limpieza eliminando el óxido, el moho o residuos que se encuentren en la superficie del metal.

Para estas prácticas es necesario el uso de implementos de seguridad tales como guantes, bata, tapabocas, gafas industriales y zapatos cerrados. Cualquier ensayo se debe hacer en compañía del técnico del laboratorio y del profesor de la materia.

Referencias Bibliográficas

- Avendaño, A. A. (2012). *Democratización de la impresión 3D con fotopolímeros. Trabajo de grado*. Santiago de Chile. Obtenido de <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/112106>
- Barrera, F. y. (1992). *Obtención de Ceras para el Proceso de Fundición a la Cera Perdida. Proyecto de Grado-Universidad Nacional de Colombia*. Bogota.
- Company, R. M. (2021). *Proceso de fundición en molde de arena cubierto de resina*. Obtenido de <https://es.steel-foundry.com/news/resin-coated-sand-mold-casting-process/>
- Echevarría, R. (2022). *Defectología*. Universidad Nacional del Comahue. Facultad De Ingenieria. Laboratorio De Ensayos No Destructivos.
- Falcón Ganformina, P. (2023). *Elaboración de modelos mediante fabricación aditiva para moldeo manual en arena*. Universidad de Sevilla, Sevilla.
- Fishman, O. S. (2000). *Fundamentals of Metal Movement in Induction Furnaces*.
- Gomez, S. F. (2022). *Ferrosilicio*. Medellin , Colombia. Obtenido de <https://repository.eia.edu.co/server/api/core/bitstreams/2ecc6aff-eadf-420c-891b-b9bdd3ef7b75/content>
- Green-Spikeskey, E. (1975). *Investment Casting. The Process and the Product. Metallurgic and Metal Forming*. Londres.
- Howarth, D. J. (1990). *Using a Large Single-Unit Medium frequency Furnace in a Jobbing Foundry*.
- Lipson, H. (2014). *La revolución de la impresión 3D*.
- Miranda, C. V. (2020). *Impresoras 3D: el futuro del modelado*.
- Prasad, R. T. (1994). *Basic elements of Feeding Investment Castings*. American Foundry Society.

Rooy, J. G. (2005). *Fundición de aleaciones de aluminio, propiedades, procesos y aplicaciones*.

Ohio, EE.UU: 2ª edición, Ed. ASM Internacional.

Sarojrani Patnaik, D. B. (2012). *ELSEVIER: Journal of Materials Processing Technology*.

Developments in investment casting process-A review.

Tartera, J. (2008). *Componentes de las arenas de moldeo (Parte I)*. Obtenido de

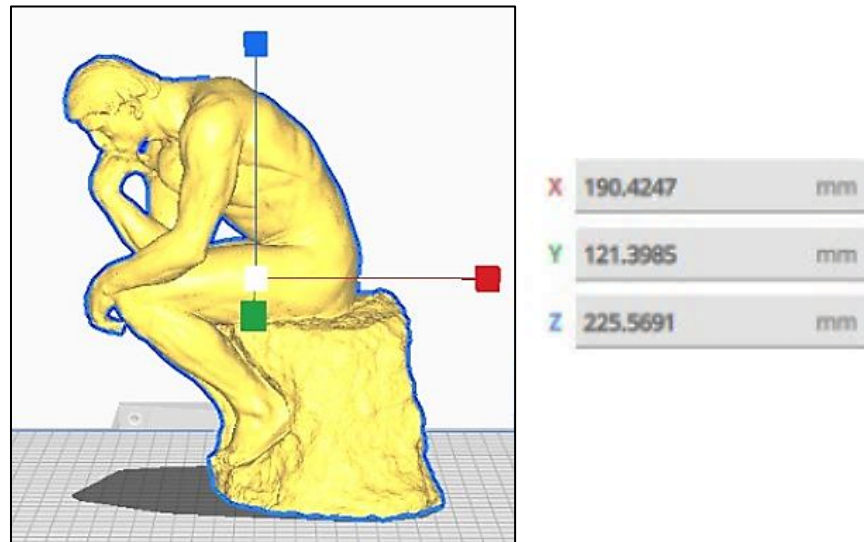
https://pedeca.es/wp-content/uploads/2012/02/FUNDIPRESS_04.pdf#page=36

Uribe, C. L. (2019). *Zamac " Una aleación muy versátil"*. Metal Actual. Obtenido de

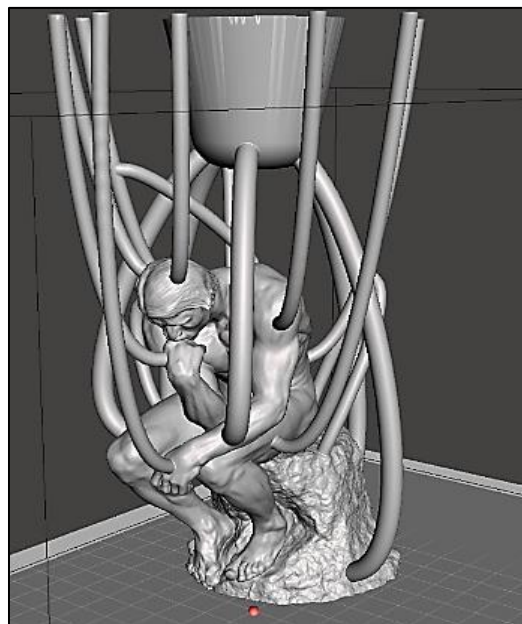
https://www.academia.edu/7627208/materiales_zamak

Apéndices

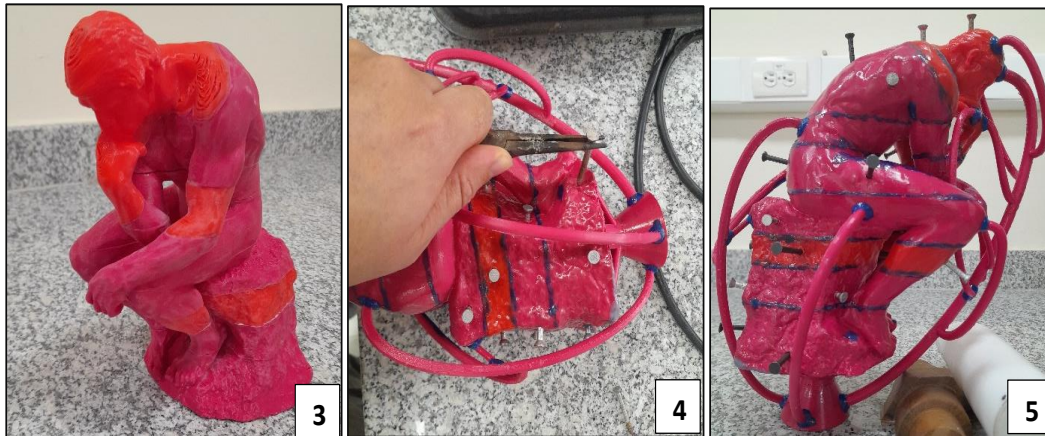
Apéndice A. Planos esquemáticos de los modelos modificados en UltiMaker Cure



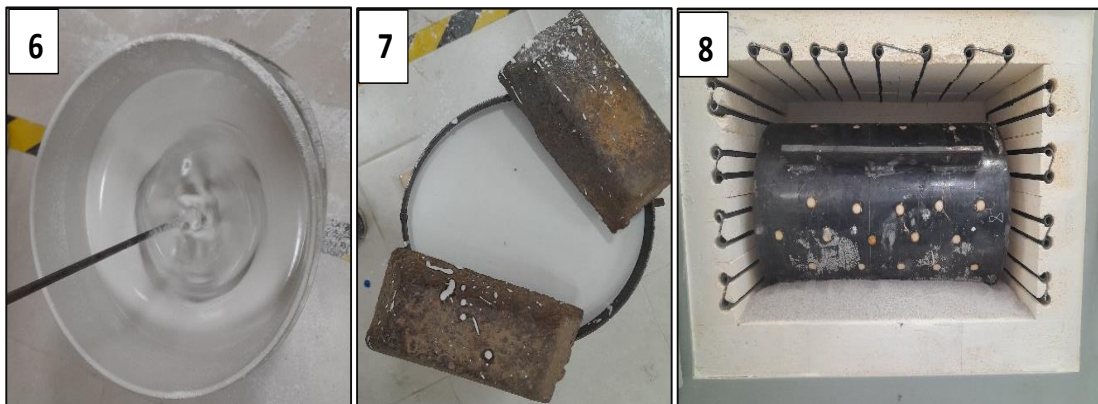
Apéndice B. Diseño de respiraderos y bebedero en Meshmixer del modelo



Apéndice C. Fabricación del modelo. (1) Impresión en PLA (2) Unión de las piezas (3) Aplicación de cera (4) Inserción de puntillas (5) Aplicación de esmalte

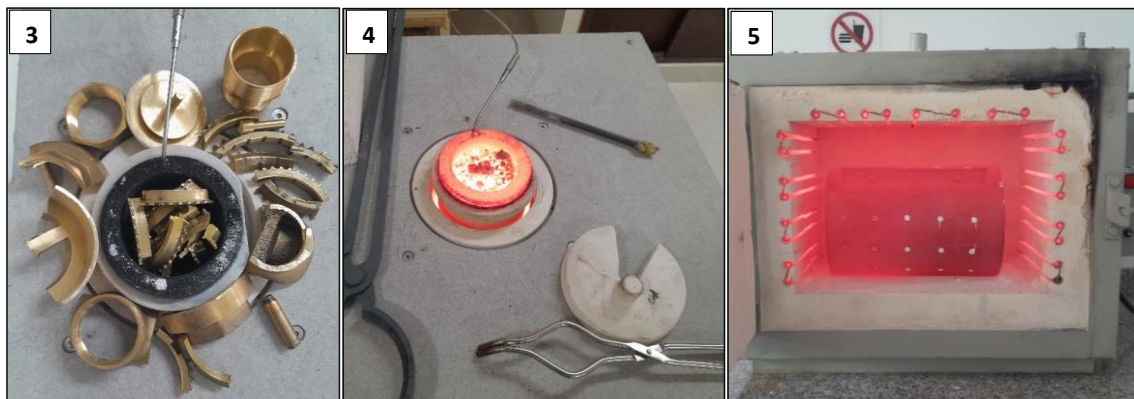
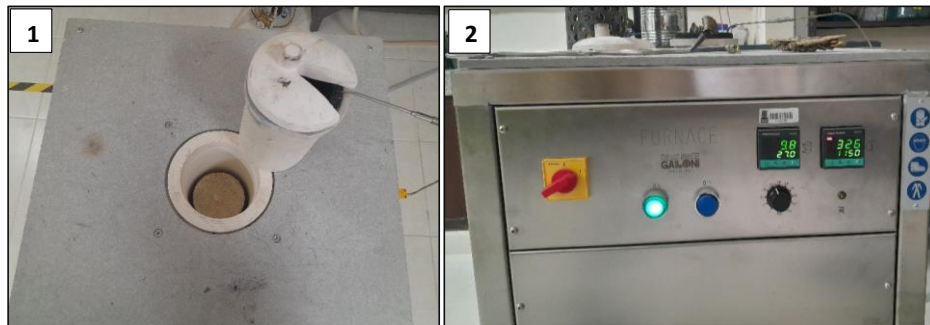


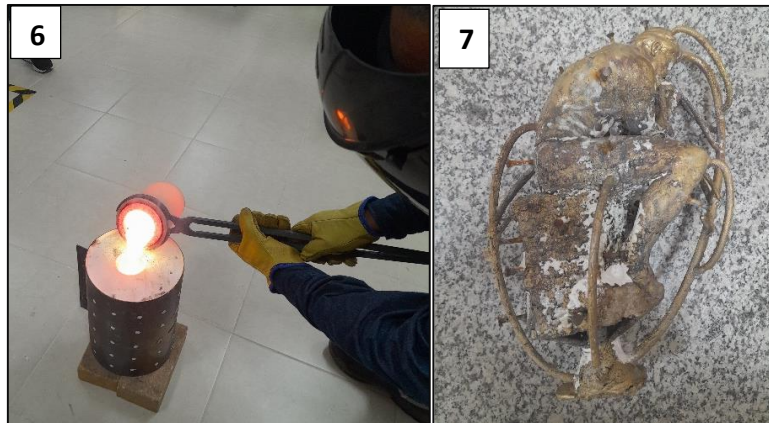
Apéndice D. Etapas de la elaboración del molde en yeso para la fundición de bronce en el modelo del Pensador de Rodin. **(1)** Moldes metálicos **(2)** Compra y corte de chatarra de bronce (5kg) **(3)** Montaje del modelo en el molde **(4)** Pesaje del yeso y medición del agua en relación con el volumen **(5)** Agitador metálico **(6)** Agitación mecánica de la mezcla **(7)** Vertido de la mezcla dentro del molde **(8)** Colocación del molde dentro de la mufla.



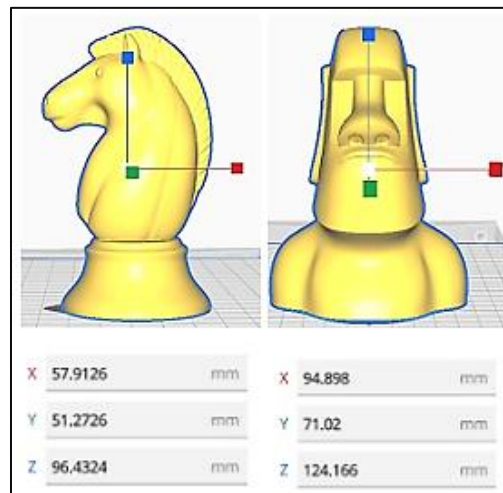
Apéndice E. Horno de inducción Galloni Furnace

Apéndice F. Proceso de fundición y colada del bronce en horno de inducción Galloni k10. (1) Crisol de grafito para fundiciones no ferrosas **(2)** Temperatura de trabajo del horno de inducción **(3)** Colocación del metal dentro del crisol **(4)** Retiro de la escoria **(5)** Extracción del molde de la mufla **(6)** Colada del metal líquido sobre el molde de yeso **(7)** Retiro de la pieza del molde y arreglos finales.

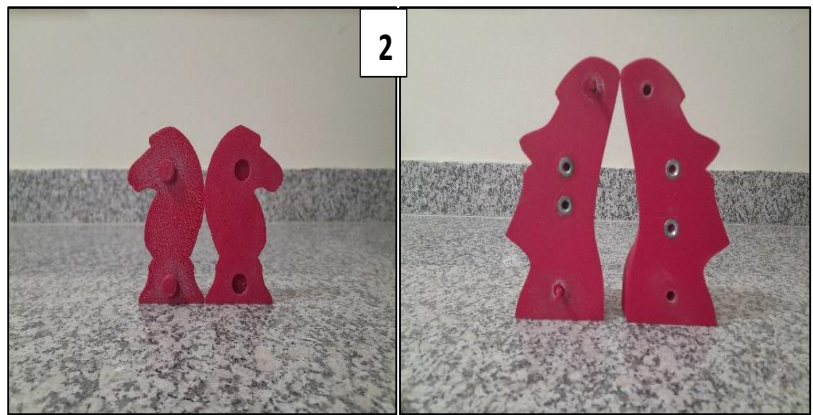
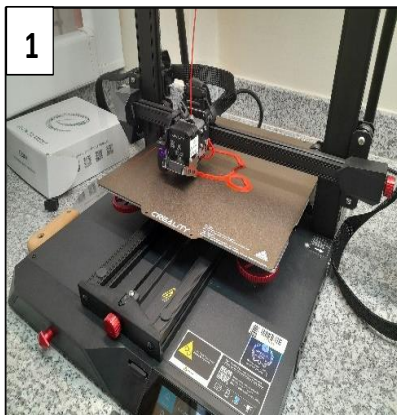




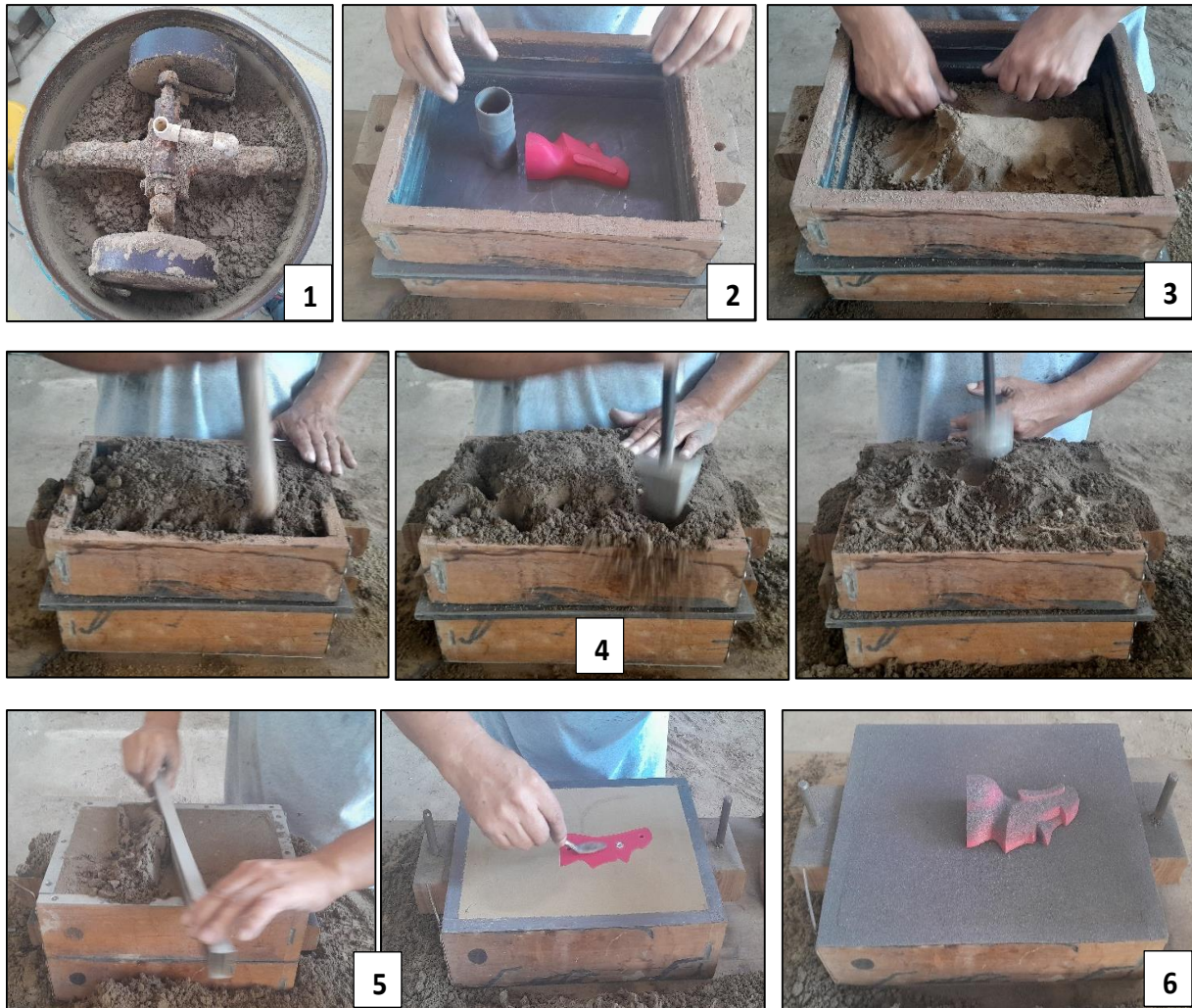
Apéndice G. Planos esquemáticos de los modelos modificados en UltiMaker Cure



Apéndice H. Fabricación de modelos. 1) Impresión en PLA 2) Modelos separados en dos partes para moldeo en arena

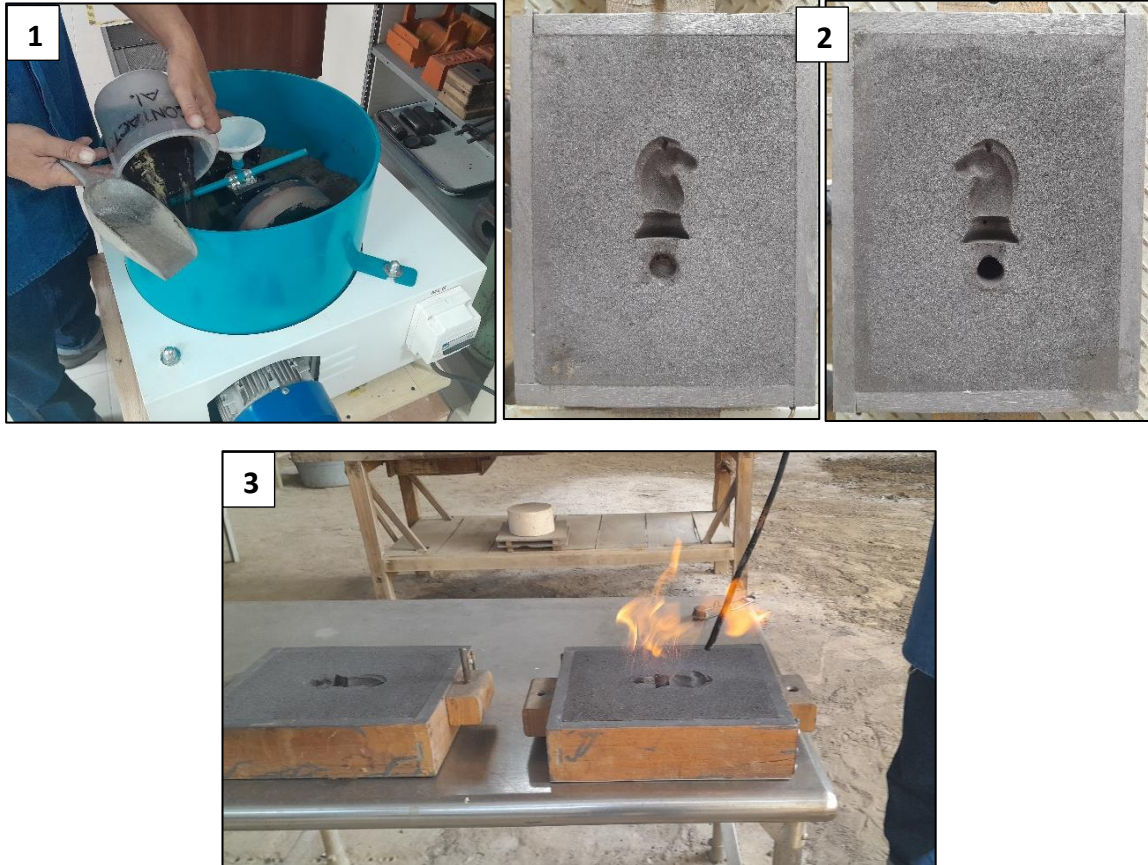


Apéndice I. Etapas de la elaboración del molde en arena para la fundición de aluminio en el modelo del Moai. **(1)** Preparación arena de contacto **(2)** Colocación de modelo en caja inferior **(3)** Adición de la arena de contacto al molde **(4)** Apisonamiento de la arena de relleno **(5)** Retiro de arena del molde y arreglo de la superficie de contacto **(6)** Unión de las partes del modelo y aplicación de polvo de grafito al molde **(7)** Colocación del bebedero **(8)** Adición de la arena de contacto al molde **(9)** Apisonamiento de la arena de relleno **(10)** Retiro del bebedero **(11)** Proceso de aireación **(12)** Elaboración de canales de alimentación **(13)** Adición del respiradero **(14)** Colocación final del molde para su posterior colada.

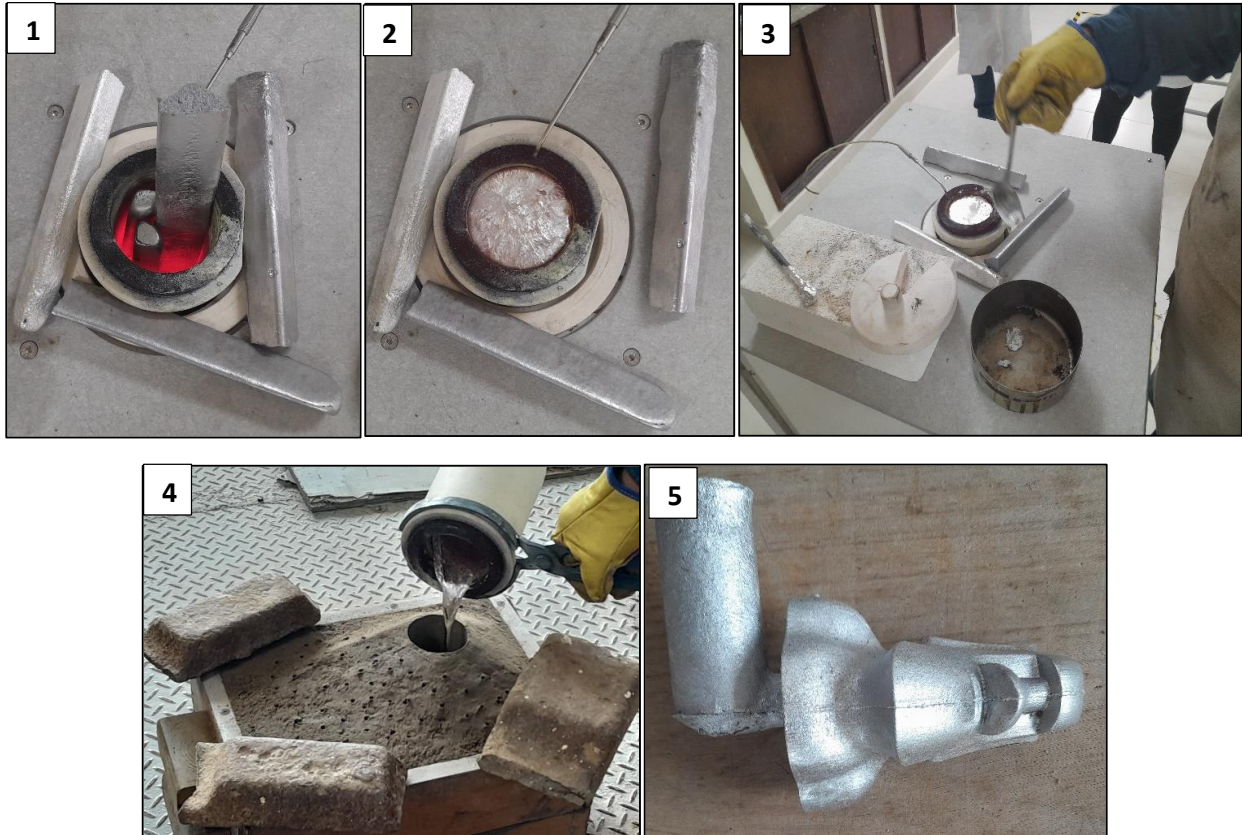




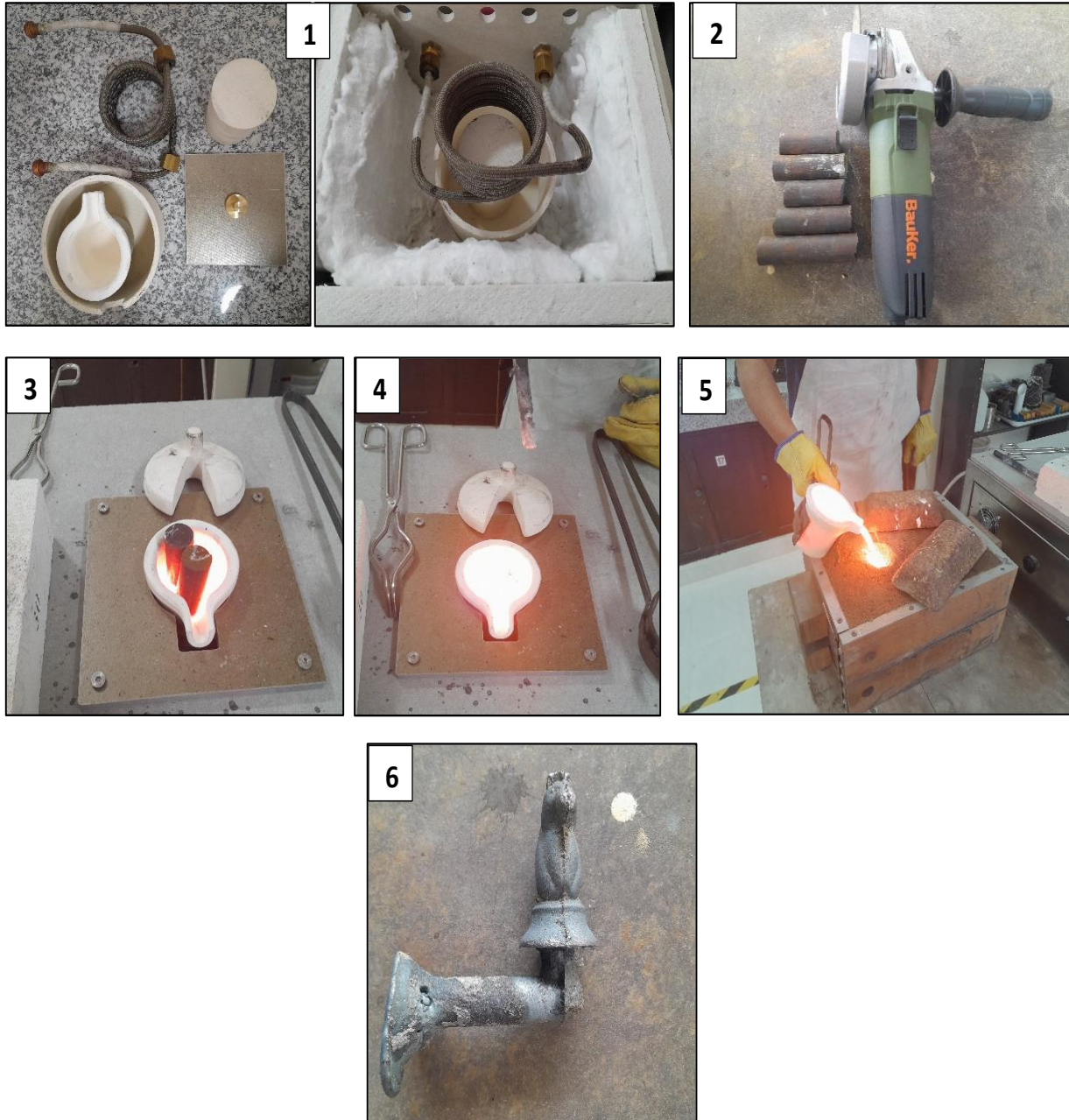
Apéndice J. Elaboración del molde en arena para colar fundición gris con el modelo del caballo de ajedrez. **(1)** Preparación arena de contacto **(2)** Elaboración de canales de alimentación y respiradero **(3)** Calentamiento de la arena de contacto de los moldes.



Apéndice K. Proceso de fundición y colada del aluminio en horno de inducción Galloni k10. **(1)** Introducción del metal en el crisol **(2)** Llenado del crisol **(3)** Retiro de la escoria **(4)** Colada del metal en el molde **(5)** Destrucción y retiro de la pieza del molde.

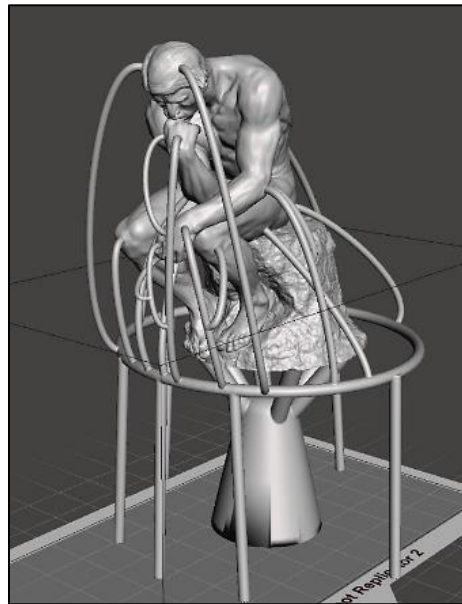
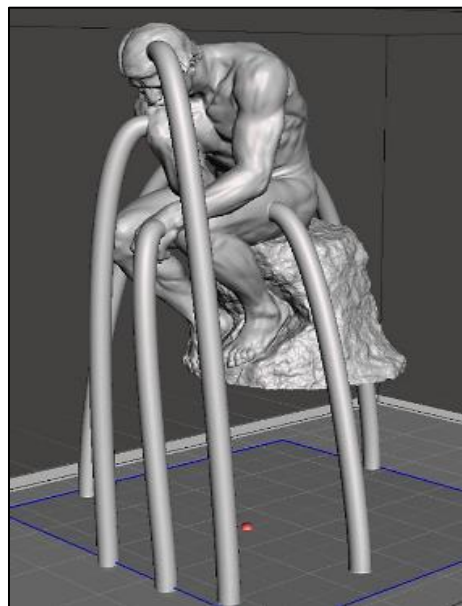


Apéndice L. Proceso de fundición y colada de la fundición gris en horno de inducción Galloni k10. **(1)** Cambio de equipos para fundición de metales ferrosos **(2)** Corte de la barra **(3)** Introducción del metal en el crisol **(4)** Llenado del crisol **(5)** Colada del metal en el molde **(6)** Destrucción y retiro de la pieza del molde.



Apéndice M. Charla teórico-práctica. **(1)** Impresora 3D **(2)** Horno de inducción **(3)** Colada en molde de arena y yeso.



Apéndice N. Diseño de respiraderos y bebedero en Meshmixer del modelo Ensayo 2**Apéndice O.** Diseño de respiraderos y bebedero en Meshmixer del modelo Ensayo 3

Apéndice P. Guía para el laboratorio de procesos de fundición “ Diseño y fabricación de una pequeña escultura de bronce o aluminio a partir de impresión 3D y un horno de inducción”

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER ESCUELA DE INGENIERÍA
METALÚRGICA Y CIENCIA DE LOS MATERIALES
LABORATORIO DE PROCESOS DE FUNDICIÓN
FABRICACIÓN DE ESCULTURAS PEQUEÑAS EN ALEACIONES DE COBRE O
ALUMINIO A PARTIR DE IMPRESIÓN 3D Y UN HORNO DE INDUCCIÓN**

Elaborado por: Cristian Bianey Araque Prada

Revisado por: Andrés Giovanni González Hernández

INTRODUCCIÓN

El uso de la impresión 3D se ha venido implementado en procesos de fundición moderna en los últimos años con el objetivo de fabricar moldes y modelos para la producción piezas más precisas y complejas lo que aumenta la calidad, la eficiencia y los costos en las empresas. En esta práctica se hace uso de la impresora 3D Creality CR-10 Smart Pro, la cual utiliza como material de impresión filamento de PLA de 1.75 mm de diámetro y del horno de inducción Galloni utilizado para la fundición de metales no ferrosos (bronce, latón, aluminio) en un molde de yeso.

OBJETIVO GENERAL

Elaborar una pieza o escultura pequeña metálica basándose en el proceso de Investment Casting o cera perdida utilizando un modelo en impresión 3D.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Conocer el manejo de la impresora 3D Creality Smart Pro y el programa UltiMaker Cure de acuerdo con las características de trabajo.
- Modificar parámetros del modelo original haciendo uso de programas CAD y del programa UltiMaker Cure.
- Preparar el molde teniendo en cuenta las etapas de fraguado y los ajustes del tratamiento térmico para el proceso de sublimación del polímero y del sinterizado del yeso.
- Identificar las partes, funcionamiento y aplicaciones del horno de inducción
- Realizar el proceso de fundición para obtener la pieza metálica diseñada.

MATERIALES Y EQUIPOS

- Impresora 3D Creality CR-10 Smart Pro
- Filamento PLA
- Pegante Super Bonder
- Cera
- Yeso Prestige UNICAST
- Mezcladora
- Molde metálico
- Horno tipo mufla
- Horno de inducción Galloni Furnace
- Bronce
- Equipo complementario (balanzas, pinzas, guantes, recipiente, tornillos, herramientas, entre otro)

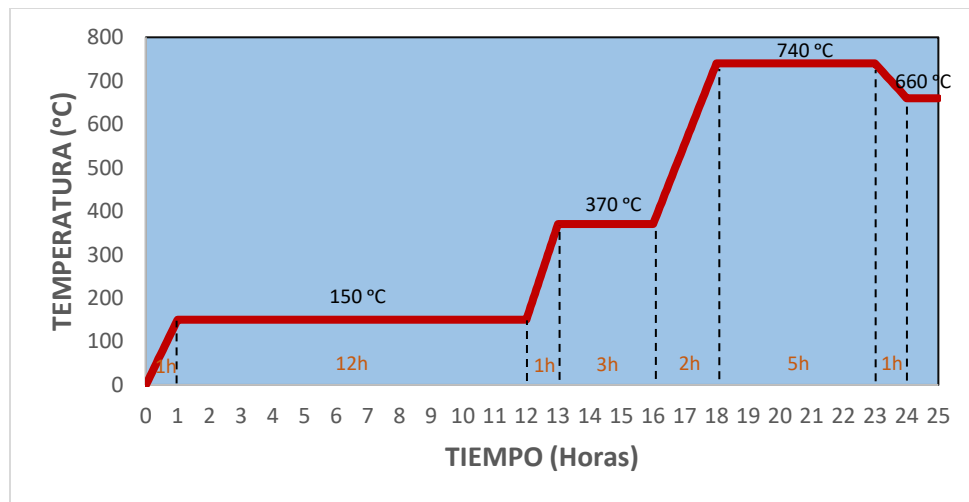
METODOLOGÍA

- **Selección y ajustes del modelo en la impresora 3D.**

Esta etapa se realizará siempre y cuando el profesor determine cambiar el modelo del Pensador de Rondín.

 1. Realizar la búsqueda y descarga del diseño para el modelo en formato stl, esto puede hacerse utilizando plataformas web como UltiMaker Thingiverse, o creándolo con ayuda de algún programa de diseño asistido por computador como SolidWorks, Fusión 360, Inventor, entre otros.
 2. Diseñar los respiraderos utilizando el programa de Meshmixer y el bebedero de acuerdo con las características del modelo (geometría y dimensiones) y de un programa de diseño asistido por computador (Fusión 360).
 3. Modificar los parámetros de impresión utilizando UltiMaker Cure.
 4. Determinar tiempo de impresión y si se requiere cortar en varias partes el modelo (en Meshmixer) para reducir tiempo ya que se cuenta con dos impresora. Guardar los archivo en una carpeta para luego llevarlos en una memoria a la impresora.
- **Impresión del modelo (Pensador de Rodin).**
 5. Hacer limpieza a las placas magnéticas de las impresoras y ajustar los parámetros del panel del control de la impresora todo esto según las indicaciones del profesor y el video explicativo de la práctica.
 6. Realizar la impresión de cada una de las partes (1,2,3) ya modificadas y ajustadas en el programa UltiMaker Thingiverse las cuales se encuentra en la carpeta del escritorio “Guía de laboratorio – Escultura en bronce (Pensador de Rodin)”.

7. Pegar cada una de las partes del modelo usando Super Bonder teniendo en cuenta la posición, número de pieza y el modelo de referencia que se encuentra en el laboratorio (Imagen 1).
 8. Rellenar con cera las uniones del modelo.
 9. Ajustar el modelo en la tapa de goma y colocar el molde metálico.
- **Elaboración del molde en yeso.**
 10. Pesar 4.26 kg de yeso Prestige UNICAST y medir 1.7 litros de agua para un molde metálico de 16 cm de diámetro x 16.5 cm de altura.
 11. Colocar cinta adhesiva alrededor del molde metálico para evitar la salida de la mezcla por los orificios del mismo.
 12. Agitar con la mezcladora el agua medida agregando lentamente el yeso pesado para evitar la formación de grumos dentro del recipiente. Esto se hace en un tiempo máximo de 2 min.
 13. Verter la mezcla en el molde metálico en un tiempo menor a 1 minuto
 14. Dejar fraguar la suspensión de yeso de 1 a 2 horas al aire libre. Terminado este tiempo quitar la tapa de caucho, limpiar los respiraderos y el bebedero para continuar con el proceso.
 15. Colocar el cilindro con el molde de yeso en el horno mufla ubicado en el laboratorio de Pirometalurgia para su respectivo tratamiento térmico basándonos en la siguiente gráfica:



Nota. Es necesario iniciar este tratamiento térmico un día antes de realizar el proceso de fundición con el fin de asegurar un adecuado funcionamiento del yeso a la hora de colar el metal.

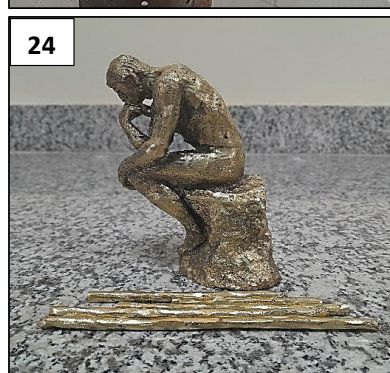
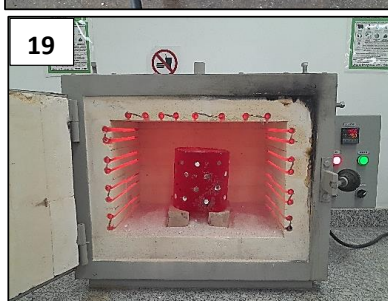
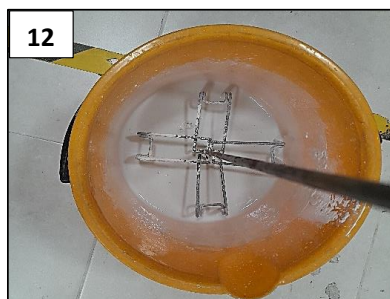
- **Proceso de fundición.**

16. Pesar 1741 g de chatarra de bronce u otra aleación de cobre. Antes de iniciar el proceso de fundición, debemos cortar en trozos el metal de trabajo si lo requiere, iniciar el sistema de refrigeración del horno de inducción, programar la temperatura de trabajo del horno a 1150 °C y dejar por 10 minutos que se precaliente el horno y las piezas cortadas.
17. Introducir las piezas de metal dentro del crisol con la ayuda de las pinzas metálicas. Se debe esperar a que la aleación esté totalmente fundida para realizar la colada. Este proceso tiene una duración de aproximadamente 10-15 minutos.
18. Si es necesario, agregar al metal fundido fundentes (vidrio e polvo o bórax) desgasificantes o limpiadores que permitan mejorar la colabilidad y llenado del metal dentro del molde. Retirar la escoria
19. Al terminar el tratamiento térmico del yeso en la mufla bajar el molde metálico al laboratorio de fundición con la ayuda de unas pinzas y colocarlo en un lugar seguro y adecuado para el proceso.
20. Realizar la colada del metal líquido a través del bebedero de manera continua para evitar que quede aire atrapado dentro de la cavidad del molde.
21. Dejar enfriar el molde al aire libre por 30 minutos.
22. Introducir el molde en agua para extraer la pieza fundida y remover el exceso de yeso con ayuda de una manguera a presión.
23. Pesar la pieza obtenida.
24. Hacer los cortes del bebedero y de los respiraderos para obtener la pieza final.

Nota. En la **imagen 1** se muestran todos los pasos en el proceso desde el inciso 7 al 24 con imágenes fotográficas.

Imagen 1. Metodología del proceso de fundición escultura en bronce





TEMAS DE CONSULTA

- Fabricación aditiva en procesos de fundición
- Horno de inducción Galloni Furnace
- Video Impresión 3D en bronce. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=MVmNZZC1iOU>
- Video educativo Manejo Impresora 3D Creality CR-10 Smart Pro. Disponible en: <https://youtu.be/TzJiPa-zu0w>
- Video educativo Modificaciones Pensador de Rodin en Meshmixer. Disponible en: <https://youtu.be/Eb0yX5OtAxA>
- Video educativo Variables de trabajo Pensador de Rodin en UltiMaker Cure. Disponible en: <https://youtu.be/0-cDM5BncvY>

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ficha técnica impresora 3D Creality CR-10 Smart Pro. Disponible en: <https://cdn03.plentymarkets.com/ioseuwg7moqp/propertyItems/2859/CR-10%20Smart%20Pro%20Datasheet.pdf>

Parámetros básico de UltiMaker Cura. Disponible en: https://www.google.com/search?q=manejo+de+ultimaker+cura&sca_esv=596043816&rlz=1C1CHZN_esCO964CO964&tbm=vid&sxsrf=AM9HkKnPvGgTMOtPm7DtrlKEeQnQGk0ViA:1704486000776&source=lnms&sa=X&ved=2ahUKEwjh--aUiceDAxV8PkQIHdnuBQYQ_AUoAXoECAEQAw&biw=1366&bih=641&dpr=1#fpstate=ive&vld=cid:efc28c66,vid:P59tBfsuH7o,st:0

Fundición de precisión. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/4902502.pdf>

Ficha técnica horno de inducción Galloni Furnace. Disponible en: https://galloni-aseg.com/wp-content/uploads/2020/07/FURNACES_compressed.pdf

Ficha técnica Revestimiento PRESTIGE UNICAST. Disponible en: <https://www.terrizaehijos.com/wp-content/uploads/2017/07/UNICAST.pdf>

Apéndice Q. Guía para el laboratorio de procesos de fundición “Elaboración de un molde arena a partir de un modelo realizado en impresión 3D para colar una fundición gris y aluminio fundido en un horno de inducción.”

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER ESCUELA DE INGENIERÍA
METALÚRGICA Y CIENCIA DE LOS MATERIALES
LABORATORIO DE PROCESOS DE FUNDICIÓN
ELABORACIÓN DE PIEZAS METÁLICAS EN MOLDE DE ARENA VERDE EN
ALUMINIO Y FUNDICIÓN GRIS A PARTIR DE UN MODELO EN IMPRESIÓN 3D Y
UN HORNO DE INDUCCIÓN**

Elaborado por: Cristian Bianey Araque Prada

Revisado por: Andrés Giovanni González Hernández

INTRODUCCIÓN

Los modelos fabricados en impresión 3D son muy utilizados para moldeo en arena en verde reemplazando los modelos de madera, los metálicos y los de poliestireno expandido comunes en los procesos de fundición generando piezas metálicas con buen acabado y reduciendo tiempos de mecanizado. En esta práctica se hace uso de los modelos de PLA ya impresos y modificados, y del horno de inducción Galloni utilizado para la fundición de aluminio y de fundición gris.

OBJETIVO GENERAL

Elaborar una pieza metálica por medio del proceso de fundición en molde de arena en verde utilizando un modelo en impresión 3D.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Conocer las características de diseño de los modelos que son utilizados en el proceso del moldeo en arena verde.
- Preparar la arena de contacto de acuerdo con el tipo de metal que se use en el proceso de fundición.
- Elaborar del molde en arena.
- Realizar el proceso de fundición y de colada ajustando la temperatura de fusión del metal a trabajar.
- Hacer caracterización y pruebas mecánicas a la pieza final.

MATERIALES Y EQUIPOS

- Impresora 3D Creality CR-10 Smart Pro
- Filamento PLA
- Modelos impresos (Moai y Caballo de ajedrez)
- Caja de moldeo y bebedero
- Herramientas de moldeo
- Arena de contacto y de relleno
- Horno de inducción Galloni Furnace
- Aluminio y fundición gris
- Equipo complementario (balanzas, pinzas, EPP, herramientas de trabajo, entre otros)

METODOLOGÍA

- **Elaboración del molde en arena**
 1. Preparar la arena de contacto en el mezclador rotatorio con arena sílice fina y bentonita (aprox. 6% del peso) agregándole entre un 6-8% de agua.
 2. Colocar la pieza del modelo en la caja inferior.
 3. Agregar y comprimir la arena de contacto alrededor de la pieza modelo con los dedos de las manos.
 4. Agregar arena de relleno sobre la arena de contacto y compactar con los apisonadores de mano que cuenta el laboratorio.
 5. Eliminar los residuos de arena que quedan en la superficie del molde con la llana metálica.
 6. Retirar la caja inferior de la superior para preparar la superficie de contacto del molde utilizando la espátula metálica.
 7. Unir la otra pieza del modelo y agregar polvo de grafito a la superficie de contacto del molde.
 8. Incorporar el sistema de alimentación (bebedero).
 9. Colocar la caja superior y agregar nuevamente arena de contacto alrededor de la pieza.
 10. Adicionar arena de relleno sobre la arena de contacto y apisonar nuevamente evitando el no ingreso de arena dentro del bebedero.
 11. Eliminar la arena de la superficie del molde con la llana metálica.
 12. Retirar el bebedero del molde.
 13. Realizar los respiradores con la ayuda del punzón.
 14. Retirar la caja superior de la inferior.
 15. Elaborar los ataques y ajustar detalles en el molde en ambas utilizando la espátula, los ganchos, alisadores, entre otros.

16. Eliminar los residuos de arena presentes dentro y fuera del molde con la manguera de compresión de aire.
17. Realizar un respiradero en la base del modelo de la caja superior.
18. Colocar la caja superior con la inferior en un lugar seguro y plano para continuar con la colada del metal (**Imagen 2a**).

Nota. Para la fabricación del molde en arena para colar fundición gris se requiere adicionar a la arena de contacto carbón bituminoso fino (aprox. 5-6%) y agregar de 50-100 ml de agua a la mezcla. Realizar los mismos pasos mencionados anteriormente y al terminar el molde calentar con el soplete la arena de contacto de ambas cajas para luego unir las y colocarlas en un lugar seguro para su posterior colada (**Imagen 2b**).

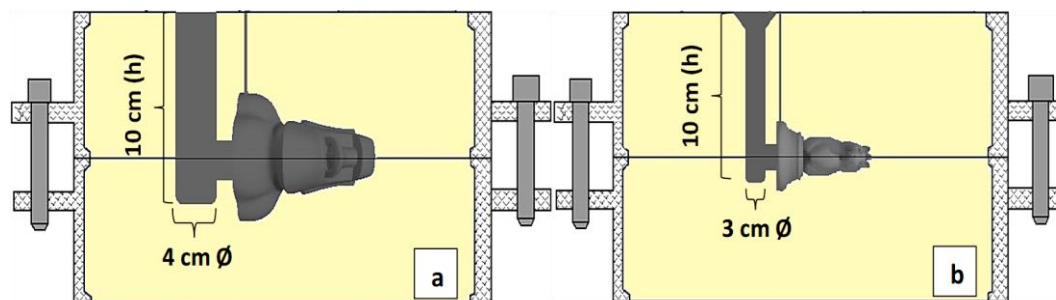


Imagen 2. Dimensiones del modelo en el molde de arena. **a)** Diámetro y altura del bebedero para el modelo del Moai. **b)** Diámetro y altura del bebedero para el modelo del Caballo de ajedrez.

- **Proceso de fundición.**

- Pieza en aluminio*

1. Pesar 1200 g de aluminio.
2. Iniciar el sistema de refrigeración del horno de inducción, programar la temperatura de trabajo del horno a 780 °C y dejar por 10 minutos que se precaliente el horno y las piezas.
3. Introducir las piezas del metal dentro del crisol de grafito con la ayuda de las pinzas metálicas. Esperar a que la aleación esté totalmente fundida para realizar la colada. Este proceso tiene una duración de aproximadamente 10 minutos.
4. Retirar la escoria presente en el metal líquido.
5. Colocar contrapesos sobre el molde de arena y realizar la colada del metal líquido a través del bebedero de manera continua.
6. Dejar enfriar el molde al aire libre por 15 minutos.
7. Extraer la pieza metálica del molde de arena
8. Pesar la pieza obtenida
9. Hacer los cortes del bebedero y del canal de alimentación.

Pieza en fundición gris

1. Pesar 1108 g de aluminio.
2. Cambiar equipos del horno de inducción para realizar fundiciones en metales ferrosos.
3. Iniciar el sistema de refrigeración del horno de inducción.
4. Precalentar el crisol y las piezas.
5. Introducir las piezas de metal dentro del crisol cerámico con la ayuda de las pinzas metálicas.
6. Esperar a que la aleación esté totalmente fundida para realizar la colada aproximadamente 20 minutos.
7. Agregar al metal líquido unas cucharadas de Ferro-silicio
8. Retirar la escoria.
9. Colocar contrapesos sobre el molde de arena y realizar la colada del metal líquido a través del bebedero de manera continua.
10. Dejar enfriar el molde al aire libre por 15 minutos, extraer la pieza metálica del molde de arena y pesar la pieza obtenida
11. Hacer los cortes del bebedero y del canal de alimentación.
12. Realizar metalografía a la pieza final utilizando como probeta un corte del bebedero.

TEMAS DE CONSULTA

- Procesos de fundición en metales ferrosos y no ferrosos en moldes de arena verde.
- Defectología en piezas de fundición en molde de arena.
- Partes de un molde en arena.
- Video educativo Modificaciones del Moai en Meshmixer. Disponible en: <https://youtu.be/FjE7DifCa9s>
- Video educativo Variables de trabajo del Moai en UltiMaker Cure. Disponible en: <https://youtu.be/7jdvKlaw-aw>

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Moldeo en arena verde. Disponible en: <https://riunet.upv.es/handle/10251/168453>

La fundición en moldes de arena. Disponible en: <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/60372/fichero/PFC+Jose+2+La+fundici%C3%B3n+en+arena.pdf>

Elaboración de modelos mediante fabricación aditiva para moldeo manual en arena. Disponible en: https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/94774/descargar_fichero/TFG-4774+Falc%C3%B3n+Ganforina.pdf

Partes molde en arena. Disponible en: https://ikastaroak.ulhi.net/edu/es/DFM/DMMF/DMMF01/es_DFM_DMMF01_Contenidos/webseite_13_moldes.html

Apéndice R. Ficha técnica impresora 3D CREALITY CR-10 Smart Pro

Referencia:
CR-10 Smart-Pro



CREALITY

Tecnología de impresión: FDM (Modelado por deposición fundida)
 Materiales (Filamentos): PLA, ABS, PETG, TPU, WOOD
 Área de impresión: 300 x 300 x 400 mm
 Velocidad de construcción: 60mm/s - 100mm/s
 Diámetro del filamento: 1.75mm
 Extrusora: Accionamiento Directo
 Diámetro de la boquilla: Boquilla Creality MK8 de 0.4 mm
 Hotend: Creality CR-10S Pro Hotend Assembly
 Temperatura máxima de impresión: 300 °C
 Plataforma de impresión: Cama de aluminio con placa flexible "CMagnetic" (Superficie extraíble magnetica)
 Temperatura máxima de plataforma: 100 °C
 Tipo de plataforma (Cartesiana/Fija): Cartesiana
 Nivelación de la plataforma: Automático: sensor de nivelación de cama CR Touch
 Sistema de enfriamiento: Dos ventiladores que enfrían la extrusora, un ventilador radial que enfría la impresión
 Resolución: 100 a 400 micras
 Software de corte compatible: Cura / Simplify3D / Slic3r / Repetier Host
 Interfaz de usuario: Pantalla táctil a todo color de alta definición de 4.3 "
 Sistema operativo:
 Transferencias de archivos - Conectividad: Tarjeta TF / SD
 Tipos de archivos admitidos: .stl, .obj, .amf, .gcode
 Resumen de impresión, reanudación de impresión: Si
 Detección de fin de material: Si
 Electrónica silenciosa: Si
 Características diferenciales: "Control remoto desde Creality Cloud, Nivelacion automatica, Camara HD para monitorear las impresiones, Doble eje z con barras estabilizadoras, Placa magnetica PEI Extrusion directa"
 Peso y dimensiones
 Peso de la máquina: 16,6 Kg
 Peso de envío: 17 Kg
 tamaño de la impresora (largo x profundidad x alto): 578 x 522 x 648mm
 tamaño caja de envío : 660 x 575 x 290 mm
 Entrada CA: 110V - 240 V Salida: Cc 24 V
 Fuente de alimentación: 12V, 30A, 360W | S-360-12
 Consumo: 350W
 Lista de empaque: "1x impresora 3D CR 10 Smart Pro
 1x 200g de filamento PLA
 1x kit de herramientas y accesorios,
 1x cable de poder."

Apéndice S. Ficha técnica filamento PLA Esun

FILAMENTO PLA + ESUN 1KG 1.75MM

MARCA: eSUN/SKU:E-PLA-BROWN-1KG-1.75MM

\$95.000*IVA incluido

DESCRIPCIÓN:



Filamento PLA+ eSun premium de alta calidad en carrete de 1kg, apto para imprimir con la mayoría de impresoras 3D FDM.

- Contenido de la caja: **carrete**
- Diámetro: **1.75 mm**
- Peso neto: **1Kg ± 5%**

Especificaciones técnicas

- Temperatura boquilla: 205°C – 225°C
- Velocidad de Impresión: 40mm/s – 100mm/s
- Temperatura de plataforma: 60°C – 80°C
- Ventilador de capa: Prendido
- Extrusor directo: Distancia retracción 1 mm, velocidad de retracción 35 mm/s
- Extrusor bowden: Distancia retracción 3 mm, velocidad de retracción 35 mm/s

SEDE RICAURTE: CRA. 28 # 10-85 LC 309, BOGOTÁ | **SEDE NORMANDÍA:** CARRERA 70D # 53-30, BOGOTÁ | 3107779621 302 8301499

Apéndice T. Proporciones agua / yeso.

TOP FIGURE – INVESTMENT
LOWER FIGURE – WATER

HEIGHT OF FLASK ALTURA

DIAMETER OF FLASK

	2"	2 1/4"	3"	3 1/2"	4"	5"	6"	7"
2"	5 oz. 57 cc.	6 oz. 68 cc.	7.5 oz. 85 cc.	9 oz. 102 cc.	10 oz. 114 cc.			
2 1/4"	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. 205 cc.	21 oz. 240 cc.	1 1/2 lb. 274 cc.	30 oz. 340 cc.	36 oz. 410 cc.	2 1/4 lb. 500 cc.
3 1/2"	1 lb. 182 cc.	1 1/4 lb. 228 cc.	1 1/2 lb. 274 cc.	1 3/4 lb. 320 cc.	2 lb. 364 cc.	2 1/2 lb. 456 cc.	3 lb. 548 cc.	3 1/2 lb. 640 cc.
4"	18 oz. 205 cc.	23 oz. 262 cc.	27 oz. 308 cc.	2 lb. 364 cc.	2 1/4 lb. 410 cc.	3 1/4 lb. 590 cc.	3 1/2 lb. 637 cc.	4 lb. 728 cc.
5"					3 1/2 lb. 682 cc.	4 1/2 lb. 864 cc.	5 1/2 lb. 1000 cc.	6 1/2 lb. 1182 cc.

$$1 \text{ lb} = 454 \text{ gr.}$$

$$1589 \text{ gr.}$$

$$637 \text{ cc.}$$

$$760 \text{ cc. H}_2\text{O}$$

$$* 1426 \text{ gr.}$$

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.



IDENTIFICACION Y SIMILARES
DISEÑADO POR SUSCRIPCIÓN

Below is a chart that is recommended by the Ransom and Randolph Company for mixing their R & R investment powder.

PROPORTIONING CHART

Weight of Powder	39/100		40/100		41/100	
	Volume of Water U.S. c.c.	Fl. oz.	Volume of Water U.S. c.c.	Fl. oz.	Volume of Water U.S. c.c.	Fl. oz.
1-ounce	11	3/8	11.3	3/8	11.6	3/8
100-grams	39	1-3/8	40	1-3/8	41	1-3/8
1/4-pound	44	1-1/2	45.4	1-1/2	46.6	1-1/2
1/2-pound	88.5	3	91	3	93	3-1/4
3/4-pound	132.5	4 5/8	136	4-3/4	139.6	4-7/8
1-pound	177	6-1/4	181	6-1/3	186	6-1/2
500-grams	195	6-7/8	200	7	205	7-1/4
2-pounds	354	12-1/2	363	12-3/4	372	13-1/8
1,000-grams	390	13-3/4	400	14	410	14-1/2
3-pounds	531	18-3/4	545	19-1/8	558	19-5/8
4-pounds	708	25	726	25-1/2	744	26-1/4
2,000-grams	780	27-1/2	800	28-1/8	820	28-7/8
5-pounds	885	31-1/8	908	32	930	32-3/4
2,500-grams	975	34	1000	35-1/4	1025	36

$$\frac{1426 \text{ gr.}}{3.14 \text{ lb.}} = 454 \text{ gr.}$$

$$\frac{1589 \text{ gr.}}{340 \text{ cc.}} = 4.67 \text{ gr/cc}$$

$$6 \text{ gr.}$$

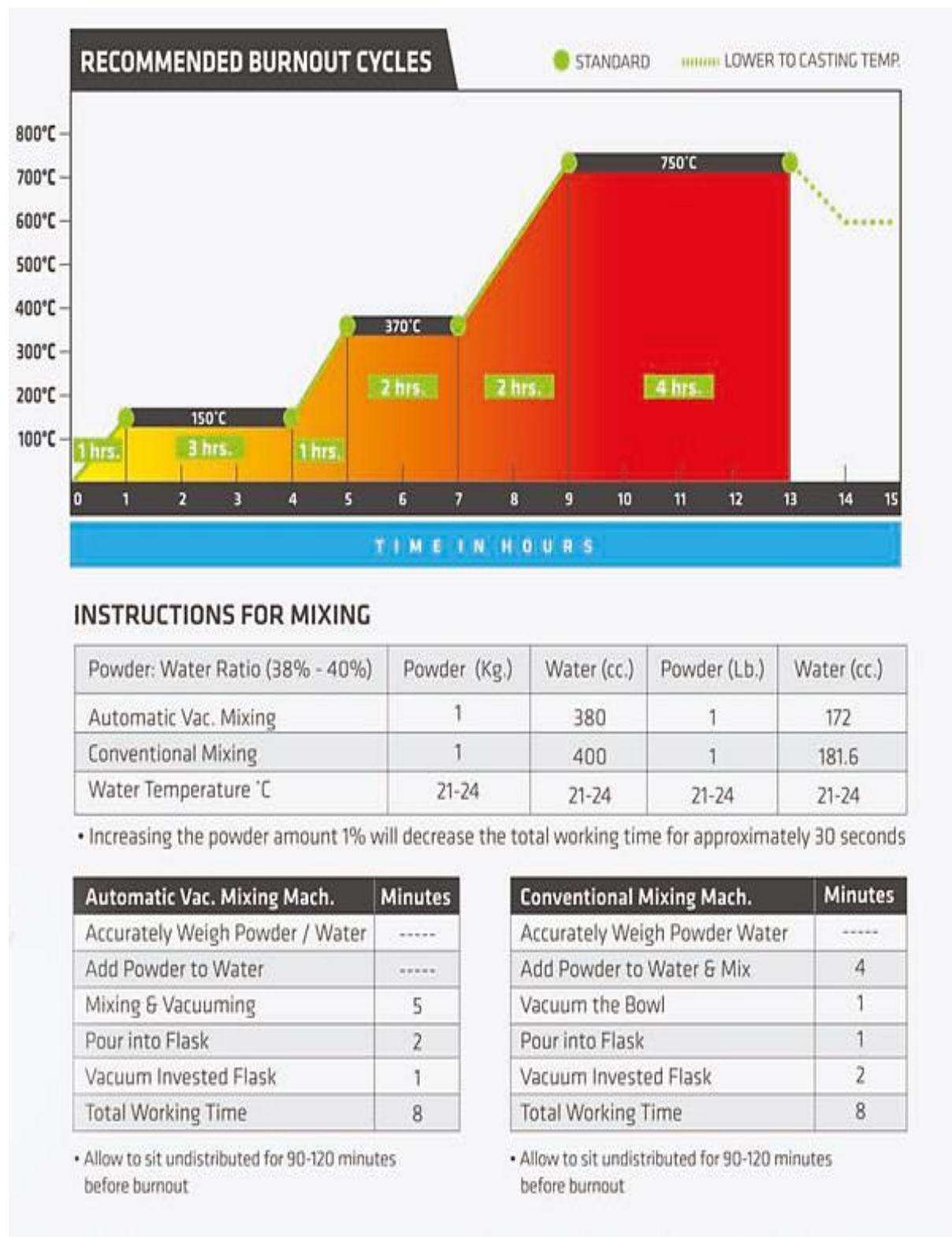
$$R: 1589$$

$$H_2O 637 \text{ cc}$$

$$\frac{1025 \text{ gr.}}{410 \text{ cc.}} = 2.5 \text{ gr/cc}$$

$$908$$

$$28.38$$

Apéndice U. Ficha técnica para Revestimiento Unicast Prestige

Apéndice V. Ficha técnica horno de inducción Galloni Furnace

Horno de inducción estático 5 Kg. Galloni



Referencia G45F

El modelo Furnace, es un horno eléctrico de posición estática, está disponible en diferentes potencias con los modelos Furnace 5 y Furnace 10, con una capacidad máxima de 5 y 10 kilos respectivamente.



El horno Furnace es un horno eléctrico de media frecuencia con posición estática apto para la colada en bote o lingotera.

El crisol es de grafito puro, revestido por una funda de cerámica. La sonda térmica capaz de llegar hasta 1150 °C está alojada en la pared del crisol que permite el control digital automático y la estabilización de la temperatura para lograr que el metal se desplace con fluidez.

La fusión del metal se logra extremadamente rápido gracias a su generador de energía de estado sólido con regulación electrónica.

Refrigerada por agua con posibilidad de colocar la bomba de agua internamente a petición del cliente.

Especificaciones técnicas:

Potencia Generador	9 KHz
Alimentación	230 V - 50/60 Hz
Capacidad Máxima Furnace 5	5Kg Au / 3Kg Ag / 3Kg Bronce / 0.5Kg Pt / 0.5Kg Acero
Capacidad Máxima Furnace 10	10Kg Au / 5Kg Ag / 5Kg Bronce / 1Kg Pt / 1Kg Acero
Dimensiones	550 x 550 x 980 mm
Peso	150 kg
Refrigeración	Agua 3L/min - 3.5bar Posibilidad de bomba interna según petición cliente

C. TOLEDO, 2. 02001. ALBACETE. SPAIN. • (+34) 967210555

pedidos@forniturasdelarosa.com