

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECÁNICA

VALPARAÍSO-CHILE



DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LABORATORIO
DOCENTE PARA PROCESOS DE FUNDICIÓN Y
MOLDEO EN CAMPUS SANTIAGO SAN JOAQUÍN

Vicente Elías Corvalán Avendaño

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO INDUSTRIAL

Profesor guía: Dr. Ing Sheila Lascano Farak

Profesor Co-referente: Dr.(c) Ing. Ricardo Chávez Vásquez

2023

Agradecimientos

El cursar experiencia universitaria ha sido un logro altamente desafiante y si bien gran parte del trabajo, esfuerzo y dedicación es propio, también soy consciente y agradezco a todas las personas que me han apoyado durante mi formación como profesional, por ello doy gracias a mi familia, especialmente a mis padres Cesar Corvalán y Patricia Avendaño, pues fueron ellos quienes me inculcaron el valor de la educación y han incentivado siempre mi formación tanto a nivel educacional como personal. Por otro lado, me gustaría agradecer a mis profesores guías Sheila Lascano y Ricardo Chávez, pues su apoyo a nivel de gestión, teórico y práctico, fue fundamental para poder llevar a cabo mi proyecto de título. Al profesor Hugo Orellana por su ayuda en el proceso de montaje del laboratorio de fundición y su participación en las experiencias prácticas. A Francisco Ortiz alumno de ingeniería civil mecánica, quien me apoyó en múltiples labores prácticas del proyecto. Al profesor Claudio Aravena por su buena disposición a colaborar y su rol como profesor guía en la experiencia de mecanizado.

Finalmente, me gustaría agradecer a todos los amigos que hice durante mi paso por la universidad pues, me han brindado un montón de risas y momentos valiosos que atesoro de mi etapa como estudiante universitario.

Resumen

El proyecto de implementar un laboratorio de fundición y moldeo en el campus San Joaquín, surge como una respuesta ante la necesidad de potenciar las experiencias prácticas para procesos de manufactura sin arranques de viruta. De este modo, el laboratorio de fundición y moldeo sería la primera parte de un proyecto mayor correspondiente a un laboratorio de procesos sin arranque de viruta, donde se sumarían otros procesos como termoformado, laminado, extrusión de plásticos.

El proyecto del laboratorio de fundición y moldeo, desarrollado en este informe, abarca múltiples aspectos como fundamentos teóricos, diseño de las instalaciones, selección de equipos e insumos, diseño de las actividades académicas, puesta en marcha del laboratorio y la realización de experiencias prácticas con alumnos.

El proceso tuvo inicio al comienzo del año académico 2023, en donde se estableció el marco académico en el cual sería integrado el laboratorio de fundición a la asignatura MEC161 de la carrera de Ingeniería Civil Mecánica de la USM. Posteriormente, se comenzó a recolectar el material teórico sobre las técnicas de fundición y moldeo, así también en paralelo se inició el proceso de diseño de las instalaciones del laboratorio y de las actividades académicas a realizar. La actividad académica diseñada consistió en la elaboración de un rin de automóvil, para lo cual los alumnos iniciaron desde la creación de un modelo en formato CAD 3D, el cual posteriormente se imprimió en PLA, y a partir del modelo impreso en 3D se elaboró un molde con yeso para fundir empleando la técnica de PLA perdido. Posteriormente, este molde fue llevado al laboratorio de fundición donde se realizaron los procesos de fundición y vertido del metal (aluminio). Finalmente, se realizaron procesos de mecanizado en CNC para darle los acabados finales a la pieza.

Una vez concluidas las etapas iniciales se realizó la compra de equipos, herramientas e insumos necesarios para la puesta en marcha del laboratorio. El proceso de montaje comenzó en junio y terminó en septiembre, dando así comienzo a las pruebas piloto de las actividades académicas. Durante dicho periodo se experimentó con múltiples parámetros y variables en el proceso de fundición, y en la elaboración de moldes. Tras una serie de intentos de prueba y error se lograron obtener los resultados deseados, y en base a estos se establece el protocolo a seguir para la realización de las actividades académicas.

Dentro de las actividades académicas del curso MEC 161, segundo semestre 2023, se dividieron 74 alumnos en 13 equipos de trabajo. A lo largo de la experiencia pudieron cumplir con lo programado anteriormente. Los 13 equipos lograron pasar por cada etapa del proceso, obteniendo así una pieza de rin terminada en el término de las actividades.

De esta forma se concluye que tanto la planificación como las instalaciones del laboratorio, lograron cumplir con los objetivos propuestos. Es importante mencionar que tras la realización de las actividades del laboratorio se realizó un análisis de puntos a mejorar a modo de aumentar la calidad de las futuras experiencias de fundición y moldeo.

Abstract

The project to implement a casting and molding laboratory at the San Joaquin campus arises as a response to the need to enhance practical experiences for non-chip removal manufacturing processes. Thus, the casting and molding laboratory would be the first part of a larger project for a non-chip removal processes laboratory, where other processes such as thermoforming, plastic extrusion, and laminating would be added.

The casting and molding laboratory project outlined in this report covers multiple aspects such as theoretical foundations, facility design, equipment and supplies selection, academic activity design, laboratory startup, and practical experiences with students.

The process began at the start of the 2023 academic year, establishing the academic framework for integrating the casting laboratory. Subsequently, theoretical material on casting and molding techniques was collected. Concurrently, the design process for the laboratory facilities and academic activities began. The designed academic activity comprised in crafting a car wheel rim. To reach the mentioned goal, the students started creating a 3D CAD model, which was printed in PLA. Using the printed model, a mold was fabricated with plaster to use in the lost PLA casting technique. Then, the mold was used to cast the wheel rim from the raw material (molten aluminum). Finally, CNC machining was performed to give the piece its final finishes.

After completing the initial stages, the purchase of the required equipment, tools, and supplies for the laboratory was carried out. The set-up process started in June and concluded in September, initiating pilot tests of academic activities. During the mentioned period, experimentation with multiple parameters and variables in the casting process and mold making was carried out. After several trial and error attempts, the desired results were achieved, and a protocol was established for conducting academic activities.

In the academic activities, 74 students were divided into 13 teams. Throughout these activities, the students managed to meet the previously set objectives. All 13 teams successfully progressed through each stage of the process, resulting in a completed wheel rim by the end of the activities.

In conclusion, both the planning and the laboratory facilities have successfully met the established objectives. It is important to mention that after the completion of the laboratory activities, an analysis of points to improve was carried out to enhance the quality of future casting and molding experiences.

Índice

1.	INTRODUCCIÓN	IX
1.1	MOTIVACIÓN	IX
1.2	OBJETIVO GENERAL	X
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	X
2	FUNDAMENTOS DE FUNDICIÓN Y MOLDEO	1
2.1	TEORÍA DE FUNDICIÓN	1
2.1.1	<i>Tipos de molde</i>	2
2.1.2	<i>Tipos de modelos</i>	3
2.1.3	<i>Tipos de fundición</i>	3
2.1.4	<i>Calentamiento del metal</i>	4
2.1.5	<i>Vertido del metal</i>	5
2.1.6	<i>Solidificación y enfriamiento</i>	7
2.1.7	<i>Contracción</i>	10
2.2	EQUIPOS Y HERRAMIENTAS DE FUNDICIÓN	11
2.3	FUNDICIÓN EN ARENA	14
2.3.1	<i>Modelo para fundición en arena</i>	15
2.3.2	<i>Cajas de moldeo</i>	16
2.3.3	<i>Pasos del proceso de moldeo en arena (método tradicional de arena verde)</i>	17
2.3.4	<i>Tipos de moldeo en arena</i>	19
2.3.5	<i>Tipos de arena</i>	21
2.3.6	<i>Granulometría de arena</i>	22
2.4	MOLDEO EN YESO	23
2.5	FUNDICIÓN A LA CERA PERDIDA (O REVESTIMIENTO)	23
2.6	TÉCNICA DE PLA PERDIDO	25
2.7	FUNDICIONES DE MOLDE PERMANENTE	26
2.7.1	<i>Fundición de baja presión</i>	27
2.7.2	<i>Fundición al vacío con molde permanente</i>	27
2.7.3	<i>Fundición con troquel</i>	28
2.7.4	<i>Fundición centrífuga:</i>	30
2.8	CAPACIDADES DE LOS PROCESOS DE FUNDICIÓN	31
2.8.1	<i>Fundiciones de molde desechable</i>	31
2.8.2	<i>Fundiciones de molde permanente</i>	31
2.9	DEFECTOS DE FUNDICIÓN	32
2.9.1	<i>Rechupes:</i>	32
2.9.2	<i>Tensiones residuales:</i>	32
2.9.3	<i>Inclusiones</i>	33
2.9.4	<i>Llenado incompleto:</i>	34
2.9.5	<i>Gotas Frías</i>	35
2.9.6	<i>Porosidades o Sopladuras</i>	35
2.9.7	<i>Rebabas:</i>	36
2.9.8	<i>Vitrificaciones:</i>	37
2.9.9	<i>Desplazamiento de Cajas:</i>	38
2.9.10	<i>Desplazamiento de Machos:</i>	38
3	METODOLOGÍA DE LAS ACTIVIDADES DEL LABORATORIO	40
3.1	OBJETIVOS DE EXPERIENCIA ACADÉMICA DE FUNDICIÓN	40

3.2	DISEÑO DE LA ACTIVIDAD	40
3.3	MODELAMIENTO E IMPRESIÓN 3D	42
3.3.1	<i>Consideraciones de diseño</i>	42
3.3.2	<i>Pasos del proceso de diseño e impresión 3D</i>	43
3.4	ELABORACIÓN DE MOLDES Y FUNDICIÓN	43
3.4.1	<i>Pasos para la elaboración del molde yeso-cemento</i>	43
3.4.2	<i>Experiencia laboratorio de fundición</i>	47
3.5	MECANIZADO (CNC):	52
4.	DISEÑO CONCEPTUAL DEL LABORATORIO ACADÉMICO DE FUNDICIÓN Y MOLDEO	54
4.1	FACTORES A CONSIDERAR	54
4.2	ZONIFICACIÓN Y DISTRIBUCIÓN DEL ESPACIO	55
4.3	SELECCIÓN DE EQUIPOS, ESTRUCTURAS, HERRAMIENTAS E INSUMOS DEL LABORATORIO	56
4.3.1	<i>Equipos</i>	56
4.3.2	<i>Herramientas de fundición:</i>	58
4.3.3	<i>Herramientas de moldeo:</i>	60
4.3.4	<i>Equipos de protección personal (EPP)</i>	63
4.3.5	<i>Estructuras:</i>	64
4.3.6	<i>Insumos</i>	67
4.4	LAYOUT DEL LABORATORIO DE FUNDICIÓN Y MOLDEO	68
4.5	RECURSOS Y COSTOS DEL PROYECTO	69
5.	CONSIDERACIONES DE SEGURIDAD Y MEDIOAMBIENTALES	72
6.	MONTAJE, PUESTA EN MARCHA Y VALIDACIÓN	75
6.1	PROCESO DE MONTAJE	75
6.2	PRUEBAS PILOTO DE LAS ACTIVIDADES ACADÉMICAS	81
6.2.1	<i>Pruebas para técnica de moldeo en arena verde</i>	81
6.2.2	<i>Pruebas para técnica PLA perdido</i>	85
6.3	CORRECCIONES Y PARÁMETROS SELECCIONADOS	90
7.	REGISTRO DE ACTIVIDADES ACADÉMICAS	92
8.	CONCLUSIONES	96
8.1	EVALUACIÓN DE DESEMPEÑO DEL LABORATORIO	97
9.	RECOMENDACIONES	98
10.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	100
11.	ANEXOS	102
11.1	<i>Conceptos</i>	102
11.1.1	<i>Diseño CAD 3D:</i>	102
11.1.2	<i>CNC</i>	102

Índice de figuras

<i>Figura 2-1 Diagrama de etapas del proceso de fundición</i>	1
<i>Figura 2-2 Diagrama general de los tipos de fundición</i>	3
<i>Figura 2-3 Esquema efecto Venturi [3]</i>	5
<i>Figura 2-4 Curva de enfriamiento metales puros [2]</i>	7
<i>Figura 2-5 Estructura interna de metales puros solidificados [2]</i>	8
<i>Figura 2-6 Curva de enfriamiento metales aleados [2]</i>	8
<i>Figura 2-7 Estructura interna de aleaciones solidificadas [2]</i>	9
<i>Figura 2-8 Horno de cubilote común y sus componentes [2]</i>	12
<i>Figura 2-9 Hornos de crisol: a) crisol móvil, b) crisol estacionario y c) crisol de volteo [2]</i>	13
<i>Figura 2-10 Horno de inducción [2]</i>	13
<i>Figura 2-11 Modelos para fundición en arena [5]</i>	15
<i>Figura 2-12 Vista en corte de caja de moldeo [5]</i>	16
<i>Figura 2-13 Esquema proceso de moldeo en arena verde [1]</i>	17
<i>Figura 2-14 Proceso de moldeo de cáscara.[17]</i>	20
<i>Figura 2-15 Molde de yeso dividido [10]</i>	23
<i>Figura 2-16 Representación esquemática del proceso de fundición de cera perdida [11]</i>	24
<i>Figura 2-17 Comparativa modelo maestro de impresión 3D y pieza final [11]</i>	25
<i>Figura 2-18 Etapas de fundido en moldes permanentes [2]</i>	26
<i>Figura 2-19 Diagrama de fundición a baja presión [2]</i>	27
<i>Figura 2-20 Diagrama de fundición al vacío [14]</i>	27
<i>Figura 2-21 Moldeo en troquel en cámara caliente [2]</i>	28
<i>Figura 2-22 Moldeo en troquel en cámara fría [2]</i>	29
<i>Figura 2-23 Representación fundición centrifuga [7]</i>	30
<i>Figura 2-24 Defecto de rechupe [6] y [15]</i>	32
<i>Figura 2-25 Defecto de tensiones residuales [6]</i>	33
<i>Figura 2-26 Defecto de inclusiones [6]</i>	34
<i>Figura 2-27 Defecto de llenado incompleto [6] y [15]</i>	34
<i>Figura 2-28 Defecto de gotas frías [6]</i>	35
<i>Figura 2-29 Defecto de sopladuras [6] y [15]</i>	36
<i>Figura 2-30 Defecto de rebabas [6]</i>	37
<i>Figura 2-31 Defecto de vitrificaciones [6]</i>	37
<i>Figura 2-32 Defecto de desplazamiento de cajas [6] y [15]</i>	38
<i>Figura 2-33 Defecto de desplazamiento de machos [6]</i>	39
<i>Figura 3-1 Diagrama actividad académica laboratorio de fundición y moldeo</i>	41
<i>Figura 3-2 paso 1: Recubrimiento con vaselina</i>	44
<i>Figura 3-3 paso 2: Posicionamiento de modelo</i>	44
<i>Figura 3-4 paso 4: mezclado de yeso-cemento</i>	45
<i>Figura 3-5 paso 5: reunir agua</i>	45
<i>Figura 3-6 Paso 5: revolver mezcla con el agua</i>	45
<i>Figura 3-7 Paso 6: recubrimiento del modelo</i>	46
<i>Figura 3-8 paso 7: Extracción del molde</i>	46
<i>Figura 3-9 Molde post quemado PLA</i>	47
<i>Figura 3-10 Profesor impartiendo la cátedra de taller de fundición</i>	48
<i>Figura 3-11 Alumno con EPP para operar el horno</i>	49
<i>Figura 3-12 Precalentamiento de crisol</i>	50
<i>Figura 3-13 Volcamiento del horno</i>	50
<i>Figura 3-14 vertido de metal fundido en molde</i>	51

<i>Figura 3-15 Herramienta CAM Inventor.</i>	52
<i>Figura 4-1 Plano de instalaciones del laboratorio</i>	56
<i>Figura 4-2 Horno Narbertherm k 1-13 [18].</i>	57
<i>Figura 4-3 Campana de extracción.</i>	58
<i>Figura 4-4 Crisol fijo con canal y crisol móvil de vertido.</i>	59
<i>Figura 4-5 Palas de escoria.</i>	59
<i>Figura 4-6 Pinza de crisol.</i>	60
<i>Figura 4-7 Caja de moldeo.</i>	60
<i>Figura 4-8 Apisonador de arena realizado con impresión 3D.</i>	61
<i>Figura 4-9 Pala de tamaño regular.</i>	61
<i>Figura 4-10 Bebederos cilíndricos de polímero.</i>	62
<i>Figura 4-11 Compresor de aire Bauker [19].</i>	62
<i>Figura 4-12 Contenedor divisible para moldeo en yeso.</i>	63
<i>Figura 4-13 Conjunto EPP para laboratorio de fundición.</i>	64
<i>Figura 4-14 Mesa de horno y arenero de seguridad.</i>	65
<i>Figura 4-15 Brazo de soporte para campana de extracción.</i>	66
<i>Figura 4-16 Repisa de almacenamiento para el taller de fundición.</i>	67
<i>Figura 4-17 Layout laboratorio de fundición.</i>	68
<i>Figura 4-18 Layout laboratorio de fundición.</i>	68
<i>Figura 6-1 Estado inicial espacio de laboratorio.</i>	75
<i>Figura 6-2 Estado del laboratorio post limpieza.</i>	76
<i>Figura 6-3 Llegada del horno e instalación eléctrica.</i>	77
<i>Figura 6-4 Montaje de horno y campana de extracción.</i>	78
<i>Figura 6-5 Instalación brazo de soporte para campana.</i>	79
<i>Figura 6-6 Pinzas de crisol elaboradas en el taller.</i>	79
<i>Figura 6-7 Crisol de acero inoxidable elaborado en el taller.</i>	80
<i>Figura 6-8 Palas de escoria elaboradas en el taller.</i>	80
<i>Figura 6-9 Mezcla arena-bentonita.</i>	81
<i>Figura 6-10 1er procedimiento de colado.</i>	82
<i>Figura 6-11 1era prueba de fundición en arena.</i>	82
<i>Figura 6-12 Resultado 1era prueba de fundición en arena.</i>	83
<i>Figura 6-13 2da prueba de fundición en arena.</i>	84
<i>Figura 6-14 3era prueba de fundición en arena.</i>	84
<i>Figura 6-15 Molde de yeso recubierto en arena.</i>	85
<i>Figura 6-16 Resultado 1era prueba PLA perdido.</i>	86
<i>Figura 6-17 Eliminación PLA con soplete.</i>	87
<i>Figura 6-18 Resultado 2da prueba PLA perdido.</i>	87
<i>Figura 6-19 Resultados 2da prueba PLA perdido.</i>	88
<i>Figura 6-20 Elaboración molde de rin para pruebas.</i>	88
<i>Figura 6-21 Resultado 3era prueba PLA perdido.</i>	89
<i>Figura 6-22 Modelo, molde y pieza terminada de moai.</i>	90
<i>Figura 6-23 Resultado 4ta prueba PLA perdido.</i>	90
<i>Figura 7-1 Registro de elaboración moldes de arena en actividades académicas.</i>	93
<i>Figura 7-2 Registro de proceso de colada en actividades académicas.</i>	93
<i>Figura 7-3 Registro extracción y limpieza de pieza en actividades académicas.</i>	94
<i>Figura 7-4 Registro equipo de trabajo en actividades académicas.</i>	94
<i>Figura 7-5 Registro proceso de CNC en actividades académicas.</i>	95
<i>Figura 7-6 Resultado final de las piezas de los equipos después de las actividades académicas.</i>	95

Índice de tablas

<i>Tabla 2-1 Contracción volumétrica para distintos metales, debido a la contracción por solidificación y del sólido [2].</i>	11
<i>Tabla 2-2 Resumen de tipo de arena sus características y usos [9].</i>	21
<i>Tabla 2-3 Tabla comparativa de tamaños de grano para arenas de fundición [9].</i>	22
<i>Tabla 2-4 Capacidades de los procesos de fundición en moldes desechables [10].</i>	31
<i>Tabla 2-5 Capacidades de los procesos de fundición en moldes permanentes [14].</i>	31
<i>Tabla 4-1 Costos de equipos</i>	69
<i>Tabla 4-2 Costos de infraestructura.</i>	69
<i>Tabla 4-3 Costos de herramientas</i>	70
<i>Tabla 4-4 Costos de insumos y misceláneos.</i>	70
<i>Tabla 9-1 Recomendaciones para implementos del laboratorio.</i>	98

1. Introducción

1.1 Motivación

Desde que se comienza a impartir de la carrera de ingeniería civil mecánica en el campus Santiago San Joaquín de la UTFSM, se fueron integrando progresivamente experiencias de laboratorio en área de manufactura de distintos procesos de fabricación. Sin embargo, la mayoría de los procesos integrados corresponden a procesos con arranque de viruta (principalmente máquinas de mecanizado), por lo se ha hecho necesario un fortalecimiento en el área de procesos sin arranque de viruta.

En este contexto, el diseño e implementación de un laboratorio docente de fundición y moldeo se convierte en una oportunidad para ampliar las experiencias prácticas de los alumnos dentro del área de procesos de manufactura, materializando de este modo, una enseñanza de calidad y un espacio de aprendizaje significativo para los estudiantes. Este laboratorio proporcionará a los estudiantes una valiosa experiencia práctica, abarcando desde el diseño y obtención de un modelo mediante software e impresión 3D, procesos de fundición y moldeo en laboratorio hasta una etapa final de mecanizado para acabados de la pieza obtenida post fundición.

El laboratorio docente de fundición y moldeo permitirá a los estudiantes explorar en profundidad los conceptos teóricos y técnicos que respaldan estos procesos industriales. Además, fomentará la comprensión de los fenómenos físicos involucrados en la transformación del metal fundido en piezas sólidas, así como el análisis de los factores que influyen en la calidad de las piezas producidas.

Para asegurar la eficacia del laboratorio, es fundamental seleccionar los equipos y herramientas adecuadas para el proceso, lo que permitirá que estudiantes puedan experimentar situaciones reales y desarrollar competencias prácticas, relevantes para su futuro desempeño profesional.

Asimismo, se debe prestar especial atención a los aspectos de seguridad y prevención de riesgos en el laboratorio. Se establecieron protocolos y procedimientos para manipular adecuadamente los metales y las temperaturas elevadas, promoviendo el uso de equipo de protección personal y el manejo responsable de todos los elementos utilizados en el proceso.

Además de los aspectos técnicos, el diseño del laboratorio docente también debe enfocarse en el aspecto pedagógico. Se deben desarrollar guías de experimentos claras y estructuradas, que permitan a los estudiantes seguir un proceso de aprendizaje guiado y significativo. La integración de prácticas de trabajo en equipo y proyectos colaborativos mejorará la dinámica del aprendizaje, promoviendo la resolución de problemas y la creatividad en la solución de desafíos específicos.

1.2 Objetivo general

Diseñar e implementar un laboratorio de fundición y moldeo de uso docente para el Santiago Campus San Joaquín de la UTFSM, el cual debe contar con los equipos y condiciones que permitan llevar a cabo actividades pedagógicas con el fin de acercar a los alumnos mediante la experimentación a los procesos industriales de fundición y moldeo.

1.3 Objetivos específicos

1. Definir el espacio de laboratorio de fundición y moldeo, considerando los equipos, insumos e infraestructura requerida.
2. Implementar las instalaciones físicas del laboratorio de fundición y moldeo, bajo estándares que permitan llevar a cabo las actividades pedagógicas a desarrollar.
3. Diseñar una experiencia de laboratorio que integre el diseño asistido por computadora de un modelo para elaboración de moldes y el proceso de fundición y mecanizado.
4. Desarrollar las experiencias poniendo a punto los equipos y evaluando su funcionamiento en el curso MEC161 de la carrera Ingeniería Civil Mecánica de la USM.

2 Fundamentos de fundición y moldeo

2.1 Teoría de Fundición

La fundición es uno de los procesos más antiguos de manufactura existente, siendo utilizado durante siglos para la elaboración de piezas metálicas. Esta técnica consiste en el calentamiento del material a trabajar, para que una vez fundido éste pueda ser depositado en un molde con la forma de pieza deseada. Una vez que el material fundido se enfría y solidifica, se forma la pieza metálica que recibe el nombre de fundición [1].

El proceso de fundición generalmente se lleva a cabo en varias etapas, estas se señalan en el diagrama de la figura 2-1:

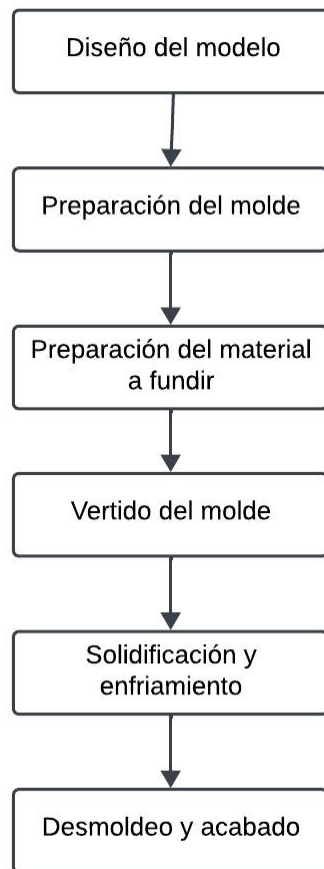


Figura 2-1 Diagrama de etapas del proceso de fundición

1. Diseño del modelo: Se crea un modelo o patrón de la pieza deseada utilizando diferentes métodos, como el diseño asistido por computadora (CAD) o la creación manual.

2. Preparación del molde: Se crea un molde que será la cavidad en la que se verterá el material fundido. Los moldes pueden ser de arena, cerámica, yeso, metal u otros materiales, dependiendo del tipo de fundición y del material utilizado.

3. Preparación del material: El material que se va a fundir se prepara calentándolo hasta alcanzar su estado líquido. Esto se logra mediante el uso de hornos, crisoles u otros equipos de fusión adecuados para cada tipo de material.

4. Vertido y llenado del molde: El material fundido se vierte cuidadosamente en el molde a través de un sistema de canales o conductos de vertido. En esta etapa se espera que el metal fundido llene por completo las cavidades del molde.

5. Solidificación y enfriamiento: El material fundido se solidifica y se enfría en el molde, adoptando la forma y la estructura del modelo o patrón utilizado. La velocidad de enfriamiento y solidificación puede ser controlada para obtener propiedades específicas en la pieza final.

6. Desmoldeo y acabado: Una vez que el material se ha solidificado y enfriado lo suficiente, se extrae la pieza fundida del molde. A menudo se requiere algún proceso de acabado adicional, como el pulido, lijado o eliminación de rebabas, para obtener la forma y la calidad deseadas.

El proceso de fundición se utiliza en diversas industrias, como la automotriz, aeroespacial, construcción, electrónica, joyería, entre otras. Permite la producción de piezas con formas complejas, detalles finos y propiedades específicas que pueden ser difíciles de lograr con otros métodos de fabricación.

2.1.1 Tipos de molde

Un molde corresponde a una cavidad cuya configuración geométrica determina la forma de la pieza fundida [2]. Al momento de diseñar un molde se debe tener en cuenta la contracción del metal durante su solidificación y enfriamiento, que depende del metal que se está fundiendo y del tipo de fundición se está llevando a cabo. Los procesos de fundición se dividen en dos grandes categorías acorde al tipo de molde que se utiliza: (1) moldes desechables o (2) moldes permanentes.

Los **moldes desechables** son aquellos moldes temporales que se fabrican con la intención de ser utilizados una sola vez. Esto es, una vez que se ha realizado el proceso de colada y la solidificación del metal, el molde debe ser destruido para extraer la pieza. En esta categoría se encuentran los moldes de arena, yeso, cerámicos, etc. Debido a que por lo general poseen un bajo costo de producción unitario, estos moldes son adecuados para producciones pequeñas en donde se requiera una baja cantidad de piezas.

Por otra parte, los **moldes permanentes** están fabricados generalmente de hierro fundido cubierto con una película refractaria, y están orientados a la producción masiva de piezas de tamaño pequeño y medio. Estos moldes destacan por su gran resistencia y vida útil, logrando mantener la integridad estructural a través de múltiples procesos de fundición. Entre sus ventajas se encuentran la reducción de tiempo empleado en la fabricación cada pieza, la buena calidad superficial de las piezas obtenidas y la reducción de costos económicos al producir grandes lotes.

2.1.2 Tipos de modelos

Un modelo, o patrón, es un sólido cuya geometría corresponde a la de la pieza deseada. La función de éste es imprimir su forma en el molde, creando un vaciado en negativo. Al momento de diseñar un modelo se debe tener una serie de consideraciones como el sobredimensionamiento para que éste se ajuste con el porcentaje de contracción del metal, ángulos de salida, calidad superficial, entre otros. Las variables a considerar dependen del tipo de fundición que se esté llevando a cabo.

Así como existen los moldes permanentes y desechables, los modelos se pueden clasificar de la misma forma, siendo los **modelos desechables** aquellos que se eliminan durante la elaboración del molde. Por ejemplo, en la técnica de cera perdida, el modelo es elaborado en cera y luego es recubierto con material refractario; una vez que el recubrimiento se seca, se somete a altas temperaturas y se elimina la cera derretida del interior dejando un vaciado con la forma deseada. Por otro lado, los **modelos permanentes** son aquellos que se pueden emplear repetidamente en la elaboración de varios moldes, tal como ocurre en la elaboración de los moldes de arena, en donde, a partir de un mismo patrón se pueden elaborar múltiples moldes, pues una vez elaborada la geometría en el molde, el modelo puede ser retirado y reutilizado.

2.1.3 Tipos de fundición

Existen múltiples técnicas de fundición, las cuales se dividen en fundiciones de molde desechable y fundiciones de molde permanente. En la figura 2-2 se presenta un diagrama general de los tipos de fundición más comunes.

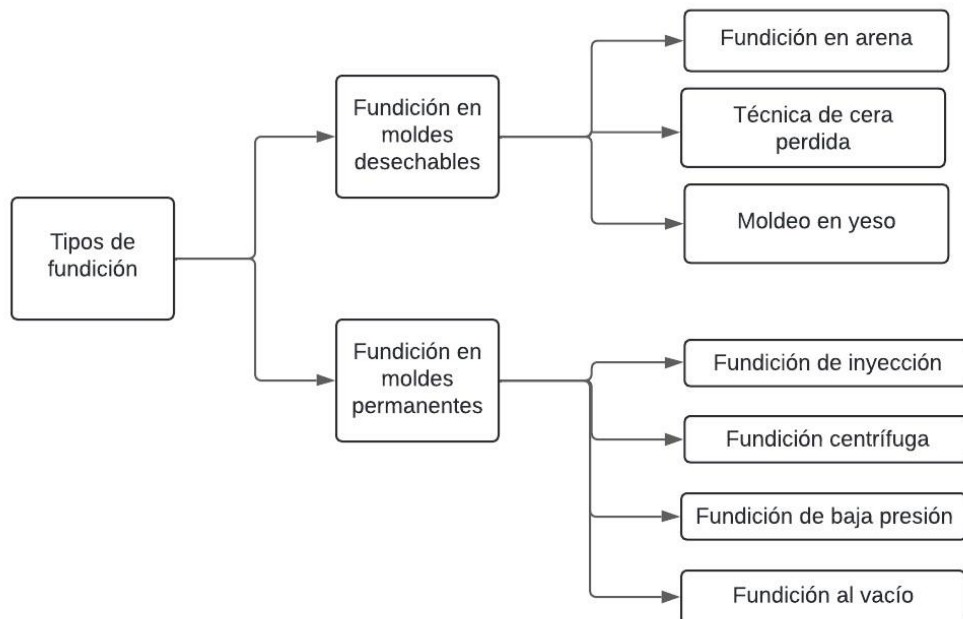


Figura 2-2 Diagrama general de los tipos de fundición

2.1.4 Calentamiento del metal

Para fundir el metal, el horno debe llevar el material hasta su temperatura de fusión, para ello se debe aportar una determinada energía calorífica. Ésta puede determinarse mediante la suma entre el calor necesario para elevar la temperatura hasta el punto de fusión, el calor de fusión para transformar el metal de líquido a sólido y el calor requerido para sobrecalentar el metal fundido a la temperatura de vertido. Lo anteriormente descrito se puede expresar en la ecuación (3.1) [2]:

$$H = \rho V \{ C_s (T_m - T_o) + H_f + C_l (T_p - T_m) \} \quad (3.1)$$

dónde:

- H: Calor total necesario para elevar la temperatura del metal a la temperatura de vertido en julios (J) o unidades de energía térmica equivalentes como British Thermal Units (BTU).
- ρ : Densidad del metal en gramos por centímetro cúbico (g/cm^3) o libras por pulgada cúbica (lb/in^3).
- V: Volumen del metal que se calienta en centímetros cúbicos (cm^3) o pulgadas cúbicas (in^3).
- C_s : Calor específico por peso para el metal sólido en julios por gramo- grado Celsius ($\text{J/g-}^\circ\text{C}$) o unidades equivalentes en BTU por libra- grado Fahrenheit ($\text{BTU/lb-}^\circ\text{F}$).
- T_m : Temperatura de fusión del metal en grados Celsius ($^\circ\text{C}$) o Fahrenheit ($^\circ\text{F}$).
- T_o : Temperatura inicial o ambiental en grados Celsius ($^\circ\text{C}$) o Fahrenheit ($^\circ\text{F}$).
- H_f : Calor de fusión necesario para convertir el metal de sólido a líquido en julios por gramo (J/g) o unidades equivalentes en BTU por libra (BTU/lb).
- C_l : Calor específico por peso del metal líquido en julios por gramo- grado Celsius ($\text{J/g-}^\circ\text{C}$) o unidades equivalentes en BTU por libra- grado Fahrenheit ($\text{BTU/lb-}^\circ\text{F}$).
- T_p : Temperatura de vertido del metal en grados Celsius ($^\circ\text{C}$) o Fahrenheit ($^\circ\text{F}$).

La ecuación anterior funciona a nivel conceptual, sin embargo, su aplicación es limitada a casos puntuales debido a múltiples factores como:

- El calor específico de un metal varía con la temperatura, especialmente cuando se presentan cambios de fase.
- El calor específico puede ser diferente en estado sólido y líquido.
- Mayormente se suelen fundir aleaciones por lo que presentan más de un único punto de fusión.
- En la mayoría de los casos no se dispone de todos los datos requeridos en la ecuación
- Durante el calentamiento existen pérdidas caloríficas las cuales no son consideradas en la ecuación.

2.1.5 Vertido del metal

Tras calentar el material sobrepasando el punto de fusión hasta la temperatura de sobrecalentamiento, éste se encuentra en estado líquido y está listo para el proceso de vertido. Durante este proceso, el metal líquido será depositado a través de los canales de alimentación del molde, y deberá fluir para llenar todas las cavidades de éste antes de solidificarse. La temperatura, velocidad de vertido y turbulencia del flujo son variables claves durante el proceso de colado. La temperatura de vertido es la temperatura a la cual se encuentra el material durante el colado; la velocidad de vertido corresponde a la tasa volumétrica a la cual fluye el metal líquido; y las turbulencias son las irregularidades en el flujo. Los conceptos de velocidad de vertido y la turbulencia están directamente relacionados entre sí. En el caso de presentarse un flujo turbulento, éste puede ocasionar una serie de problemas como formación de óxidos y erosión del molde, razón por la cual debe evitarse. Es importante cuidar todas las variables mencionadas para conseguir piezas fundidas de buena calidad [2].

Análisis de flujo vertido de material

En el proceso de fundición, el teorema de Bernoulli y la ley de continuidad son relaciones cruciales que gobiernan el flujo del metal líquido. El teorema de Bernoulli establece que la suma de energías en un líquido que fluye es constante entre dos puntos, ecuación (3.2), siendo útil para determinar la velocidad del metal en la base del bebedero [2]. En la figura 2-3 se representa el efecto Venturi el cual se explica a partir del principio de Bernoulli y el principio de continuidad.

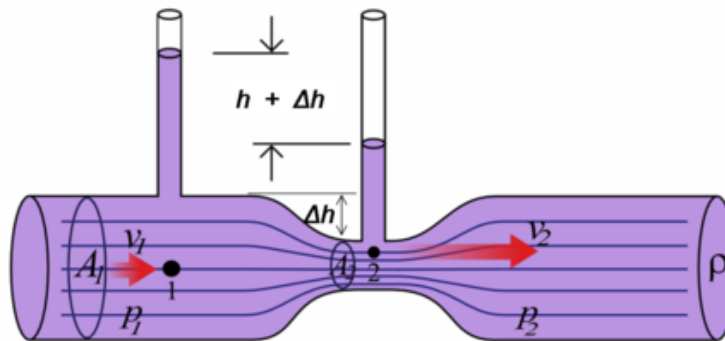


Figura 2-3 Esquema efecto Venturi [3].

$$h_1 + \frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2g} + F1 = h_2 + \frac{p_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2g} + F2 \quad (3.2)$$

dónde:

- h: altura piezométrica (cm o in),
- p: presión del líquido (N/cm² o lb/in²)

- ρ : densidad del líquido (g/cm^3 o lb/in^3)
- v : velocidad de flujo (cm/s o in/s)
- g : constante de la aceleración de la gravedad (981 cm/s^2 o 386 in/s^2)
- F : pérdidas piezométricas debidas a la fricción (cm o in)

Los subíndices 1 y 2 indican dos ubicaciones en el flujo del líquido. Esta ecuación es fundamental para entender la dinámica de fluidos en un sistema de fundición.

Si se desprecian las pérdidas por fricción, se asume que el sistema se encontrará a presión atmosférica y se fija el sistema de referencia en h_2 como base, siendo $h_2=0$ y h_1 la altura de entrada en el molde. La velocidad inicial $v_1=0$, por lo que la ecuación (3.2) se puede reescribir como la ecuación (3.3):

$$h_1 = \frac{v_2^2}{2g} \quad (3.3)$$

Otra relación importante durante el proceso de vertido es la ley de continuidad en la cual se establece que el flujo volumétrico permanece constante a través del líquido, ecuación (3.4).

$$Q = v_1 A_1 = v_2 A_2 \quad (3.4)$$

dónde:

- Q : caudal de metal líquido (cm^3/s o in^3/s)
- v : velocidad, (cm/s o in/s)
- A : área transversal de la sección, (cm^2 o in^2)

Los bebederos en los moldes son diseñados con un ahusamiento con el fin de conseguir que el flujo volumétrico sea estable entre la parte superior e inferior del bebedero. Si se asume un caudal constante (vA) el tiempo requerido para rellenar un molde de volumen V , puede ser determinado en la ecuación (3.5).

$$T_{mf} = \frac{V}{Q} \quad (3.5)$$

dónde:

- T_{mf} : es el tiempo de llenado del molde (s)
- V : es el volumen de la cavidad del molde (cm^3)
- Q : es el caudal de metal líquido (cm^3/s o in^3/s)

Utilizando las ecuaciones (3.3) a (3.5) se puede realizar un análisis del flujo del metal durante el vertido y obtener el tiempo mínimo de llenado despreciando el roce.

2.1.6 Solidificación y enfriamiento

Tras realizar el vertido en el molde, el metal se enfría y solidifica. Dentro del proceso de solidificación se ven involucrados múltiples aspectos como el tiempo de solidificación, el porcentaje de contracción y el diseño de mazarota.

Respecto al proceso de solidificación de los metales, es necesario saber que éste es diferente si se trata de un metal puro o una aleación.

Metales puros: En los metales puros, el proceso de solidificación se produce a temperatura constante en su punto de adhesión, el cual es igual al punto de fusión. La solidificación ocurre dentro de un tiempo determinado, el tiempo total de solidificación abarca desde el vertido hasta la solidificación del metal, mientras que el tiempo local de solidificación es el tiempo en el cual el calor de fusión latente es liberado hacia el molde. Una vez terminado el proceso de solidificación, el enfriamiento del metal sólido continúa. El proceso de solidificación se representa en un gráfico de temperatura vs. tiempo llamado curva de enfriamiento [2], éste se presenta en la figura 2-4.

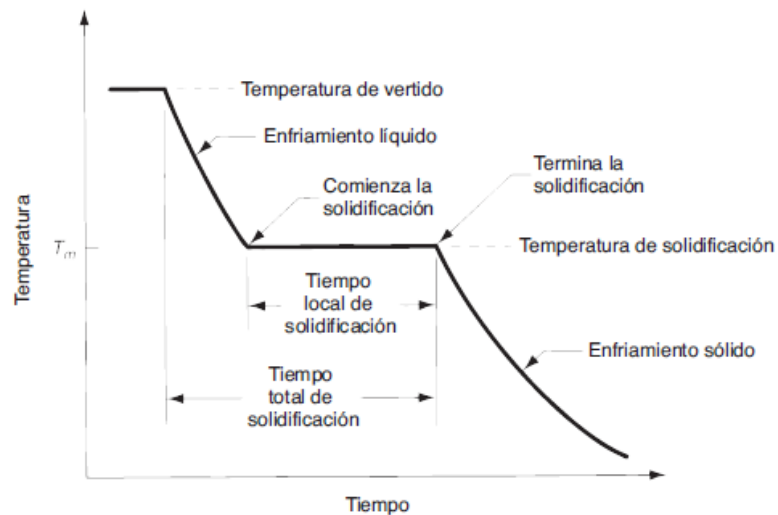


Figura 2-4 Curva de enfriamiento metales puros [2].

Debido al enfriamiento producido por el molde se forma una capa de metal sólido en la superficie de la pieza de forma inmediata tras el vertido y posteriormente el espesor de esta capa conforme se va produciendo la solidificación hacia el interior de la pieza.

En cuanto a la formación de granos, se puede observar que el metal solidificado de la capa más externa, al ser enfriado con mayor rapidez, presenta granos finos de ejes iguales orientados al azar. A medida que el enfriamiento se produce hacia el interior de la pieza se forman granos que crecen en dirección opuesta a la transferencia de calor, es decir, crecen hacia el interior de la pieza en forma de estructuras alargadas de metal sólido. Este tipo de crecimiento es denominado como crecimiento dendrítico y ocurre tanto en la solidificación de metales puros como en aleaciones. Los

granos obtenidos del crecimiento dendrítico cuentan con una orientación preferente y tienden a ser gruesos [2]. En la figura 2-5 se representa la estructura interna de un metal puro solidificado.

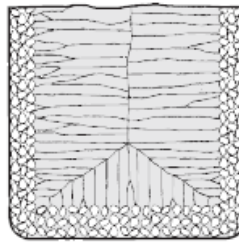


Figura 2-5 Estructura interna de metales puros solidificados [2].

Aleaciones: En el caso de aleaciones, la solidificación es producida dentro de un rango de temperaturas en lugar de una temperatura única. Este rango depende de las características del sistema de aleación y de su composición. A medida que la temperatura desciende se puede observar que el proceso de solidificación inicia con un estado líquido (línea liquidus) y finaliza en estado sólido (línea solidus). El proceso de solidificación ocurre de forma similar a los metales puros, en donde primero se solidifica la capa exterior formando granos pequeños, y luego a medida que la solidificación avanza hacia el interior de la pieza, se forman las dendritas. Sin embargo, debido a la dispersión de temperatura que se presenta en las aleaciones durante la formación dendrítica, se forma una zona en donde coexiste el metal en fase líquida y sólida simultáneamente, llamada zona blanda [2]. El proceso de solidificación de aleaciones se representa en la curva de la figura 2-6.

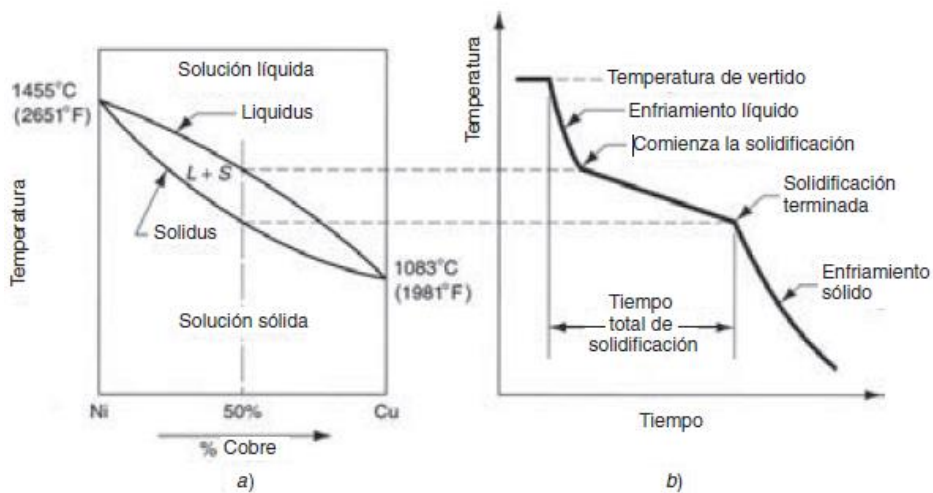


Figura 2-6 Curva de enfriamiento metales aleados [2].

Otro factor que afecta al proceso de solidificación de las aleaciones es la formación de dendritas, ya que esta favorece al metal con punto de fusión más alto porque solidifica primero, mientras que el resto continúa en estado líquido, pudiendo generar posibles desbalances en la composición a medida que disminuye la temperatura. Este desbalance se manifiesta como una segregación de dos tipos: microscópica y macroscópica. A nivel microscópico, la composición varía en los granos individualmente debido a que, al momento de producirse la formación de dendritas, estas tendrán un

mayor porcentaje de un elemento que de otro, y a medida que la solidificación va avanzando, se produce una reducción del metal de mayor punto de fusión haciendo que la segregación vaya aumentando de forma progresiva en los granos. A nivel macroscópico la composición química varía en todo el sistema, las capas más superficiales presentarán un mayor porcentaje de uno de los elementos de la aleación el cual reduce su presencia hacia el centro de la fundición hasta un punto donde la aleación queda privada de este elemento en su interior, esto se le llama segregación de lingote [2] y se representa en la figura 2-7.

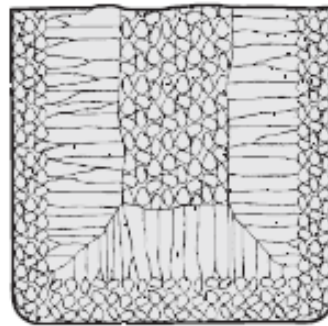


Figura 2-7 Estructura interna de aleaciones solidificadas [2].

Tiempo de solidificación:

El tiempo de solidificación es aquel que se requiere para que el metal fundido pase desde el estado líquido a sólido. Independientemente de si se trata de un metal puro o una aleación, se puede utilizar la relación de la regla de Chvorinov para determinarlo [2], ecuación (3.6).

$$T_{TS} = C_m \left(\frac{V}{A} \right)^n \quad (3.6)$$

dónde:

- T_{TS} : tiempo total de solidificación (min).
- V : volumen del fundido (cm^3 o in^3).
- A : área de la superficie del fundido (cm^2 o in^2).
- n : es un exponente que por lo general se acepta que tiene un valor de 2.
- C_m : es la constante del molde.

El valor de la constante del molde depende de las condiciones de operación, de las propiedades térmicas del material del molde (calor específico y conductividad térmica), de las propiedades térmicas del metal que se funde (calor de fusión, calor específico y conductividad térmica) y de la temperatura de vertido. Este valor es determinado de forma experimental mediante operaciones de fundición realizadas con anterioridad.

La regla de Chvorinov refleja que cuando una fundición representa una relación grande entre volumen y área superficial, su tiempo de solidificación será mayor que una fundición que presente una menor relación de volumen/ área. [2].

2.1.7 Contracción

La contracción es un fenómeno físico en el cual un cuerpo de metal fundido experimenta una disminución de su volumen, producto del proceso de solidificación y enfriamiento. Durante este proceso la estructura molecular de la fundición experimenta una serie de cambios [4].

Las principales características del fenómeno de contracción son:

1. **Solidificación y cambio de estado:** La contracción está directamente asociada al proceso de solidificación, que implica el cambio de estado del metal desde un estado líquido hasta un estado sólido ordenado. Durante este proceso las partículas del metal reorganizan su estructura cristalina, generando una configuración más compacta y densa.
2. **Contracción volumétrica y lineal:** La contracción se manifiesta en dos formas principales: la contracción volumétrica, que implica la reducción del volumen total del metal fundido; y la contracción lineal, que afecta dimensiones específicas del material. Ambas formas de contracción están relacionadas con el ajuste espacial de las partículas durante la solidificación.
3. **Liberación de calor latente:** La solidificación está acompañada por la liberación de calor latente, que es un fenómeno térmico inherente a la transición de fase. La liberación de este calor contribuye al proceso de contracción y puede influir en la cinética del fenómeno.
4. **Impacto en la forma de la pieza fundida:** La contracción tiene un impacto directo en la geometría y las dimensiones finales de la pieza fundida. Si no se gestiona adecuadamente, puede dar lugar a defectos estructurales como contracciones no deseadas o porosidades, afectando la integridad de la pieza.
5. **Compensación de contracción:** La gestión de la contracción implica estrategias de compensación. Se incorporan patrones de contracción en el diseño, y se aplican sistemas de alimentación para proporcionar metal adicional y compensar las contracciones no deseadas.
6. **Variaciones en la contracción:** La contracción puede variar en magnitud y forma según las condiciones específicas de solidificación y las características del metal. Contracciones uniformes, no uniformes y contracciones específicas en ciertas direcciones son manifestaciones comunes.

El fenómeno de contracción en el metal fundido es un proceso complejo e influye significativamente en la formación y calidad de las piezas fundidas. Es importante comprender de forma detallada las variables involucradas y aplicar estrategias efectivas para garantizar la integridad dimensional y estructural de las piezas en la producción metalúrgica y de fundición.

Existen dos tipos principales de contracción volumétrica, la contracción por solidificación, la cual ocurre cuando el metal cambia de estado y la contracción térmica del sólido, la cual ocurre cuando el metal ya se encuentra en estado sólido, pero disminuye su temperatura. En la tabla 2-1 se representan los valores típicos de contracción volumétrica para distintos metales.

Tabla 2-1 Contracción volumétrica para distintos metales, debido a la contracción por solidificación y del sólido [2].

Metal	Contracción por solidificación %	Contracción térmica del sólido %
Aluminio	7.0	5.6
Aleaciones de aluminio	7.0	5.0
Hierro colado gris	1.8	3.0
Hierro colado, alto carbono	0	3.0
Acero, bajo carbono	3.0	7.2
Cobre	4.5	7.5
Bronce	5.5	6.0

2.2 Equipos y herramientas de fundición

Los equipos y herramientas de fundición variarán dependiendo del tipo de fundición y moldeo que se emplee. A continuación, se presentan de manera general los elementos más comunes utilizados dentro de los procesos de fundición.

Horno: El horno en el contexto de fundición es un dispositivo fundamental utilizado para elevar la temperatura de los metales a su punto de fusión con el propósito de llevar a cabo el proceso de colada. Este artefacto se caracteriza por su estructura refractaria capaz de soportar altas temperaturas, y su diseño contempla la eficiencia energética y la distribución homogénea del calor en su interior. La operación del horno involucra la aplicación de principios termodinámicos, donde la energía térmica es transferida al metal depositado previamente en un crisol, permitiendo su transición del estado sólido al líquido. Los hornos pueden variar en diseño y capacidad, pero comparten la función esencial de proporcionar las condiciones térmicas requeridas para la fundición de metales. Entre los principales tipos de hornos utilizados para procesos de fundición se encuentran: 1) cubilotes, 2) hornos de combustible directos, 3) crisoles, 4) hornos de arco eléctrico y 5) hornos de inducción [2].

- 1) **Cubilote:** Corresponde a un horno cilíndrico vertical equipado con un canal de paso cerca de su base. Este tipo de hornos se utiliza exclusivamente para hierros colados. Debido a su gran tamaño, en este tipo de horno se pueden producir varias toneladas de material fundido.

La estructura consiste en un cascarón de lámina de hierro recubierto internamente con material refractario. La carga del horno consiste una mezcla de primera fundición (arrabio) y chatarra de hierro. El combustible que se utiliza es el coque, y se induce aire forzado para generar la combustión. El fundente es un compuesto básico como la caliza, que reacciona con la ceniza del coque y otras impurezas formando escoria. La escoria separa el metal fundido del ambiente, evitando así que el metal reaccione con el medio y reduciendo la pérdida de calor. En la figura 2-8 se presenta un esquema de un horno de cubilote con sus componentes y características de operación.

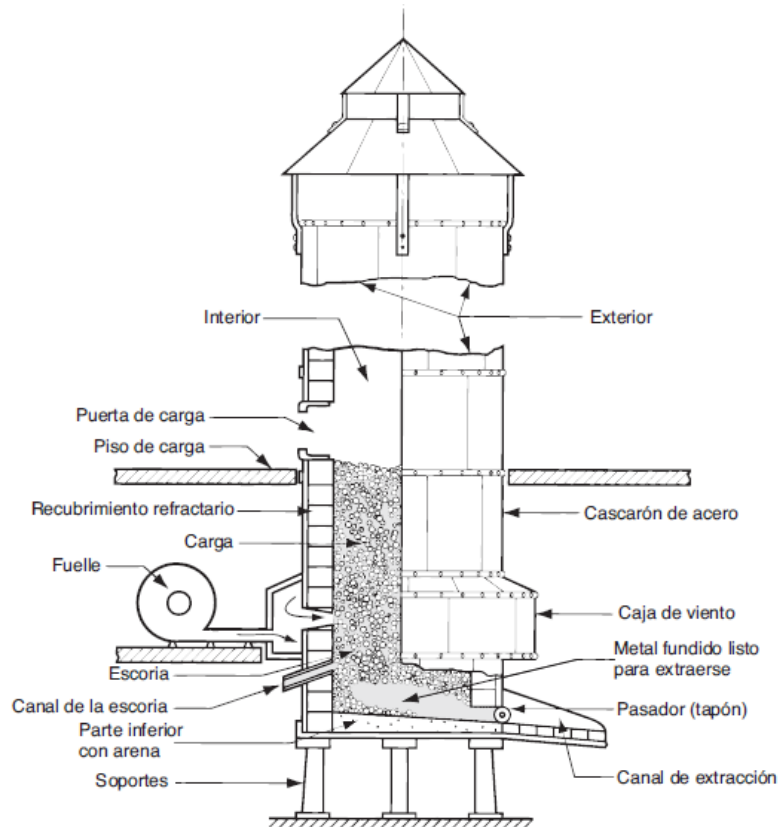


Figura 2-8 Horno de cubilote común y sus componentes [2].

- 2) **Horno de combustible directo:** Un horno de combustible directo tiene un “hogar” pequeño, en el cual se calienta la carga del metal por medio de quemadores de combustibles ubicados en sus lados. El techo del horno refleja la llama contra la carga. El combustible más común es el gas natural y los productos de combustión salen a través de un cañón. En la parte inferior del hogar hay un agujero a través del cual se extrae el material fundido. Este tipo de horno suele ser utilizado para fundir metales y aleaciones no ferrosas.
- 3) **Horno de crisol:** En los hornos de crisol, el material se funde sin que éste tenga contacto directo con el combustible. Por esta razón también se los llama hornos de combustión indirecta. Se utilizan tres tipos de horno de crisol: a) crisol móvil, b) crisol estacionario y c) crisol de volteo. Los tres tipos de horno de crisol se ilustran en la figura 2-9. Los combustibles para los hornos de crisol son petróleo, gas y carbón pulverizado. En los

hornos de crisol móvil una vez derretido el metal, se extrae el recipiente del interior y se vierte con el mismo; en los de crisol estacionario el material fundido se extrae con un cucharón; y en el crisol de volteo se vuelca el conjunto completo del horno para extraer el material fundido.

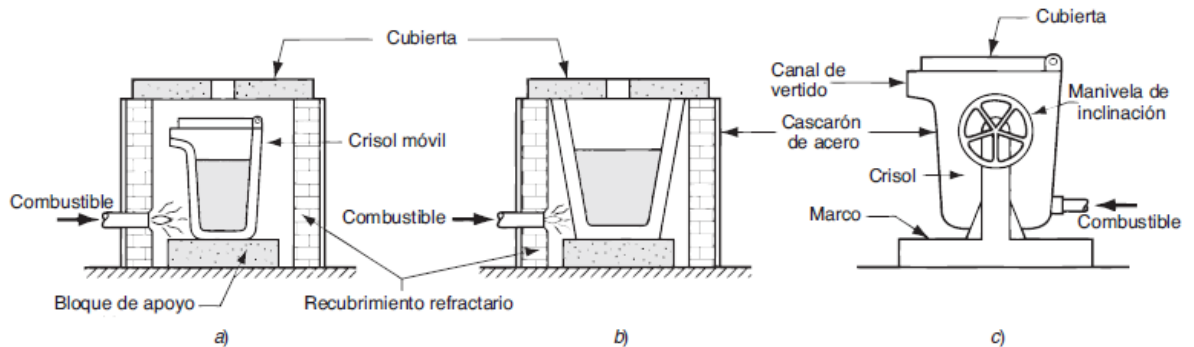


Figura 2-9 Hornos de crisol: a) crisol móvil, b) crisol estacionario y c) crisol de volteo [2].

- 4) **Horno de arco eléctrico:** En estos hornos el metal se funde debido al calor generado por un arco eléctrico. El consumo de energía es alto, pero tienen gran capacidad de fundición (23000 a 45000 kg/h) y principalmente se utilizan para fundiciones de hierro.
- 5) **Horno de inducción:** Estos hornos emplean corriente alterna, que pasa a través de una bobina, desarrollando así un campo magnético en el metal. La corriente inducida que resulta del campo magnético genera un calentamiento rápido del metal. Como el metal no entra en contacto directo con los elementos calientes, el ambiente se puede controlar cómodamente. Como resultado se pueden obtener fundiciones de alta calidad y pureza. Los hornos de inducción se pueden utilizar para casi cualquier tipo de aleación. En la figura 2-10 se representa un horno de inducción.

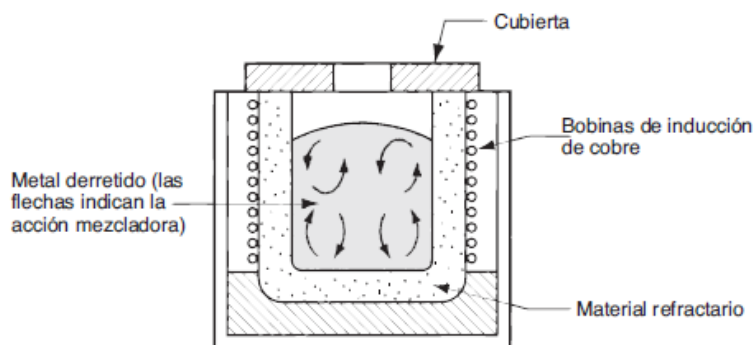


Figura 2-10 Horno de inducción [2].

Sistema de extracción gases: El sistema de extracción de gases constituye un componente fundamental para la gestión de emisiones gaseosas y vapores durante los procesos de fusión. Este no sólo garantiza la seguridad del entorno de trabajo al controlar la dispersión de contaminantes, sino que también contribuye a cumplir con regulaciones ambientales. La eficacia del sistema de extracción se vincula con su diseño aerodinámico y la capacidad de sus sistemas de filtración.

Crisol: Corresponde a un recipiente refractario diseñado para contener el metal en estado líquido durante el proceso de colada. Fabricado comúnmente con materiales cerámicos resistentes a altas temperaturas como el grafito. El crisol juega un papel crucial en garantizar la integridad del metal fundido, evitando la contaminación y facilitando su manipulación. Su elección se basa en consideraciones como la temperatura de fusión del metal y la compatibilidad con el sistema de colada empleado.

Cajón de arena (Perímetro de Seguridad): El cajón de arena es utilizado como perímetro de seguridad en operaciones de fundición, consiste en una barrera física compuesta de material arenoso que circunda el área de colada. Esta estructura desempeña un papel fundamental al mitigar riesgos asociados con salpicaduras de metal fundido y posibles derrames. Su composición de arena, al ser un medio refractario, proporciona un medio eficaz retener cualquier material fundido que pudiera escapar del área de colada, sin quemar zonas colindantes al derrame. Este dispositivo no sólo contribuye a salvaguardar la integridad física de los operarios, sino que también minimiza el riesgo de daños en las instalaciones.

Pala de escoria: La pala de escoria es una herramienta diseñada específicamente para la remoción de impurezas y escorias que se generan durante el proceso de fusión al interior del crisol. Es elaborada con materiales resistentes al calor. Esta herramienta presenta una superficie cóncava que facilita la recolección eficiente de los subproductos indeseados que flotan sobre el metal fundido. Su diseño ergonómico y robustez son esenciales para garantizar una operación efectiva y segura, contribuyendo así a la obtención de metal fundido libre de escoria.

Pinzas: Son herramientas manuales esenciales, diseñadas para manipular piezas metálicas calientes durante diversas etapas del proceso. Son fabricadas con materiales resistentes a altas temperaturas. Las pinzas facilitan la manipulación precisa y segura de objetos metálicos calientes, evitando el contacto directo con superficies abrasadoras. Estas herramientas son fundamentales para garantizar la seguridad del operario y la correcta manipulación de elementos en el entorno de trabajo.

Pala: Se emplea en la movilización y distribución de arena en el área de trabajo y para la manipulación y vertido de la arena utilizada en la creación de moldes.

Limas: Las limas son herramientas de acabado utilizadas para refinar la geometría y superficie de las piezas fundidas. Son fabricadas con materiales de alta dureza, estas herramientas permiten la remoción de rebabas, ajuste de dimensiones y perfeccionamiento de detalles en las piezas fundidas. Su diversidad de formas y granulometrías, consigue que sea un instrumento versátil. La selección adecuada de la lima depende de los requisitos específicos de acabado requeridos.

Soplete: El soplete es una herramienta que utiliza la combustión de gases para generar una llama de alta temperatura. Esta herramienta es esencial para tareas como el precalentamiento de moldes y el calentamiento localizado de áreas específicas durante el proceso de fundición.

Cubeta de Agua: La cubeta de agua dentro del proceso de fundición es un recipiente esencial utilizado para enfriar las piezas metálicas recientemente solidificadas o herramientas calientes. Esta debe ser colocada estratégicamente en el área de trabajo para evitar tropiezos y facilitar su uso.

2.3 Fundición en arena

La fundición en arena una de las técnicas de fundición más antiguas, y que a día de hoy sigue siendo ampliamente utilizada en la industria metalúrgica. Este proceso consiste en la elaboración de

moldes temporales de arena, en los cuales se imprime en forma de vaciado la geometría de la pieza a fabricar, para posteriormente verter en este vaciado metal fundido. Una vez transcurrido el tiempo de solidificación del metal, el molde se desmonta y se extrae la pieza. La arena debido a la presencia de SiO_2 cuenta con propiedades refractarias, que permiten trabajar con aleaciones de aluminio, bronce o incluso acero, níquel y titanio [5].

2.3.1 Modelo para fundición en arena

Un modelo para fundición en arena marca el patrón de la pieza a fabricar. Éste puede elaborarse de diversas formas, por ejemplo: diseño e impresión 3d, mecanizado, esculpido manual, entre otros. Al momento de elaborar un modelo para fundición en arena se deben tener en cuenta una serie de consideraciones [6]. En la figura 2-11 se representan los modelos para fundición en arena: a) modelo sólido, b) modelo dividido, c) modelo de placas ajustadas, d) modelo de placas divididas

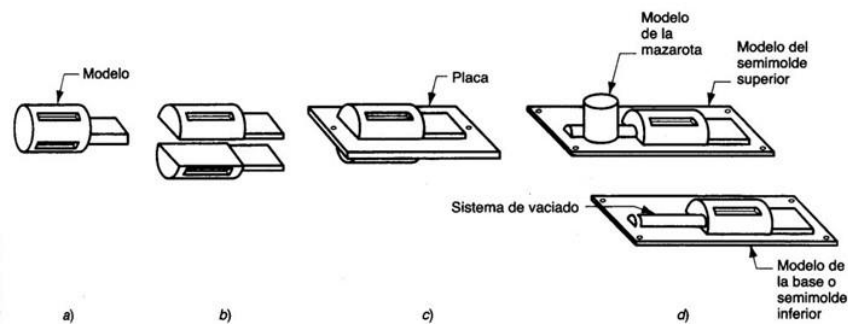


Figura 2-11 Modelos para fundición en arena [5].

Las consideraciones al momento de diseñar un modelo para fundición en arena son:

- **Exactitud dimensional:** El modelo debe considerar las dimensiones de la pieza deseada, para ello es fundamental tener en cuenta el grado de contracción al solidificar del metal usado.
- **Plano divisor:** Los modelos para fundición en arena deben contar con un plano divisor, el cual divide el modelo en una mitad hembra y una mitad macho. Dicho plano se alineará con el plano divisor de las cajas de moldeo durante la elaboración del molde.
- **Superficies suaves y detalles claros:** Se debe considerar la calidad superficial del modelo, la que debe ser lisa y sin irregularidades donde pueda quedar arena atrapada. Es necesario realizar un procedimiento de acabado en el modelo. Por ejemplo, en el caso de modelos creados mediante impresión 3d o tallados en madera, se debe enmasillar y lijar la superficie para eliminar las irregularidades producidas durante la impresión o vetas de madera.
- **Ángulos de desmolde:** Es fundamental considerar ángulos de desmolde en el modelo para que, al momento de extraerlo del molde, se consiga una extracción suave y se evite el desmoronamiento de la arena. Por norma general se recomienda un ángulo de 1° a 3° paralelo al sentido de extracción.

- **Evitar espesores muy finos:** Para evitar concentraciones de esfuerzos durante la solidificación, se recomienda que idealmente las secciones dentro del modelo sean constantes. En el caso de incluir nervios, estos deben tener aproximadamente el 80% del espesor de pared principal.
- **Evitar aristas y ángulos rectos:** Se recomienda que todos los ángulos del modelo sean redondeados con el fin de evitar concentraciones de esfuerzos y rechupes durante la solidificación de la pieza.
- **Resistencia y durabilidad:** El modelo debe ser rodeado de arena, la cual posteriormente se compactará. Esto genera esfuerzos sobre el modelo, razón por la cual se debe considerar la resistencia que tendrá el modelo, y como esto afectará su durabilidad y cantidad de usos.

2.3.2 Cajas de moldeo

Las cajas de moldeo (figura 2-12), son un elemento fundamental para la fundición en arena, su función principal es ser la estructura que contiene la arena, permitiendo su compactación durante la elaboración del molde. Las cajas de moldeo cuentan con la característica de ser desmontables en dos mitades, lo cual permite tanto el montaje, como la extracción del modelo. Generalmente están fabricadas con madera, acero o plástico reforzado, y es importante que tengan la resistencia suficiente para soportar la presión de la arena compactada.

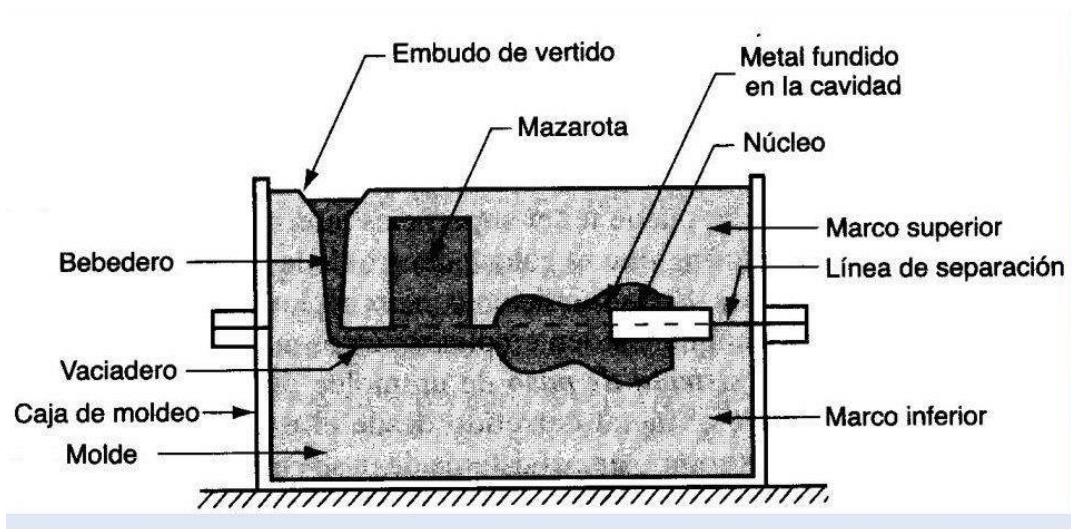


Figura 2-12 Vista en corte de caja de moldeo [5]

Los principales elementos para un molde de arena son:

- **Bebederos:** Un molde puede tener uno o más bebederos. La función de estos es ser la entrada para el metal fundido, es decir, el canal de alimentación del molde. A menudo se realiza un cono o embudo de vertido para facilitar el ingreso de la colada.
- **Mazarota:** Es una cavidad ubicada a una determinada altura sobre la pieza, cumple la función de alimentar la pieza de forma constante, a modo de evitar llenado incompleto o rechupes.
- **Vaciadero:** Canal ubicado justo bajo el bebedero, su función es absorber las turbulencias que se producen producto del flujo de metal fundido.
- **Macho (núcleo):** También llamado corazón, es un cuerpo de arena el cual se utiliza para generar un vaciado interno en las piezas fundidas, por ejemplo, el diámetro interno en codos y tuberías.
- **Línea de separación:** Es la línea que se origina en el plano divisor de las cajas de moldeo, la idea de que la caja sea desmontable en este plano es permitir la extracción del modelo.
- **Respiraderos:** Canales que conectan el interior del molde con el exterior, permitiendo la salida de los gases.
- **Cavidad:** Corresponde al espacio vacío que ocupará el material fundido una vez ingresado al molde, la geometría de la cavidad da origen a la pieza fundida.

2.3.3 Pasos del proceso de moldeo en arena (método tradicional de arena verde)

El método de moldeo en arena verde es el más difundido y utilizado para la fundición en arena. Para ser llevado a cabo se realizan una serie de pasos, estos son representados en la figura 2-13.

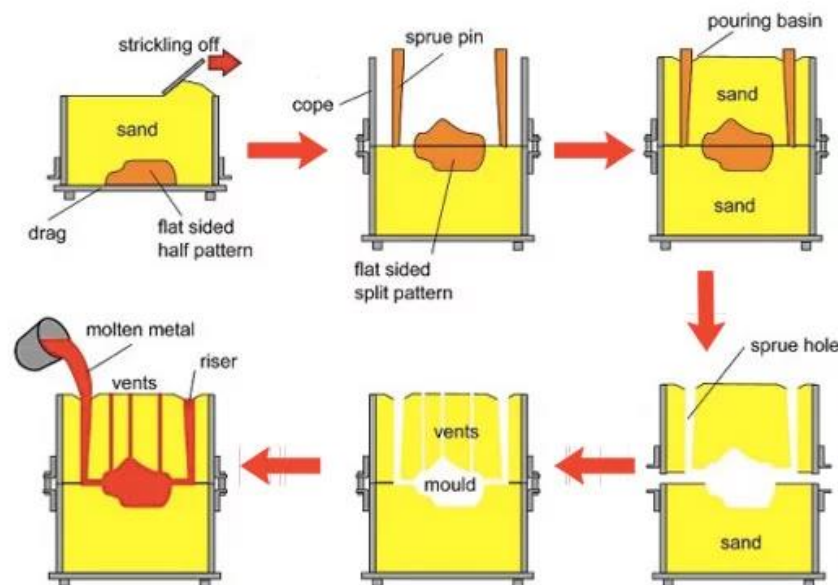


Figura 2-13 Esquema proceso de moldeo en arena verde [1].

Paso 1: Preparación de la arena

Se selecciona la arena a usar, y se mezcla con el elemento aglutinante (arcilla). Usualmente la mezcla consiste en 90% arena, 7% arcilla (generalmente bentonita) y 3% agua. Posteriormente, se revuelve hasta que quede una mezcla homogénea y con la consistencia adecuada para moldear.

Paso 2: Preparación del modelo:

Se selecciona el modelo deseado y se recubre su superficie con lubricante. Por lo general se utiliza grafito en polvo.

Paso 3: Mitad inferior del molde

Se vuelca la mitad inferior (mitad hembra) boca abajo y se coloca la mitad hembra del modelo en el centro de la caja. Después, se recubre el modelo por completo con arena tamizada (arena de contacto) y finalmente, la caja se rellena con arena sin tamizar (arena de relleno) apisonando en capas hasta completar la capacidad de la caja. Una vez se llena hasta el tope se pasa una regleta para emparejar la arena de la superficie.

Paso 4: Mitad superior del molde:

Se vuelca nuevamente la caja inferior a la posición original y se encaja la mitad superior. Se encaja el modelo macho al modelo hembra y se espolvorea talco o arena seca para evitar que se junte la arena compactada de ambas mitades. Posteriormente se fijan los bebederos, donde uno servirá como canal de alimentación, y otro como canal de salida. Una vez hecho esto, se rellena la caja con arena repitiendo el mismo procedimiento del paso 3.

Paso 5: Desmolde del modelo

Se quitan los bebederos rotándolos poco a poco, mientras se extraen con cuidado. Luego se separan ambas mitades, dejando las mitades del modelo orientado hacia arriba. En ambos casos para extraer el modelo, éste debe vibrarse en todas las direcciones (vertical y horizontalmente) y posteriormente cuando este suelto se debe extraer cuidadosamente. Esto se puede realizar manualmente o apoyándose de pinzas. Una vez extraído el modelo, se debe perforar la arena con palillos unas cuantas veces con la intención de tener mejor ventilación en el molde para la salida de gases de fundición.

Paso 6: Detallado del molde

Una vez extraído el molde, se debe subsanar la superficie la cavidad en caso de que se haya desmoronado parte de la arena. Para ello se hace uso de lancetas metálicas y cucharillas pequeñas humedecidas con agua. Después se deben soplar los granos arena suelta que queden en la cavidad.

Paso 7: Calentamiento de molde

Haciendo uso de un soplete, se debe calentar durante un tiempo toda la superficie que entrará en contacto con la colada. Esto se hace con el objetivo de que se elimine la humedad de la arena y precalentar el molde de forma previa al contacto con el metal fundido para evitar choque térmico y retardar un poco el proceso de solidificación, para asegurar el llenado completo de la cavidad.

Paso 8: Cierre del molde y colado

Se debe cerrar el molde y vaciar el metal fundido en el bebedero de alimentación. Se debe verter material hasta que se asome colada por el bebedero de salida, lo cual indicará que el molde se rellenó por completo.

Paso 9: Extracción de la pieza

Terminado el paso 8 se debe esperar un tiempo que permita que el metal solidifique y enfríe. Transcurrido este tiempo se debe desmoldar y extraer la pieza, es importante tener precaución debido a que esta puede seguir caliente por lo que se recomienda manipularla con pinzas.

Paso 10: Acabado

Se deben contar los bebederos de la pieza con cierra y de ser necesario se puede limar la pieza para darle un mejor acabado. Dependiendo del nivel de acabado deseado se podría incluso requerir de un proceso posterior de mecanizado

2.3.4 Tipos de moldeo en arena

Moldeo en arena verde:

El moldeo en arena verde es el método más común para moldeo en arena, este es caracterizado por el uso de una mezcla de arena y aglutinante, el cual se activa en estado húmedo. La arena verde, compuesta principalmente de arena de sílice y arcilla, actúa como material de moldeo flexible que adopta la forma del modelo o patrón de la pieza que se va a fundir. Por otro lado, el aglutinante, generalmente bentonita, proporciona cohesión y plasticidad a la mezcla de arena [7].

En este proceso se hace uso de una caja de moldeo en la cual se inserta el modelo de la pieza deseada y posteriormente se le recubre con arena, la cual se compacta alrededor adoptando así la forma del patrón. Durante este proceso se crean también los sistemas de alimentación que utilizará la pieza. Una vez teniendo el total de la arena compactada se extraen los machos de bebedero y se separan ambas mitades de las cajas para extraer cuidadosamente el modelo, luego se vuelven a encajar ambas partes de la caja dejando así el molde listo para el proceso de colada. Este proceso se explica con mayor detalle en el apartado anterior (2.3.3).

Moldeo en Arena Seca:

A diferencia del moldeo en arena verde, el moldeo en arena seca implica el uso de arena premezclada con un aglutinante en estado seco, como resinas fenólicas o urea-formaldehído. Este enfoque elimina la necesidad de esperar que la arena seque después de la compactación, acelerando el proceso de producción. El procedimiento es similar al moldeo en arena verde en términos de creación de la cavidad y el vertido de metal fundido [8].

Moldeo en Cáscara (Shell Molding):

El moldeo en cáscara (figura 2-14), es una técnica que combina características de procesos del moldeo en arena húmeda y en arena seca. En este método se utiliza una mezcla de arena y resinas fenólicas, las cuales se endurecen al exponerse a temperaturas de entre 200 y 300°C. Dentro del proceso, se coloca la mezcla en un molde caliente (calentado aproximadamente a unos 250°C), creando una capa delgada y dura alrededor del modelo. La resina se cura, formando una "cáscara" resistente. Después, el molde se enfría y se retira el modelo. La cáscara resultante se coloca en una caja de moldeo y se vierte el metal fundido, creando así la pieza deseada [8]. Este proceso permite tener piezas delgadas y complejas de alta calidad superficial que no requieren mecanizado y está enfocado para producciones a gran escala debido a sus altos costos de implementación [7].

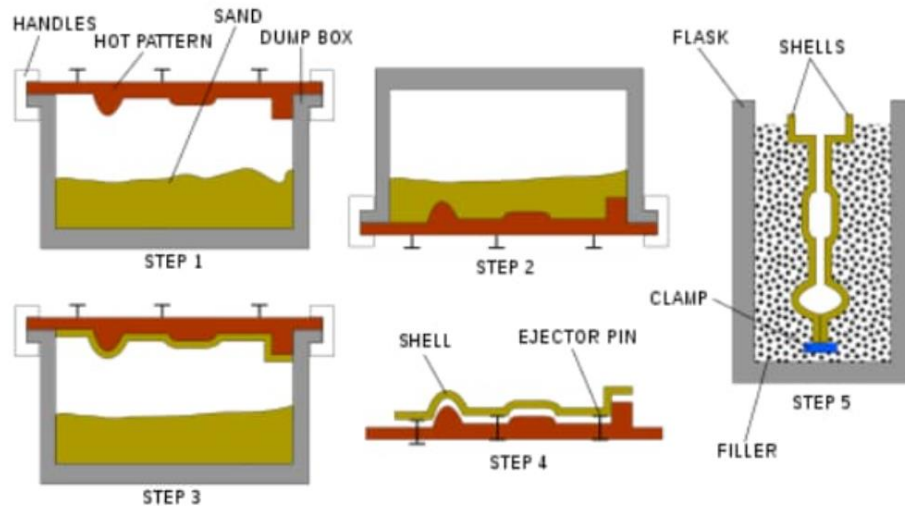


Figura 2-14 Proceso de moldeo de cáscara.[17]

Moldeo Silicato-CO₂:

El moldeo silicato-CO₂ es un método de moldeo en arena que utiliza una mezcla de arena de sílice y silicato sódico como aglutinante. En este proceso, la arena mezclada se coloca en un molde y se agrega dióxido de carbono (CO₂) a través de chorros. La reacción química entre el CO₂ y el silicato sódico forma un aglutinante endurecido, proporcionando cohesión a la arena. Este método es conocido por su rápido fraguado y bajo contenido de humedad, lo que permite ciclos de producción más cortos en comparación con el moldeo en arena verde tradicional [8].

2.3.5 Tipos de arena

Dependiendo de la aplicación y características requeridas dentro del proceso de fundición en arena, se puede requerir de uno u otro tipo de arena. La tabla 2-2 presenta un resumen de la composición, características y usos de los principales tipos de arena utilizados.

Tabla 2-2 Resumen de tipo de arena sus características y usos [9].

Tipo de arena	Composición	Características	Usos comunes
Arena de sílice	Principalmente compuesta de sílice.	Resiste altas temperaturas (1700°C) y proporciona una buena superficie de moldeo.	Ampliamente utilizada debido a su disponibilidad y capacidad para resistir altas temperaturas. Ideal para piezas de fundición de metales ferrosos y no ferrosos.
Arena de Cromita	Contiene cromita molida, un mineral de cromo y hierro.	Buena resistencia a las temperaturas (1450-1850°C), la cual disminuye al aumentar las impurezas del fundido.	Se emplea en arenas de revestimiento para moldes de piezas grandes de acero.
Arena de Zirconio	Silicato de zirconio, de densidad elevada.	Alta resistencia a temperaturas extremas (punto de fusión mayor a 2400°C), tiene alta conductividad térmica y no se adhiere a las superficies. Su costo es más elevado que las otras arenas.	En fundiciones que requieren alta resistencia térmica. Se utiliza como arena de revestimiento y para machos.
Arena de magnetita	Arena compuesta por carbonato de calcio, hierro, cuarzo, entre otros	No reacciona con óxidos mangánicos, tras ser tostada presenta una temperatura de fusión de 2800°C.	Se emplea en la preparación de arenas de revestimiento para acero.
Arena de Sílice Olivina (OSA)	Silicato de magnesio	Combina la resistencia térmica de la arena de olivino con la disponibilidad y la facilidad de manejo de la arena de sílice, presenta un poder refractario de entre 1750 y 1830 °C.	En aplicaciones que requieren estabilidad térmica y una mezcla equilibrada de propiedades. Útil en la producción de piezas de acero mangánico.

2.3.6 Granulometría de arena

Dentro de las variables importantes para la fundición en arena se encuentra el tamaño de grano, para hablar de granulometría en arena es necesario entender los siguientes conceptos [4]:

- Granulometría: Se clasifica en base al tamaño de las aberturas de los tamices utilizados en el análisis granulométrico.
- Compactibilidad: Se refiere a la capacidad de la arena para mantener su forma cuando se compacta alrededor del modelo.
- Precisión: Se refiere a la capacidad de reproducir las características del modelo o patrón de la pieza.
- Ventilación: Se trata del grado de flujo de aire que pueda pasar a través de los granos de arena, mientras más grande sea el tamaño de grano, mayor será la ventilación y viceversa

En la tabla 2-3 se presenta una comparativa entre los tamaños de grano en la arena de moldeo y como estos influyen en las características de la arena y su uso.

Tabla 2-3 Tabla comparativa de tamaños de grano para arenas de fundición [9].

Tamaño de grano	Dimensiones (mm)	Características	Usos
Gruesa	0.5-2	-Granos visibles a simple vista. -Baja compactibilidad -Superficie rugosa -Baja precisión. -Alta ventilación	Piezas grandes y de baja precisión.
Media	0.25-0.5	-Tamaño intermedio entre grano grueso y fino. -Buena compactibilidad. - Versátil. - Precisión aceptable -Ventilación media	Piezas medianas y versatilidad en aplicaciones
Fina	0.1-0.25	- Grano pequeño y homogéneo. - Alta compactibilidad - Superficie más lisa. - Mayor precisión. -Baja ventilación	Piezas pequeñas y alta precisión.
Muy fina	< 0.1	- Grano muy pequeño, casi polvo. - Excelente compactibilidad. - Superficie muy lisa. - Máxima precisión -Casi nula ventilación	Detalles finos y acabado superficial excepcional.

Es importante tener en cuenta que las dimensiones señaladas en la tabla anterior sólo son referenciales y pueden variar según normativas o estándares específicos.

2.4 Moldeo en yeso

El moldeo en yeso sustituye la mezcla de arena verde con una lechada de yeso, debido a la baja porosidad del material se limita el uso de esta técnica a metales no ferrosos de bajo punto de fusión. Además, el yeso tiende a degradarse a altas temperaturas. Las propiedades de resistencia del yeso pueden modificarse si se mezcla con otros elementos como talco, arena o cemento. Dentro de sus ventajas se encuentra una buena tolerancia dimensional ($\pm 0,25$ mm) y buen acabado superficial ($1,2-3,2 \mu\text{m}$). Entre sus limitaciones el trabajar únicamente con metales no ferrosos, masa máxima de 10 kg y una producción en serie baja [10]. En la imagen 2-15 se presenta un ejemplo de molde de yeso dividido.



Figura 2-15 Molde de yeso dividido [10].

2.5 Fundición a la cera perdida (o revestimiento)

La técnica de moldeo por cera perdida, es un proceso de fundición que ha sido ampliamente empleado en la fabricación de piezas metálicas complejas y de alta precisión. Este método se distingue por su capacidad para reproducir con fidelidad detalles finos y geometrías complejas.

El procedimiento comienza con la elaboración de un modelo de la pieza deseada utilizando cera. Este modelo de cera, denominado patrón, es sumergido en un material refractario denominado investidura, la cual adopta la geometría negativa del patrón.

Una vez que la investidura se ha endurecido, se genera un cascarón. Se procede a someter el conjunto a altas temperaturas para eliminar la cera contenida en el patrón. Este paso, denominado cocción o calcinación, genera un molde hueco que replica fielmente la forma de la pieza original. La cavidad del molde es entonces rellenada con metal fundido, permitiendo que este adopte la forma de la pieza deseada. Este proceso se representa de forma esquemática en la figura 2-16.

Posteriormente, tras el enfriamiento y solidificación del metal, se realiza la eliminación de la investidura, revelando la pieza de metal final. La técnica de moldeo por cera perdida destaca por su capacidad para reproducir detalles minuciosos y garantizar una alta precisión dimensional en las piezas fabricadas. Este proceso encuentra aplicaciones significativas en la industria aeroespacial, joyería y odontología, entre otros sectores, donde la exactitud y la complejidad geométrica son requisitos fundamentales [11].

Entre las ventajas del moldeo de cera perdida se encuentra [12].:

- Alta precisión dimensional ($\pm 0,1$ mm).
- Excelente acabado ($0,8-1,3\mu\text{m}$).
- Esta técnica permite la obtención de paredes delgadas.

Entre sus desventajas están [12]:

- Leve tendencia a generar porosidades internas
- El molde se deteriora a altas temperaturas.
- Cada molde permite un único uso.
- Dependiendo del material refractario utilizado se pueden utilizar diversas aleaciones metálicas.

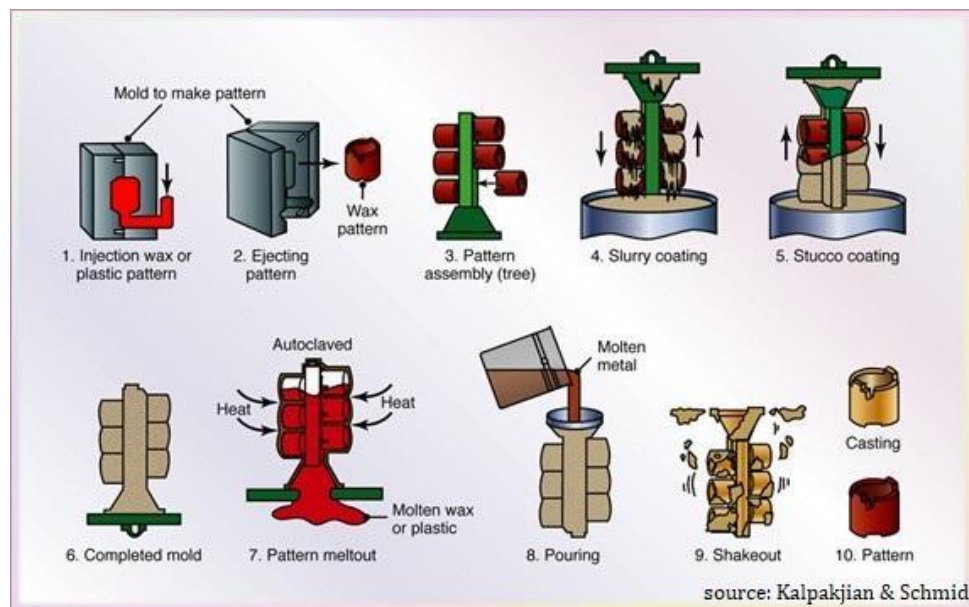


Figura 2-16 Representación esquemática del proceso de fundición de cera perdida [11].

2.6 Técnica de PLA perdido

La técnica de moldeo mediante PLA (ácido poliláctico) perdido es muy similar la técnica de cera perdida, con la única diferencia de que el modelo de la pieza a fabricar se elabora mediante diseño e impresión 3D en PLA.

Una vez que se tiene el modelo impreso en 3D de la pieza a fundir, éste debe ser recubierto con un material refractario como yeso o resina cerámica. Cuando este material refractario se endurece, se debe llevar el molde a elevadas temperaturas dentro de un horno. Como resultado, el PLA se degrada dejando un vaciado con el negativo del modelo de la pieza deseada. Posteriormente, el molde es llenado de metal fundido y se deja enfriar hasta que el metal solidifique. Cuando el metal ya se encuentra solidificado, se debe eliminar la investidura para extraer la pieza. Entre las características esta técnica se encuentra la gran calidad de detalle y precisión dimensional y la gran flexibilidad de diseño que permite [13]. Es importante tener en cuenta una serie de consideraciones al momento de diseñar el modelo 3D como los ángulos que este presenta, los canales de alimentación que utilizará, y el porcentaje de contracción del material que se está trabajando. En el caso del aluminio es alrededor de un 7% (contracción volumétrica por solidificación). En la figura 2-17 se presenta la comparativa entre el modelo impreso en 3D y la pieza acabada post fundición.



Figura 2-17 Comparativa modelo maestro de impresión 3D y pieza final [11].

Las capacidades y características de esta técnica de fundición son casi iguales a las presentadas en el moldeo de cera perdida, siendo la única diferencia la forma de elaborar el modelo. Al trabajar con manufactura aditiva en impresión 3D, se logra elaborar geometrías de modelo más complejas y precisas que en los modelos de cera. Como desventaja, la elaboración de modelos es más lenta debido al tiempo de impresión que suele rondar las 10 horas o más (este tiempo dependerá de la geometría y tamaño deseado en el modelo).

2.7 Fundiciones de molde permanente

La fundición en moldes permanentes suele utilizar un molde metálico en dos secciones, diseñadas para obtener apertura y cierre. Normalmente estas secciones se hacen en hierro fundido. La cavidad cuenta con un sistema de paso incluido, que se elabora mediante mecanizado para dar un buen dimensionamiento y acabado superficial. Se puede fundir aluminio, magnesio, aleaciones a base de cobre, y hierro colado. Este último requiere una temperatura de vertido elevada (de 1250°C a 1500°C), esto tiene un efecto considerable en la vida del molde, razón por la cual para fundiciones de acero se utilizan materiales refractarios [2].

En la fundición con molde permanente se tienen múltiples etapas, las cuales se representan en la figura 2-18. Inicialmente se precalienta el molde y se rocía uno o más recubrimientos sobre este (1), el recubrimiento ayuda a disipar el calor y a la lubricación para la extracción del fundido. Posteriormente se insertan los núcleos (si se requiere y se cierra el molde (2), se vierte el metal fundido (3), se abre el molde (4) y se extrae la pieza terminada (5).

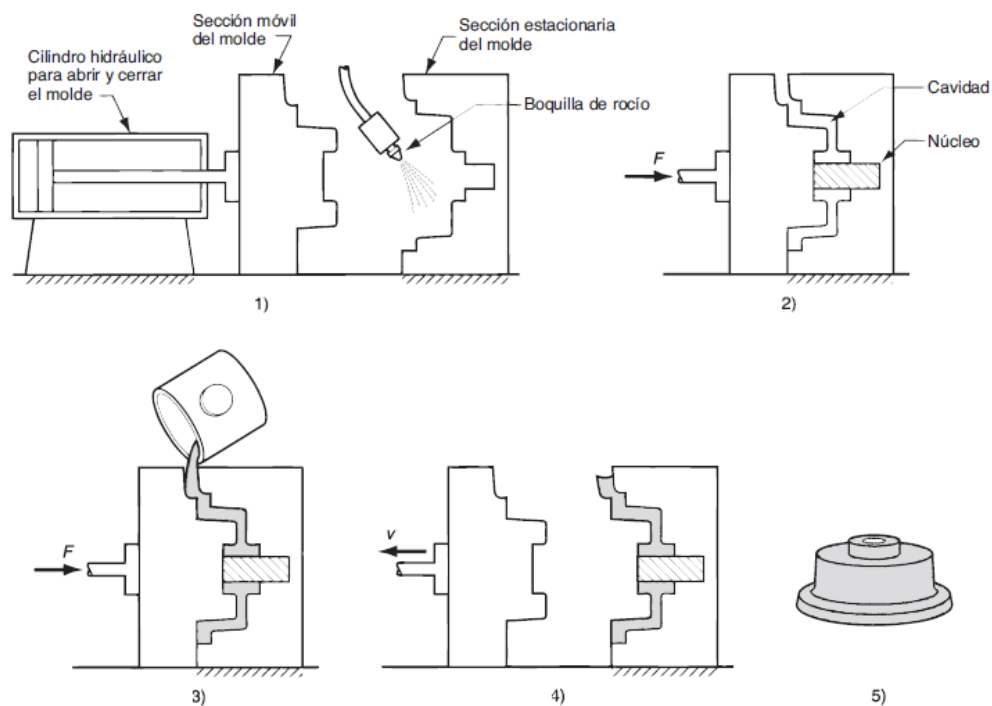


Figura 2-18 Etapas de fundido en moldes permanentes [2].

Entre las ventajas de los moldes permanentes se incluye su alta calidad de acabados superficiales y precisión dimensional, además la solidificación es más rápida ocasionando estructuras de grano más finas y produciendo fundidos más resistentes. Entre sus limitantes se encuentra la dificultad para trabajar aleaciones de altos puntos de fusión y el tamaño de piezas que se pueden fundir (pequeñas y medias). Debido a que el costo de producción de moldes permanentes es alto su uso se emplea en grandes producciones de secuencia automatizada.

2.7.1 Fundición de baja presión

En la fundición de baja presión el metal se fuerza a pasar por la cavidad a una presión de aproximadamente 0,1 MPa (15lb/in²), desde abajo. De esta forma, el flujo de metal es ascendente. La ventaja de este tipo de moldeo es que el metal fundido que ingresa lo hace sin entrar en contacto con el ambiente, razón por la cual se reducen los afectos de porosidad por gas y oxidación [2]. En la figura 2-19 se puede observar el diagrama del proceso de fundición de baja presión.

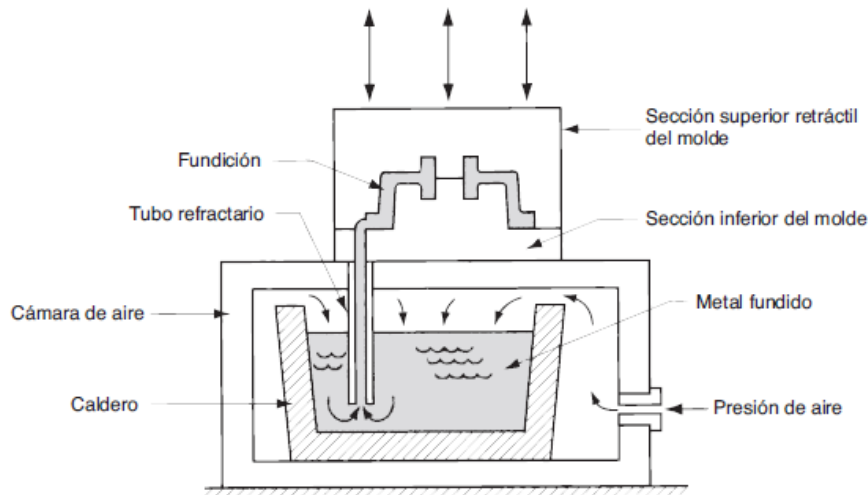


Figura 2-19 Diagrama de fundición a baja presión [2].

2.7.2 Fundición al vacío con molde permanente

Es una variación de la fundición a baja presión en la cual, en lugar de impulsar el metal fundido con presión de gas, se emplea el vacío para succionar el líquido hacia el interior de la cavidad. En relación con la fundición a baja presión se reduce la porosidad por el aire y mejora las propiedades mecánicas [2]. En la figura 2-20 se presenta un diagrama de este proceso.

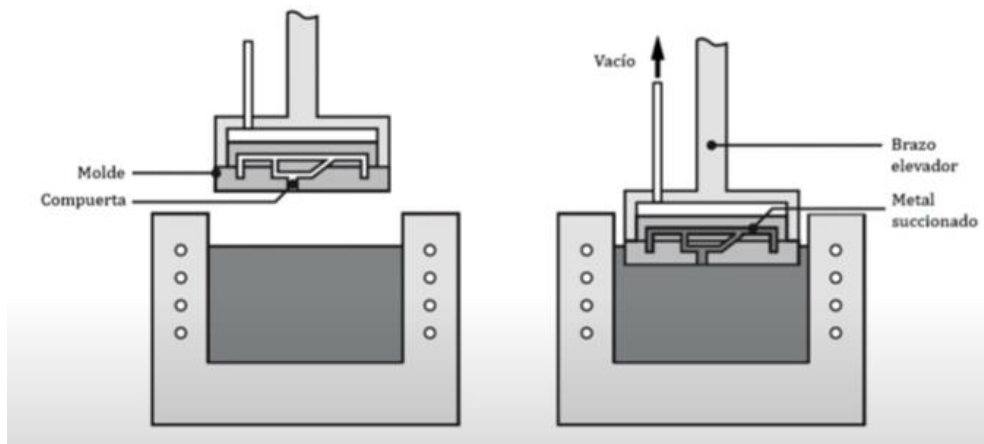


Figura 2-20 Diagrama de fundición al vacío [14].

2.7.3 Fundición con troquel

La fundición con troquel es un proceso en el cual se inyecta el metal fundido a una alta presión (7 a 350 MPa). La presión se mantiene durante la solidificación. Los moldes utilizados para la fundición por inyección reciben el nombre de troqueles y su principal característica es la capacidad de implementar una presión elevada para forzar el material fundido a pasar a través de la cavidad del molde. Existen dos tipos principales de fundición con troquel: 1) cámara fría y 2) cámara caliente [2].

- 1) Moldeo en cámara caliente: El metal se funde en un contenedor adosado a la máquina y se emplea un pistón para inyectar el líquido a presión dentro del molde, que comúnmente oscila entre los 7 a 35 MPa. El ciclo de fundición se presenta en la figura 2-21. En este tipo de moldes se alcanzan producciones de hasta 500 piezas por hora. El moldeo en cámara caliente se limita a metales de bajo punto de fusión como el zinc, estaño, plomo, entre otros.

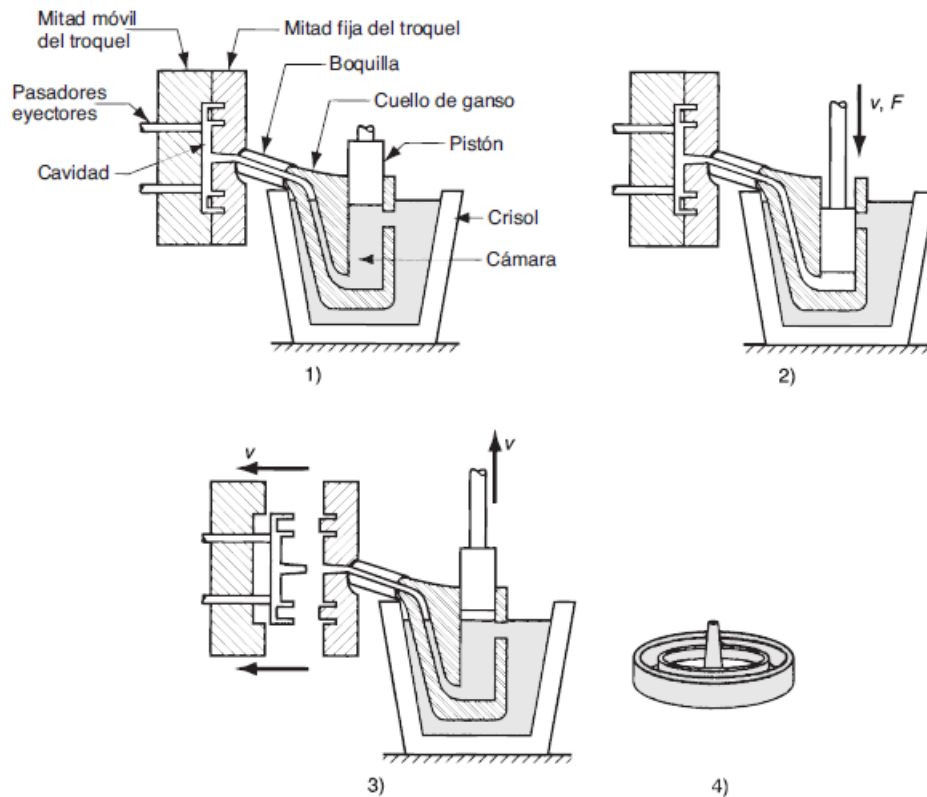


Figura 2-21 Moldeo en troquel en cámara caliente [2].

- 2) Moldeo en cámara fría: Se vierte el metal fundido hacia una cámara en frío desde un contenedor externo, y se emplea un pistón para inyectarlo al molde a alta presión. Las presiones para este método varían entre 14 a 14 MPa. En la figura 2-22 se puede ver el diagrama del proceso de fundición para moldeo de troquel en cámara fría. En contraste con el método de cámara en caliente, los ciclos no son tan rápidos debido a la necesidad de una

cuchara para verter el material líquido en la cámara. Las máquinas de cámara fría se utilizan principalmente para fundir aleaciones de bajo punto de fusión como aluminio, latón y magnesio.

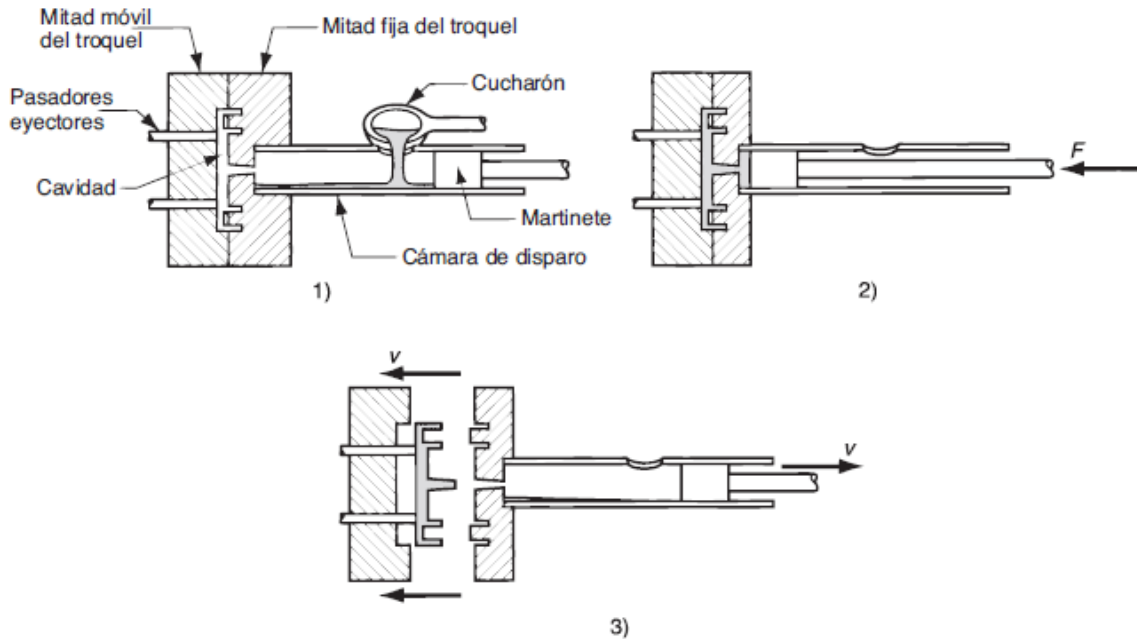


Figura 2-22 Moldeo en troquel en cámara fría [2].

En las ventajas de la fundición de inyección se encuentran [2]:

- 1) Tasas elevadas de producción
- 2) Económica en grandes producciones
- 3) Tolerancias del orden de $\pm 0,076$ mm para piezas pequeñas.
- 4) Buen acabado superficial.
- 5) Posibilidad de secciones delgadas debajo de 0,5 mm
- 6) El enfriamiento es rápido ofreciendo un tamaño de grano reducido y buenas propiedades mecánicas en las piezas obtenidas.

Como limitaciones se encuentra que la geometría del molde debe permitir la extracción de la pieza una vez solidificada.

2.7.4 Fundición centrífuga:

La fundición centrífuga es una técnica que aprovecha la fuerza centrífuga para distribuir el metal líquido en el molde. El molde se coloca en un dispositivo de rotación, y el metal se vierte mientras el molde gira rápidamente. Esta técnica se utiliza para piezas cilíndricas o de simetría circular, como ruedas, tubos y anillos [7]. La figura 2-23 brinda una representación gráfica el proceso en distintas variedades.

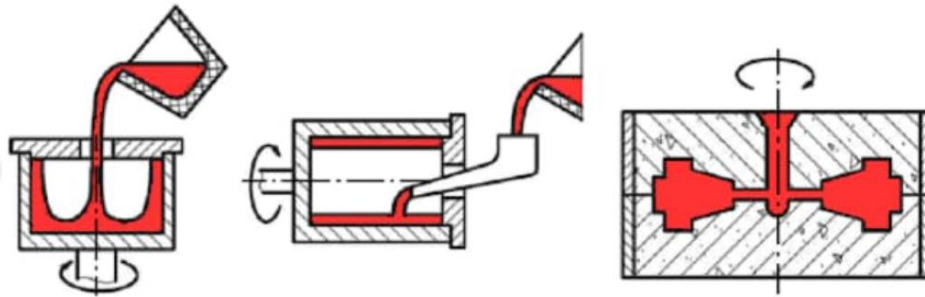


Figura 2-23 Representación fundición centrífuga [7].

El uso de la fuerza centrífuga ayuda a eliminar las impurezas y aumentar la densidad del material fundido, lo que resulta en piezas más homogéneas y de mayor calidad. Además, la fundición centrífuga puede mejorar la resistencia y la calidad superficial de las piezas fundidas, lo que la hace adecuada para aplicaciones que requieren componentes de alta resistencia y durabilidad. Normalmente el uso de este método se limita a metales no ferrosos.

2.8 Capacidades de los procesos de fundición.

2.8.1 Fundiciones de molde desechable

En la tabla 2-4 se muestra un resumen de las capacidades que tienen los distintos procesos de fundición para moldes desechables.

Tabla 2-4 Capacidades de los procesos de fundición en moldes desechables [10].

Técnica de fundición	Tipo de metales	Masa de fundición (kg)	Calidad superficial (μm)	Nivel de detalle geométrico	Tolerancia (\pm mm)	Producción
Arena verde	Todos	Más de 1000	12,5 -25	Bajo	1,5	Limitada
Moldeo en cáscara	Todos	< 10	6,3 - 12,5	Bueno	0,5	Adecuado para producción en serie
Moldeo en yeso	No ferrosos	< 10	1,2 - 3,2	Muy bueno	0,25	Limitada
Cera perdida	Todos	< 20	1,2 - 3,2	Muy bueno	0,1	Limitada
PLA perdido	Todos	< 20	1,2 - 3,2	Muy bueno	0,1	Limitada

2.8.2 Fundiciones de molde permanente

En la tabla 2-5 se enseña un resumen de las capacidades que tienen los distintos procesos de fundición para moldes permanentes.

Tabla 2-5 Capacidades de los procesos de fundición en moldes permanentes [14].

Técnica de fundición	Tipo de metales	Masa de fundición (kg)	Calidad superficial (μm)	Nivel de detalle geométrico	Tolerancia (\pm mm)	Producción
Moldeo de inyección	Aleaciones limitadas	< 15	0,8 – 1,6	Bueno	0,25	Ideal producción en serie
Moldeo de baja presión	Metales específicos	< 25	1,8 -6,3	Bueno	0,25	Limitada
Moldeo al vacío	Metales específicos	< 25	1,8 -6,3	Bueno	0,25	Limitada
Centrifuga	Aleaciones limitadas	< 100	12,5 - 25	Medio	0,5	Limitada

2.9 Defectos de fundición

Durante el proceso de fundición se pueden presentar una serie de defectos ocasionados por diversos factores. Para este apartado se consideran únicamente la tipología de defectos para fundición por gravedad [6].

2.9.1 Rechupes:

Los rechupes (figura 2-24) son hendiduras o depresiones en la superficie de la pieza que resultan de la contracción líquida y solidificación de los metales, generalmente cerca de la parte superior del molde. También se pueden formar al interior de la pieza en forma de cavidades

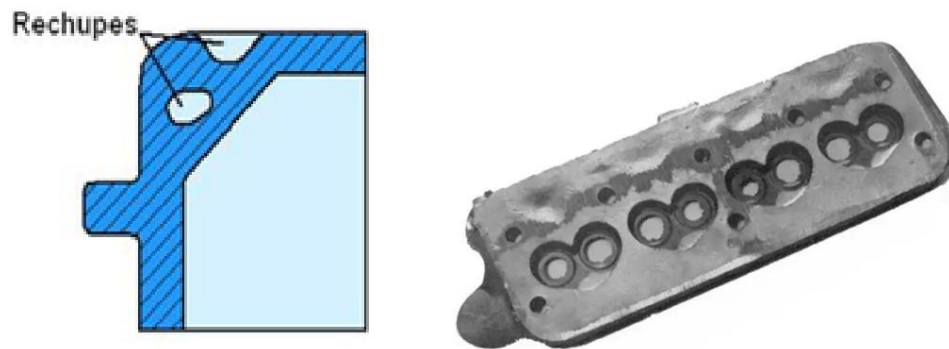


Figura 2-24 Defecto de rechupe [6] y [15].

Causas:

- Rápida solidificación del metal.
- Diseño inadecuado del sistema de alimentación de metal generando un enfriamiento desigual en las capas de la pieza.

Posibles Soluciones:

- Ajustar el diseño del sistema de alimentación para permitir un flujo de metal más suave manteniendo espesores constantes y evitando ángulos vivos.
- Modificar la composición del metal para mejorar su fluidez.
- Usar mazarotas en las zonas que podrían presentarse rechupes.

2.9.2 Tensiones residuales:

Esfuerzos internos que permanecen en la pieza después de la solidificación y pueden manifestarse posteriormente en el mecanizado o funcionamiento de la pieza generando roturas o grietas. Este defecto se representa en la figura 2-25 en la cual se puede observar una contracción irregular en la estructura de la pieza.

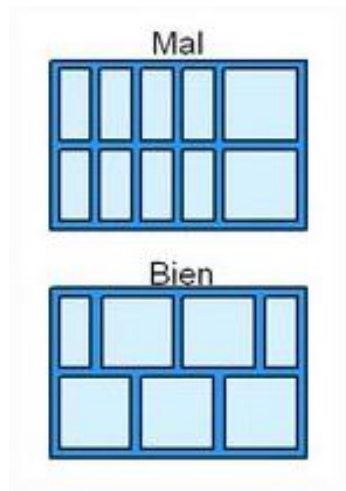


Figura 2-25 Defecto de tensiones residuales [6].

Causas:

- Contracción desigual durante la solidificación.
- Variaciones en la velocidad de enfriamiento en distintas zonas de la pieza.

Posibles Soluciones:

- Controlar la velocidad de enfriamiento (uso de enfriadores).
- Utilizar tratamientos térmicos posteriores para aliviar tensiones.
- Evitar ángulos vivos y redondear las superficies.
- Diseñar una estructura para la pieza que permita deformación elástica en distintas partes.

2.9.3 Inclusiones

Se tratan de partículas extrañas incrustadas en la pieza fundida. En la figura 3-26 se representa una imagen de microscopio donde se pueden observar las inclusiones de óxido de aluminio en una fundición.

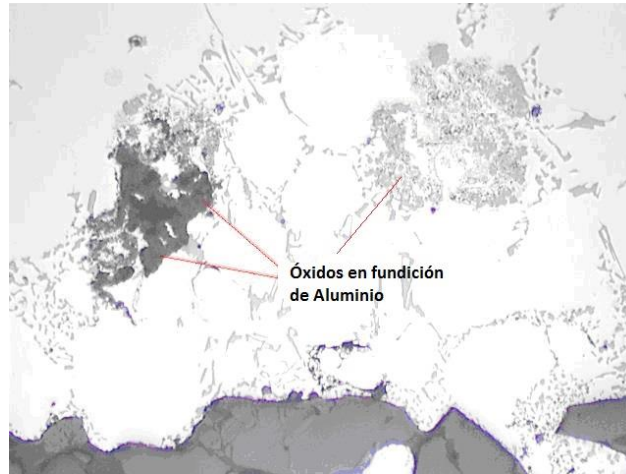


Figura 2-26 Defecto de inclusiones [6].

Causas:

- Pueden ser impurezas del metal como óxidos, silicatos o sulfuros.
- Desprendimiento de recubrimientos de moldes.

Posibles Soluciones:

- Utilizar materiales más limpios.
- Utilizar filtros.
- Asegurar el retiro de la escoria antes de la colada.

2.9.4 Llenado incompleto:

Áreas donde el metal no fluye completamente y se solidifica antes de llenar completamente la cavidad. Este defecto es observable en la figura 2-27, en la zona del eje.

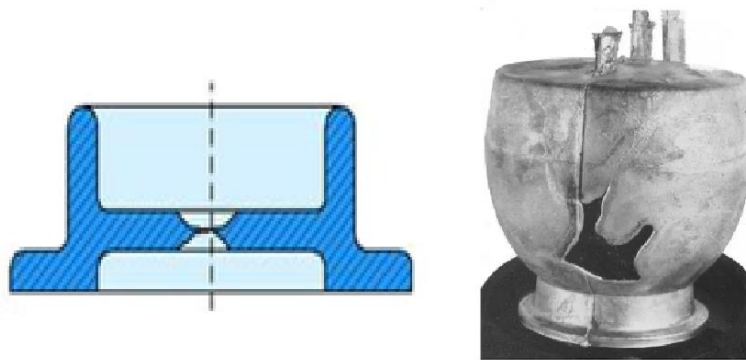


Figura 2-27 Defecto de llenado incompleto [6] y [15].

Causas:

- Baja temperatura de colado en el metal.
- Diseño inadecuado de la entrada de metal.

Posibles Soluciones:

- Ajustar la temperatura de colado.
- Rediseñar la entrada de metal.

2.9.5 Gotas Frías

Corresponden a partículas metalizas oxidadas y solidificadas de forma brusca. Presentan una alta dureza. Este defecto se puede observar en la figura 2-28.

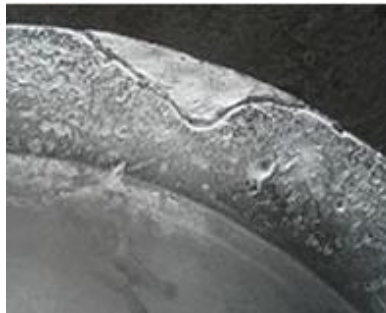


Figura 2-28 Defecto de gotas frías [6].

Causas:

- Salpicaduras producidas durante la colada que quedan atrapadas en la masa del metal.
- Diseño inadecuado del sistema de alimentación.

Posibles Soluciones:

- Optimizar el diseño del sistema de colada.
- Disminuir la altura de caída
- Asegurar un calentamiento uniforme del molde.

2.9.6 Porosidades o Sopladuras

Corresponden a agujeros o cavidades en la pieza debido a la presencia de gas. Este defecto se representa en la figura 2-29.

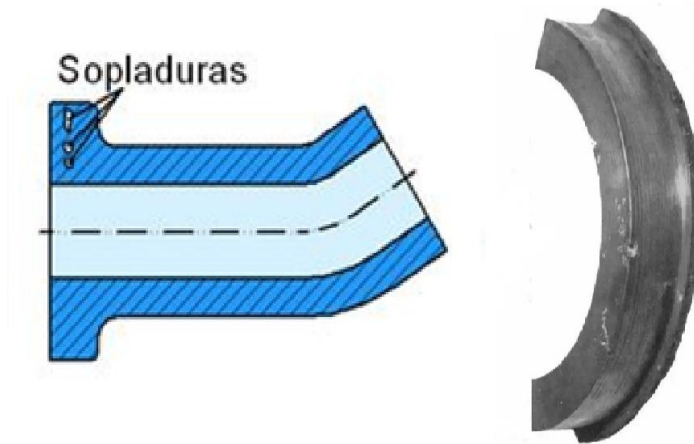


Figura 2-29 Defecto de sopladuras [6] y [15].

Causas:

- Liberación repentina de gas durante la solidificación.
- Gases provenientes de reacciones químicas de impurezas del molde
- Arena demasiado húmeda.

Posibles Soluciones:

- Emplear un diseño de molde que permita la libre evacuación de gases.
- Uso de arena de mayor grosor para relleno del molde.
- Dejar reposar el metal fundido previo a la colada para que este elimine gases, en caso de que se presenten.
- Asegurar la eliminación de impurezas en el molde.
- Realizar fusión y colada en vacío.

2.9.7 Rebabas:

Bordes sobresalientes de pequeño espesor no deseados en la pieza, suelen aparecer en zonas las zonas de contacto de las juntas del molde. Son representadas en la figura 2-30.



Figura 2-30 Defecto de rebabas [6].

Causas:

- Desgaste o grietas en el molde.
- Diseño inadecuado del sistema de alimentación.
- Mal ajuste en las uniones del molde.

Posibles Soluciones:

- Revisar estado del molde previamente a la colada.
- Ajustar la unión del molde (en caso de moldeo en arena).

2.9.8 Vitrificaciones:

Formación de una capa vítrea en la superficie de la pieza debido a altas temperaturas. Se puede observar un ejemplo de vitrificaciones en la figura 2-31.



Figura 2-31 Defecto de vitrificaciones [6].

Causas:

- Temperaturas de colada excesivamente altas, producen fusión de la arcilla o arena.

- Propiedades refractarias del molde insuficientes.

Posibles Soluciones:

- Controlar y ajustar las temperaturas de colada.
- Analizar la capacidad refractaria del molde.

2.9.9 Desplazamiento de Cajas:

Defecto de fundición en arena, consiste en un desfase no deseado de las cajas del molde durante la colada. Se representa en la figura 2-32.

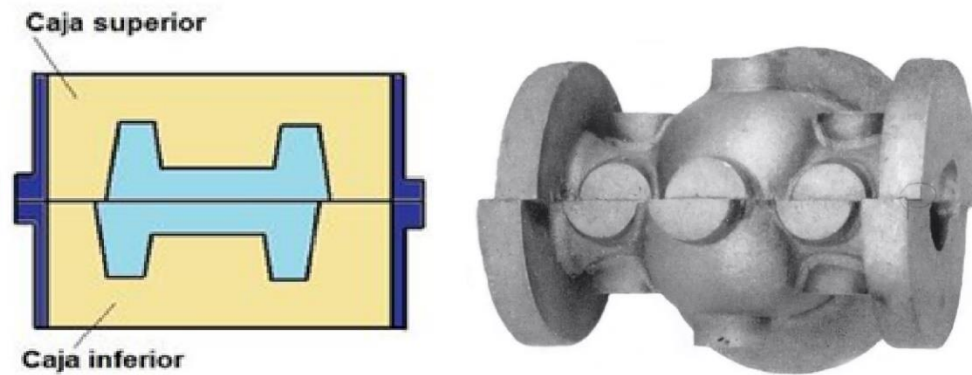


Figura 2-32 Defecto de desplazamiento de cajas [6] y [15].

Causas:

- Juego excesivo en las cajas de moldeo.
- Diseño inadecuado del sistema de sujeción.

Posibles Soluciones:

- Mejorar el diseño de las cajas de moldeo.
- Optimizar el diseño del sistema de sujeción.

2.9.10 Desplazamiento de Machos:

Defecto de fundición en arena, consiste en un desplazamiento de los machos (núcleos utilizados para crear huecos o formas internas) durante la colada. Se representa en la figura 2-33.

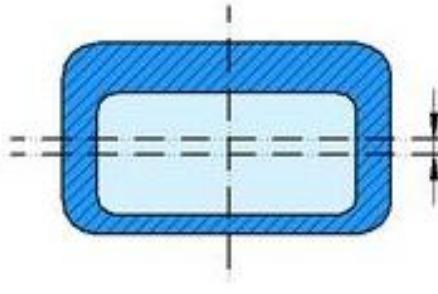


Figura 2-33 Defecto de desplazamiento de machos [6].

Causas:

- Mala fijación de los machos.
- Desplazamiento ocasionado por el empuje del metal.

Posibles Soluciones:

- Mejorar la fijación de los machos con apoyos adecuados.

Estos son sólo ejemplos generales, y las soluciones específicas pueden variar según la situación y la aplicación. Un control de calidad riguroso y la mejora continua de los procesos son esenciales para tratar y prevenir estos defectos en la fundición por gravedad.

3 Metodología de las actividades del laboratorio

3.1 Objetivos de experiencia académica de fundición

Para elaborar la metodología de las actividades académicas es primordial identificar los objetivos específicos 3 y 4 (señalados en apartado 1.3) que se desean alcanzar mediante la experiencia del laboratorio de fundición; estos son:

- Diseñar una experiencia de laboratorio que integre el diseño asistido por computadora de un modelo para elaboración de moldes y el proceso de fundición y mecanizado.
- Desarrollar las experiencias poniendo a punto los equipos y evaluando su funcionamiento en el curso MEC161 de la carrera Ingeniería Civil Mecánica de la USM

Además, es importante considerar como son los equipos, materiales e instalaciones que se disponen. Todo esto se describe con mayor detalle en el capítulo 4. También, cabe destacar que la metodología presentada en este capítulo es realizada posteriormente a las etapas de montaje y puesta en marcha descritas en el capítulo 6.

3.2 Diseño de la actividad

Con el fin de alcanzar los objetivos propuestos, se debe diseñar una actividad que integre el modelamiento CAD 3D dentro de los procesos de fundición y moldeo y el mecanizado posterior a la fundición. Es por esta razón que se selecciona la técnica de PLA perdido, y se solicita a los estudiantes la elaboración del diseño de un modelo de rin o llanta de automóvil. Esta elección se debe a que es una pieza que ofrece gran versatilidad para la elaboración de diseños variados y además exige un correcto diseño tanto de la pieza como de los canales de alimentación para conseguir un llenado exitoso durante la colada, para evitar así posibles defectos de fundición.

El proceso se divide en tres etapas: la primera comienza con el diseño y la impresión 3D del modelo; en la segunda etapa se lleva a cabo la fabricación del molde y la colada del metal fundido; finalmente, en la tercera etapa, una vez completado el proceso de fundición, la pieza obtenida se somete a un proceso de mecanizado. Este último implica la eliminación de bebederos y mazarotas, así como la implementación de acabados finales. La planificación de las actividades se presenta esquemáticamente en la figura 3-1.

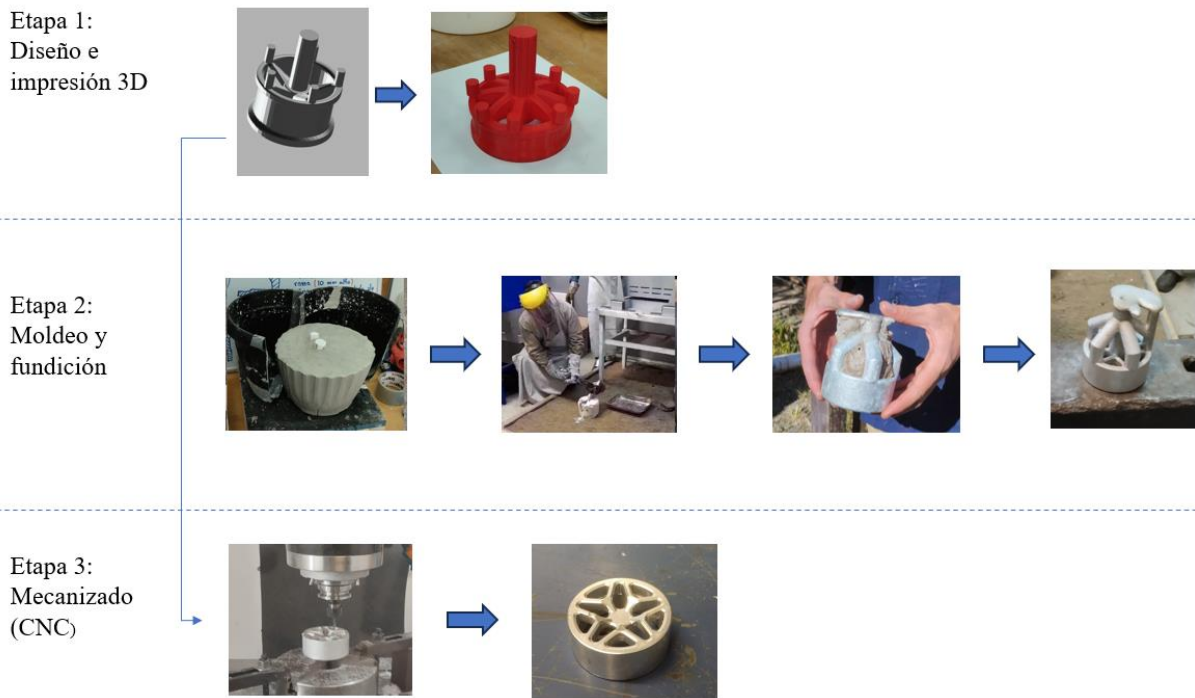


Figura 3-1 Diagrama actividad académica laboratorio de fundición y moldeo.

Adicionalmente, dentro de la experiencia de laboratorio se adiciona la elaboración de un molde utilizando la técnica tradicional de arena verde. Para esto se emplea un modelo de pieza elaborado por el cuerpo docente. Con esto se busca que los alumnos tengan contacto con distintas técnicas de moldeo, conociendo así sus características, posibilidades y limitaciones.

En cuanto a apartados técnicos, el material a fundir es aluminio, dado que es un material con gran disponibilidad, principalmente en formato de chatarra (latas, perfiles, componentes mecánicos, etc), permitiendo una sencilla obtención. Además, el punto de fusión es menor al de otros metales como el acero, facilitando el proceso de fusión y disminuyendo los tiempos requeridos.

El aluminio presenta las siguientes características físicas [16]:

- Metal ligero, densidad 2700 kg/m^3 , (un tercio del acero).
- Bajo punto de fusión 660°C .
- Peso atómico $26,9815 \text{ u.m.a}$.
- Color blanco brillante, con alto poder de reflexión.
- Resistente a la corrosión, productos químicos y a la humedad debido a la capa de óxido de aluminio que forma en su superficie.
- Abundante en la naturaleza.
- Fácil de reciclar.
- Buena fluidez en estado líquido.

3.3 Modelamiento e impresión 3D

Dentro de los procesos industriales de manufactura actuales, el diseño y modelamiento 3D son herramientas fundamentales en la elaboración de piezas y componentes. Razón por la cual es importante que los alumnos adquieran conocimientos y práctica dentro de esta área, así también el cómo se relaciona con distintos procesos de fabricación.

3.3.1 Consideraciones de diseño

Como se mencionó anteriormente, la pieza solicitada a diseñar es el modelo de un rin. Para poder llevar a cabo un proceso de fundición exitoso, se deben tener en cuenta una serie de condiciones técnicas en el diseño del modelo. Es por esto que el diseño debe realizarse teniendo en cuenta las limitaciones que tiene el proceso de fundición por gravedad y la técnica PLA perdido, además de las características técnicas de los equipos e insumos que se utilizan dentro de las experiencias. Las consideraciones de diseño para el modelo son las siguientes [6]:

- El volumen máximo que puede tener la pieza a fabricar es de 500 ml, esto debido a la capacidad del crisol (750 ml) y debe dejarse un margen para los canales de alimentación y bebederos.
- El diámetro máximo del rin es de 100 mm, dado que de esta forma se facilita la sujeción de la pieza en la etapa de mecanizado.
- Los cambios de sección en la pieza deben ser suaves.
- Se deben evitar las esquinas agudas, los ángulos rectos y los biseles, porque estos actúan como concentradores de esfuerzos y pueden causar agrietamiento y rasgaduras en la pieza o molde durante la solidificación.
- Evitar áreas planas grandes, ya que tienden a deformarse durante la solidificación debido a que estas áreas presentan grandes gradientes de temperatura.
- Contracción, de acuerdo al metal que se esté trabajando se presenta un porcentaje de contracción de la pieza, esto debe ser considerado previamente en el diseño del modelo. Deben existir tolerancias de contracción.
- Holgura de maquinado, si la pieza será mecanizada posteriormente, se debe dar una holgura superficial para los trabajos de mecanizado (considerar cortes, pulido, perforaciones, entre otros).
- Tolerancias dimensionales, en la práctica comercial, las tolerancias se presentan usualmente en un rango de $\pm 0.8\text{mm}$ para fundiciones pequeñas, y aumenta con el tamaño de las mismas.
- Los esfuerzos residuales se producen cuando tenemos diferentes velocidades de enfriamiento dentro de la pieza, para ello el diseño de alimentación de la pieza debe permitir un llenado uniforme de la misma.
- Se deben añadir al modelo los canales de alimentación, respiraderos y mazarotas necesarios para asegurar la correcta alimentación, ventilación y llenado de la pieza durante la colada.

3.3.2 Pasos del proceso de diseño e impresión 3D

Paso 1: Diseño del modelo 3D

- Seleccionar un software de modelación 3D como Autodesk Inventor o SolidWorks.
- Diseñar un modelo en 3D teniendo en cuenta todas las consideraciones mencionadas en el apartado 3.3.1

Paso2: Exportación del modelo

- Exportar el diseño en formato .STL o .OBJ. Estos formatos son compatibles con la mayoría del software empleado para la preparación de archivos para impresoras 3D.

Paso 3: Preparación del modelo para la impresión

- Utilizar un software de preparación de impresión como UltiMaker Cura o PrusaSlicer.
- Disminuir la cantidad de relleno al mínimo posible. La impresión debe ser prácticamente un cascarón con las dimensiones deseadas, pero sin relleno. Configurar la orientación, el relleno, el soporte y las capas de la impresión según se requiera.

Paso 4: Impresión 3D

- Cargar el archivo en el software de control de la impresora 3D.
- Iniciar la impresión asegurando el correcto funcionamiento.

Paso 5: Tratamiento post impresión

- Una vez obtenido el modelo impreso se debe sumergir en agua para localizar posibles agujeros o filtraciones por donde pueda ingresar yeso durante la etapa de moldeo.
- Si se identifican puntos de filtración, estos deben ser sellados con filamento de PLA mediante el uso de un caudín (Procedimiento similar a una soldadura de estaño).
- Volver a sumergir el modelo en agua y verificar nuevamente filtraciones.
- La secuencia del paso 5 se debe repetir hasta que ya no se presenten filtraciones.

3.4 Elaboración de moldes y fundición

En una segunda etapa se debe elaborar el molde del rin que se utilizará posteriormente en la experiencia del laboratorio de fundición, el proceso tarda a aproximadamente 20 minutos. Como material refractario se utiliza una mezcla de yeso-cemento en proporción 5:1. Esta elección se debe a que durante el proceso de eliminación de PLA en el horno el yeso tiende a fracturarse y añadiendo cemento se le da mayor resistencia al molde ante posibles agrietamientos.

3.4.1 Pasos para la elaboración del molde yeso-cemento

Paso 1: Recubrir con vaselina sólida el interior del contenedor de moldeo, esto para facilitar la extracción del molde una vez fraguado (figura 3-2).



Figura 3-2 paso 1: Recubrimiento con vaselina.

Paso 2: Fijar el modelo limpio dentro del contenedor de moldeo en la posición deseada, considerar la orientación de los bebederos y espesores del molde (figura 3-3).



Figura 3-3 paso 2: Posicionamiento de modelo.

Paso 3: En base al volumen del contenedor, preparar una mezcla de yeso-cemento en proporción 5:1 y mezclar los polvos hasta que quede una mezcla homogénea. La cantidad de mezcla varía en función del tamaño del contenedor de moldeo y dimensiones del rin, para esta experiencia la cantidad aproximada oscila entre 3 a 3,5 kg de mezcla (figura 3-4).



Figura 3-4 paso 4: mezclado de yeso-cemento.

Paso 4: En un contenedor de plástico verter tantos ml de agua como gr de mezcla se tengan, por ejemplo, si se tienen 3500 gr de mezcla yeso-cemento verter 3,5 litros de agua (figura 3-5).



Figura 3-5 paso 5: reunir agua.

Paso 5: Verter la mezcla yeso-cemento en el agua en una cubeta y mezclar hasta que se eliminen los grumos. No se debe verter el agua en los polvos secos, ya que no se homogeneizará la mezcla de manera adecuada (figura 3-6).



Figura 3-6 Paso 5: revolver mezcla con el agua.

Paso 6: Verter la cubeta en el contenedor de moldeo hasta que el modelo quede sumergido completamente, dejando fuera una parte del bebedero. Ésta será la entrada de alimentación. Durante este proceso se puede vibrar suavemente el contenedor para eliminar burbujas (figura 3-7).



Figura 3-7 Paso 6: recubrimiento del modelo.

Paso 7: Esperar a que el yeso fragüe, y posteriormente separar el contenedor de moldeo, obteniendo así el molde de yeso (figura 3-8).



Figura 3-8 paso 7: Extracción del molde

Paso 8: Dejar el molde dentro de un horno de secado a 300°C durante 10 horas para eliminar completamente el PLA (debe programarse una rampa de temperatura progresiva a modo de evitar fracturas en el molde). Para el enfriamiento se deja el molde al interior del horno, mientras la temperatura interior de este desciende hasta la temperatura ambiente una vez finalizado el ciclo de calentamiento.

Paso 9: Extraer el molde del horno y verificar que no tenga restos de PLA, de esta forma está listo para el proceso de fundición. Si existen restos de PLA se debe repetir el calentamiento, y soplar con aire comprimido para retirar cualquier ceniza remanente. El resultado se presenta en la figura 3-9



Figura 3-9 Molde post quemado PLA

3.4.2 Experiencia laboratorio de fundición

Dentro del laboratorio de fundición se desarrollan dos actividades principales: la elaboración de una pieza por moldeo en arena verde siguiendo los pasos descritos en el apartado 3.4.3, y el proceso de PLA perdido y colada para los moldes de yeso-cemento. Durante esta actividad, el profesor a cargo comentará acerca de la teoría del proceso de fundición, del procedimiento que se está llevando a cabo, la instrucciones y medidas de seguridad a seguir, entre otros. La experiencia se realizará dentro de horario de clases y tendrá una duración de 2 bloques de 70 minutos, y deberá realizarse con un profesor que dirija la clase y un ayudante que lo apoye con las tareas del laboratorio.

A continuación, se presenta una pauta de sugerencia para llevar a cabo las actividades del laboratorio de fundición.

Preparaciones:

- Se debe preparar el horno acorde a las instrucciones del manual del equipo
- El horno debe ser precalentado a 200°C, antes del inicio de la experiencia a una escala de 3°C/min, esto para ayudar al secado de la mampostería y el crisol.
- Supervisar que estén en orden todos los elementos y herramientas a utilizar durante la actividad a fin de facilitar la ejecución de la experiencia.

Presentación e inicio (15 min):

- Recibir a los alumnos, y supervisar que todos vistan zapatos de seguridad y overol.

- El profesor plantea los objetivos, actividades a desarrollar y explica la teoría asociada al proceso de fundición y moldeo de arena verde (figura 3-10).
- En paralelo a la explicación, el ayudante debe configurar el horno para aumentar su temperatura a 500°C con una rampa de 5°/min.
- Luego se abre el horno, se deposita el material a fundir dentro del crisol y se cierra nuevamente, este procedimiento se debe realizar con los equipos de seguridad correspondientes (guantes, colete, careta, polainas). En la figura 3-11 se puede observar a un alumno con el equipamiento de seguridad.



Figura 3-10 Profesor impartiendo la cátedra de taller de fundición



Figura 3-11 Alumno con EPP para operar el horno

Elaboración molde de arena (45 min)

- Se da inicio al proceso de moldeo en arena mientras el profesor supervisa y explica el proceso paso a paso. Los alumnos deben participar activamente del proceso de moldeo en arena.
- En paralelo, el ayudante supervisa el horno: una vez este alcanza los 500°C, se debe programar para llegar a 1050°C con una rampa de 10°C/min. A medida que el material se vaya fundiendo se debe ir retirando la escoria mediante el uso de una pala de escoria e ir añadiendo más material hasta llenar la capacidad del crisol.

Colada (15 min):

Durante la colada se vierte el material fundido del horno al interior del molde

- Precalear el crisol de vertido y colocar el molde dentro de la cancha de arena (figura 3-12). El precalentamiento se realiza con la intención de evitar o disminuir el choque térmico entre el crisol y el metal líquido.



Figura 3-12 Pre calentamiento de crisol.

- Cerrar la tapa y volcar el horno y vaciar la colada en el crisol de vertido, hasta que no quede material fundido el horno (figura 3-13).



Figura 3-13 Volcamiento del horno.

- Inmediatamente verter el aluminio fundido en el molde hasta completar la capacidad de este (figura 3-14). Este paso es de alta peligrosidad, se debe ensayar previamente los movimientos a realizar.



Figura 3-14 vertido de metal fundido en molde.

- Esperar a que el molde se enfríe.

Extracción de la pieza (10 min).

- Se sumerge el molde de yeso en una cubeta de agua para que enfríe.
- Se extrae el molde de la cubeta y se rompe para extraer la pieza. La pieza debe ser manipulada con pinzas, debido a que sigue manteniendo alta temperatura.
- Una vez extraída la pieza, se deben limpiar los restos de yeso que queden adheridos. Se recomienda hacer uso de las limas que hay en el laboratorio.
- Una vez limpia la pieza, se debe medir su diámetro y obtener su peso.

Limpieza (5 min)

- Limpiar la zona de trabajo y ordenar todas las herramientas e implementos utilizados. Esto incluye desechar escombros del molde y la escoria del proceso de fundición.
- Se debe apagar el horno y la campana de extracción

Conclusiones (5 min)

- Se presenta un resumen general de las actividades realizadas y se responden las preguntas de los alumnos.

3.5 Mecanizado (CNC):

La última actividad a desarrollar para la elaboración del rin consiste en la etapa de mecanizado. En esta etapa se hace uso del software CAM de Inventor, en conjunto con tecnología CNC para darle los acabados finales a la pieza. Esta última etapa será desarrollada dentro del taller metal mecánico, en horario de clases y tendrá una duración de dos bloques de 70 minutos.

A continuación, se presenta el paso a paso para realizar las actividades de mecanizado [17]:

1. Reajuste del modelo en Autodesk Inventor:

- Se toma el modelo 3D del rin previamente creado y se reajusta acorde la contracción observada tras el proceso de fundición.

2. Exportar modelo CAD:

- Exportar el modelo CAD en un formato compatible con el software CAM. Se puede usar formatos como .STEP, .IGES o .STL.

3. Acceso a la herramienta CAM:

- Abrir el entorno CAM en Autodesk Inventor. Se puede acceder a esto desde el menú principal, seleccionando "Entorno CAM" o "Fabricación" según la versión. En la figura 3-15 se observa la pestaña de "Entorno CAM" de Inventor

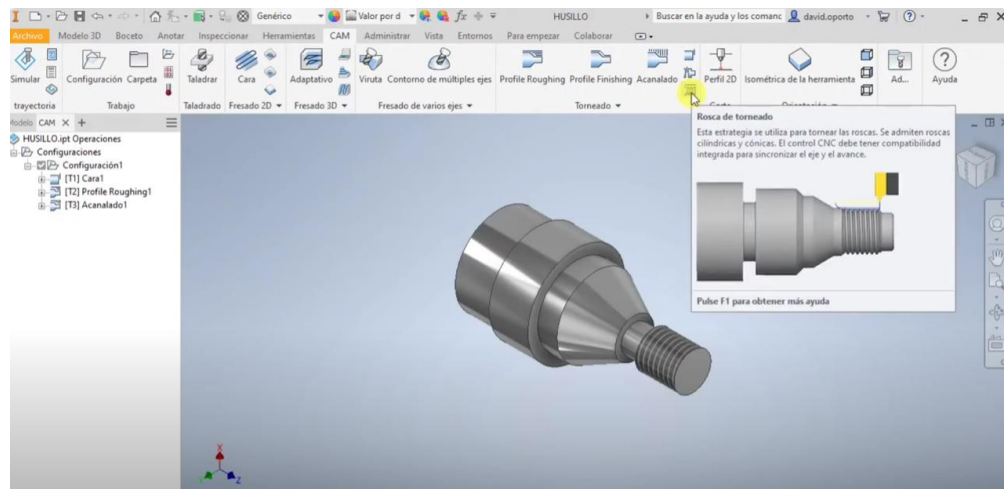


Figura 3-15 Herramienta CAM Inventor.

4. Configuración de máquina:

- Definir la configuración de la máquina CNC, incluyendo el tipo de máquina, las dimensiones del área de trabajo y las capacidades específicas.

5. Ubicación del origen de coordenadas:

- Establecer la ubicación del origen de coordenadas en el modelo. Esto asegura una correcta alineación entre el modelo CAD y la máquina CNC.

6. Selección de herramientas:

- Seleccionar las herramientas de corte se usarán en el proceso de mecanizado. Definir los parámetros como diámetro, longitud y material de la herramienta.

7. Estrategias de mecanizado:

- Definir las estrategias de mecanizado para cada operación (fresado, taladrado, etc.). Utilizando las opciones disponibles en la herramienta CAM para establecer la ruta de la herramienta. La estrategia de mecanizado a seguir dependerá de las características de la pieza a mecanizar.

8. Generación automática de trayectorias:

- Utilizar las funciones de generación automática de trayectorias de la herramienta CAM para crear las rutas de mecanizado según las estrategias definidas.

9. Simulación de mecanizado:

- Realizar una simulación para visualizar cómo se llevará a cabo el mecanizado. Verificando que no existan colisiones y que las trayectorias sean las esperadas.

10. Ajustes manuales (si es necesario):

- Realizar ajustes manuales en las trayectorias de herramientas o configuraciones (velocidad de avance, velocidades de corte, RPM, etc.) si la simulación muestra algún problema.

11. Generación del código G:

- Generar el código G de forma automática, el cual contiene las instrucciones específicas para la máquina CNC, desde el entorno CAM.

12. Verificación y edición del código G:

- Revisar el código G generado, y realizar ediciones si es necesario para adaptarlo a requisitos específicos o corregir posibles errores.

13. Transferencia del código G a la máquina CNC:

- Transferir el código G a la máquina CNC utilizando el método de transferencia apropiado, como USB o a través de una red.

14. Preparación y sujeción del material:

- Preparar el material que se mecanizará y sujetarlo adecuadamente en la máquina CNC, asegurándose de que esté bien fijado.

15. Inicio del mecanizado:

- Inicia el programa en la máquina CNC y supervisa el proceso inicial para asegurar un funcionamiento correcto.

16. Supervisión continua:

- Supervisar el proceso de mecanizado de forma continua, realizando ajustes si es necesario para garantizar resultados precisos.

17. Finalización y verificación:

- Al completar el mecanizado, verificar que las dimensiones y la calidad del acabado cumplan con las especificaciones del diseño original.

4. Diseño conceptual del laboratorio académico de fundición y moldeo

4.1 Factores a considerar

El diseño de un laboratorio de fundición y moldeo debe considerar una serie de variables para garantizar su adecuado funcionamiento y seguridad. A continuación, se presentan los factores más importantes a tener en cuenta, antes de realizar la selección de equipos, implementos y distribución del espacio de laboratorio.

Espacio y distribución: El laboratorio debe contar con un espacio adecuado para llevar a cabo los procesos de fundición y moldeo de manera eficiente y segura. Es importante disponer de suficiente área para ubicar los equipos y las estaciones de trabajo, así como para permitir la circulación de los estudiantes y el personal técnico. La distribución del espacio debe ser planificada cuidadosamente para facilitar el flujo de trabajo y minimizar el riesgo de accidentes.

Ventilación y extracción de gases: Dado que los procesos de fundición y moldeo pueden generar gases y humos nocivos, es esencial contar con un sistema de ventilación adecuado que asegure la renovación del aire en el laboratorio y la extracción de los gases y humos hacia el exterior.

Sistema de suministro de energía: El laboratorio debe contar con un sistema eléctrico adecuado para soportar la carga de los equipos y maquinaria utilizados en los procesos de fundición y moldeo. Para el caso particular de este laboratorio se empleará un horno eléctrico de 3 [kW] de potencia.

Equipos y maquinaria: El laboratorio debe estar equipado con maquinaria y equipos específicos para llevar a cabo los diferentes procesos de fundición y moldeo. Esto puede incluir hornos de fusión, crisoles, moldes, equipos de medición y control, entre otros.

Seguridad: La seguridad es un aspecto fundamental en el diseño del laboratorio. Se deben implementar medidas de seguridad adecuadas, como el uso de equipos de protección personal (EPP) para el personal y los estudiantes (desarrollado en el punto 4.3.4), señalización de áreas peligrosas, extintores de incendio, entre otros.

Residuos y medioambiente: Se deben considerar las normativas y regulaciones ambientales relacionadas con los procesos de fundición y moldeo. Es importante implementar medidas para minimizar la generación de residuos y asegurar una adecuada gestión de los mismos.

Perímetro de seguridad para colada: Se debe tener una cancha de arena alrededor del horno con el propósito de funcionar como un perímetro de seguridad en donde ejecutar el proceso de colada, ya que la arena debido a sus propiedades refractarias es capaz de retener los posibles derrames de metal fundido.

Iluminación: El laboratorio debe contar con iluminación adecuada para permitir una buena visibilidad durante los procesos y actividades realizadas en el espacio.

Espacio de almacenamiento: Se deben establecer áreas de almacenamiento seguras y organizadas para los materiales y herramientas utilizados en el laboratorio.

Acceso y seguridad de equipos: Se debe restringir el acceso a ciertos equipos y maquinaria a personal capacitado y autorizado, para evitar accidentes y daños.

Mantenimiento: Es importante establecer un plan de mantenimiento preventivo y correctivo para los equipos y maquinaria del laboratorio, asegurando su buen funcionamiento y prolongando su vida útil.

4.2 Zonificación y distribución del espacio

El laboratorio se encontrará ubicado dentro del taller metalmecánico, a un costado del área de soldadura. El espacio aproximado del que se dispone es un área de 5x3 [m] (ver figura 4-1). Para aprovechar los recursos disponibles se utilizará una repisa del taller para el almacenamiento de las herramientas y elementos del taller de fundición, así como también una mesa para usarla de apoyo para la elaboración de moldes de arena. En el espacio se encuentran tres esmeriles los cuales se utilizan para las clases de soldadura, estos serán ubicados en el perímetro del espacio para optimizar el área disponible.

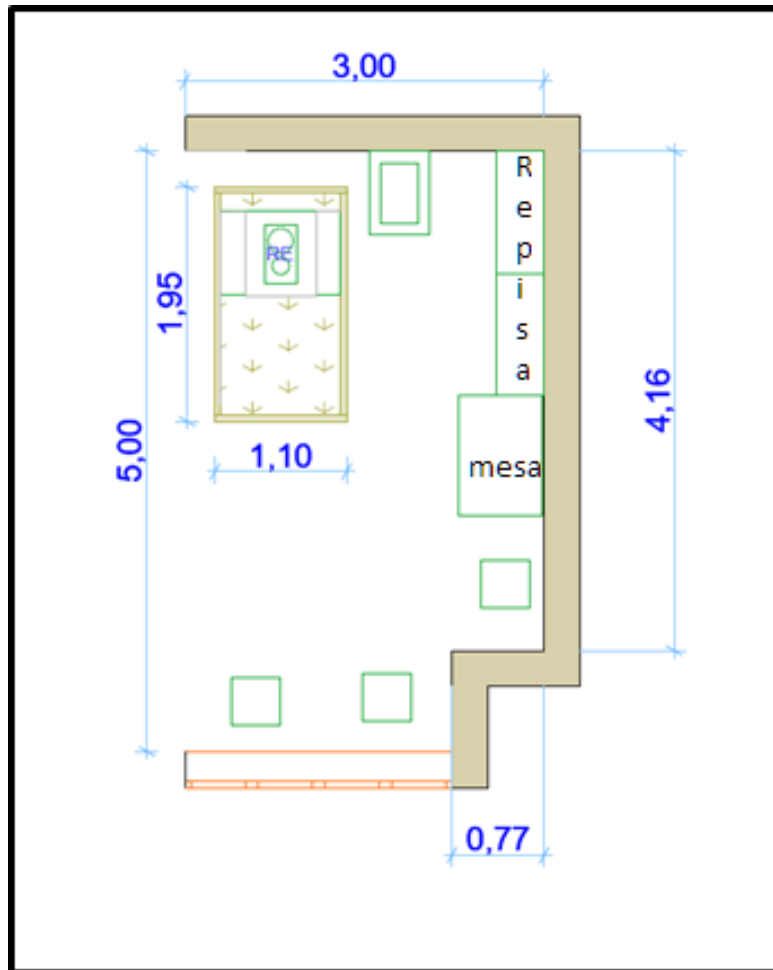


Figura 4-1 Plano de instalaciones del laboratorio

4.3 Selección de equipos, estructuras, herramientas e insumos del laboratorio.

4.3.1 Equipos

Horno de fundición:

El horno seleccionado corresponde al modelo Nabertherm k 1-13 (figura 4-2), el cual es un horno de crisol basculante, compacto y de funcionamiento eléctrico para la fusión de metales no ferrosos y aleaciones especiales. La selección de este equipo se debe a varias razones: la seguridad que proporciona su sistema basculante para la operación, las dimensiones se acoplan bien al espacio disponible del taller y el consumo eléctrico es adecuado.



Figura 4-2 Horno Narbertherm k 1-13 [18].

Respecto a sus especificaciones técnicas, se tiene lo siguiente [18]:

- Temperatura máxima: 1300 [°C]
- Temperatura máxima de la masa fundida 1150 [°C]
- Capacidad en kg: 1,5 [kg] aluminio, 6 [kg] cobre
- Volumen del crisol: 0,75 [L]
- Dimensiones: ancho 600 [mm], profundidad 710 [mm,] alto: 670 [mm]
- Potencia: 3 [kW]
- Peso: 85 [kg]

Campana de extracción:

La campana de extracción se realizó a pedido, esto debido a que se necesitaba una salida circular de 150 [mm] de diámetro para ajustarse a una manga regulable ya existente en el laboratorio. Su base fue dimensionada en [900] x 800[mm] para ajustarse las dimensiones del horno. El material seleccionado para la campana de extracción fue acero galvanizado de 0,5 [mm] de espesor, lo cual brinda mayor durabilidad y resistencia a la corrosión. En la figura 4-3 se observa la campana de extracción previa a su instalación.



Figura 4-3 Campana de extracción.

4.3.2 Herramientas de fundición:

Crisoles: Dentro de la actividad se requiere el uso de dos crisoles, el crisol interno del horno (incluido en el equipo) y un crisol móvil para realizar el proceso de colada (ver figura 4-4). El crisol interno del horno es un crisol de arcilla-grafito y cuenta con un canal de vertido integrado. Por otra parte, el crisol móvil fue elaborado en el taller utilizando una tubería de acero inoxidable de 110 [mm] de diámetro y una placa del mismo material soldada para formar la base. Posteriormente, se calienta y martilla para formar la boquilla, y finalmente se le da un recubrimiento interno con aceite grafitado (mezcla de aceite de lubricación con grafito en polvo). Para aprovechar el material se elaboraron dos crisoles móviles a modo de tener uno de repuesto.

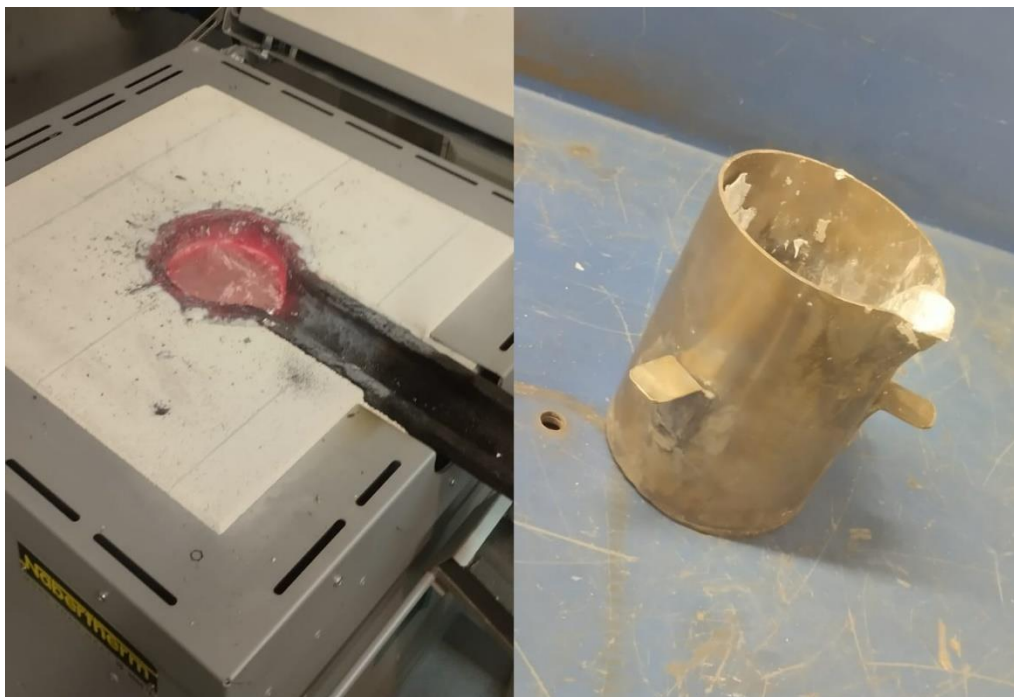


Figura 4-4 Crisol fijo con canal y crisol móvil de vertido.

Pala de escoria: Elaboradas en el taller con secciones de varilla de acero al carbono de 350 [mm] y una placa delgada de acero inoxidable. En la figura 4-5 se observan las palas de escoria descritas.



Figura 4-5 Palas de escoria.

Pinzas: Consisten en pinzas de hierro fundido para manipular material caliente

Pinzas de crisol: Pinzas tipo tijera elaboradas en el taller con perfiles de acero, cuentan con un diámetro de agarre de 110 [mm] en su extremo construido a partir de una lámina de acero de 3 [mm] de espesor, este se ajusta al contorno del crisol, el largo de los perfiles es de 450 [mm]. En la figura 4-6 se presentan las pinzas de crisol fabricadas.



Figura 4-6 Pinza de crisol.

4.3.3 Herramientas de moldeo:

Moldeo en arena:

Cajas de moldeo:

Para las cajas de moldeo en arena se optó por fabricarlas, por lo que se utilizaron listones de madera de pino de 1x4" para elaborar cajas con un interior de 30 x 30 [cm]. Como sistema de acople se utilizó un sistema de cuñas de madera numeradas en la cara exterior de las cajas, adicionalmente se instalaron manillas para poder manipular las cajas durante el moldeo. Debido a que la madera sería continuamente expuesta a la humedad de la arena se le realizó un recubrimiento de protección con laca para madera. El resultado obtenido de las cajas de moldeo terminadas se presenta en la figura 4-7.



Figura 4-7 Caja de moldeo.

Apisonadores: Se elaboraron dos apisonadores para moldeo en arena impresión 3D, posteriormente se enmasillaron para eliminar las irregularidades. El apisonador elaborado se puede observar en la figura 4-8.



Figura 4-8 Apisonador de arena realizado con impresión 3D.

Pala: En la figura 4-9 se observa una pala marca Rayon, de tamaño regular, para revolver la mezcla de arena y verterla en las cajas de moldeo.



Figura 4-9 Pala de tamaño regular.

Palas pequeñas: se seleccionan pequeñas palas plásticas para trabajar la arena dentro de las cajas.

Cucharillas: Se requiere un set de cucharillas para subsanar posibles desperfectos del molde.

Brochas: Se seleccionan un juego de brochas de media pulgada.

Bebederos: Elaborados a partir de una barra cilíndrica de polímero, cada bebedero tiene una longitud de 15 cm. Estos se pueden observar en la figura 4-10.

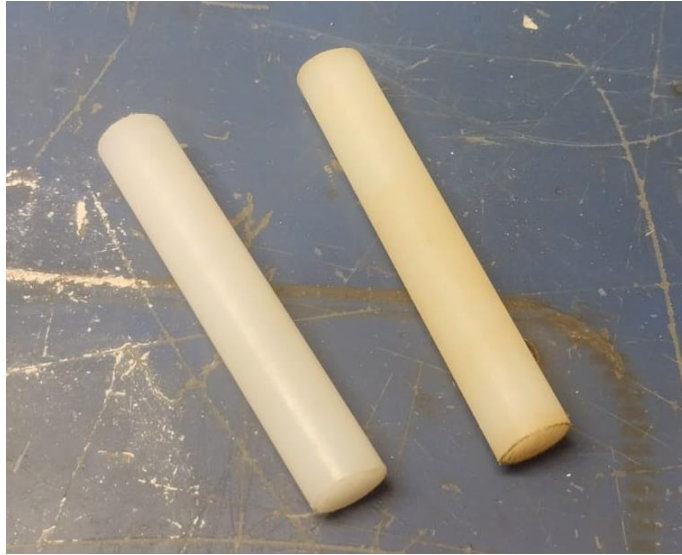


Figura 4-10 Bebederos cilíndricos de polímero.

Soplete: Soplete regulable, funciona conectado directamente a un tanque de gas.

Compresor de aire: Se utilizará el compresor móvil del taller de manufactura avanzada (maker space). Este corresponde a un compresor de la marca Bauker de 2HP y 50 litros de capacidad, su presión máxima es de 116 psi y ofrece un flujo de hasta 170 litros por minuto. Cuenta con un motor eléctrico de 230 V [19]. En la figura 4-11 se enseña una imagen del equipo.



Figura 4-11 Compresor de aire Bauker [19].

Tamices: Se seleccionan tamices marca pinzar de acero inoxidable ASTM E-11, certificados y normalizados:

- Tamiz de 8" n°8,
- Tamiz de 8" n°200
- Tamiz de 12" n°80
- Tamiz de 12" n°200.

Regleta: Se elabora una regleta a partir de una lámina metálica. Su función es rectificar la superficie de la arena en las cajas de moldeo al repasar los bordes.

Moldeo en yeso:

Contenedor divisible (encofrado): consiste en un contenedor donde se vierte el yeso en estado líquido, una vez que el yeso fragua el contenedor se divide para extraer el molde de yeso. En la figura 4-12 se presenta un contenedor divisible elaborado a partir de un tubo de PVC de 110 [mm] de diámetro.

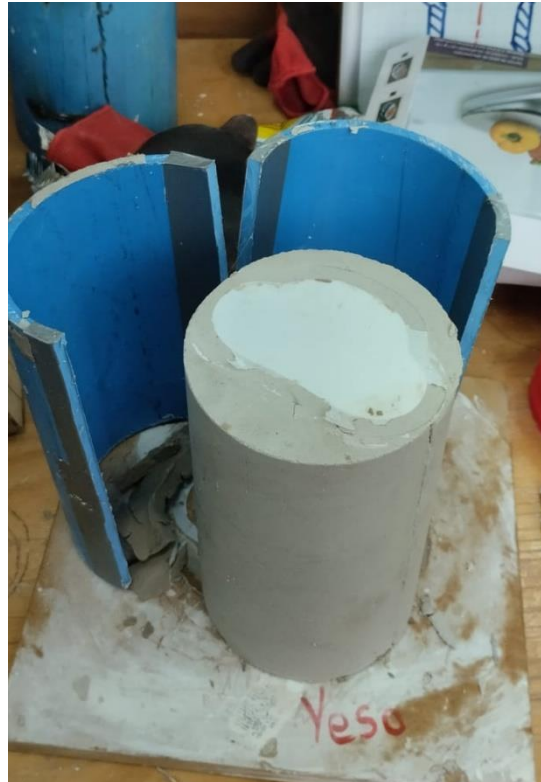


Figura 4-12 Contenedor divisible para moldeo en yeso.

4.3.4 Equipos de protección personal (EPP)

Cada persona que ingresa al taller debe tener overol y zapatos de seguridad, además se debe contar dentro del laboratorio con cuatro sets completos de protección para altas temperaturas que incluyen lo siguiente:

- Careta facial
- Máscara de gases
- Chaqueta de cuero
- Coletos de cuero
- Guantes de cuero aluminizado
- Polainas de cuero aluminizado

El conjunto completo se observa en la figura 4-13.



Figura 4-13 Conjunto EPP para laboratorio de fundición.

4.3.5 Estructuras:

Arenero de seguridad: Tiene dimensiones de 1,95[m] x 1,10[m]. El marco es elaborado a partir de pino cepillado de 2x4” y recubierto con laca de madera. El interior de la caja es recubierto con una geomembrana aislante, posteriormente se rellena con arena.

Mesa de horno: Se selecciona una mesa del taller de base metálica. La superficie se recubre con una lámina de acero galvanizado. Para su instalación se ancla al suelo mediante pernos de anclaje, además se le añaden bridas metálicas para fijar el horno a la cubierta.

En la figura 4-14 se muestra la mesa de horno y el arenero de seguridad terminados.



Figura 4-14 Mesa de horno y arenero de seguridad.

Soporte tipo brazo para campana de extracción: Soporte metálico, elaborado a partir de perfiles de acero (40x40 mm) del taller de soldadura, se ancla al muro mediante pernos y cuenta con cadenas para sostener el peso de la campana de extracción. Este elemento se muestra en la figura 4-15.



Figura 4-15 Brazo de soporte para campana de extracción.

Mesa de moldeo: Corresponde a una mesa de clases en desuso, por lo que se le da utilidad como base para elaborar los moldes de arena.

Repisa: Mueble disponible del laboratorio que se utilizará para almacenamiento de las herramientas, equipos de protección y otros elementos del laboratorio de fundición. El mueble se enseña en la figura 4-16.



Figura 4-16 Repisa de almacenamiento para el taller de fundición.

4.3.6 Insumos

- Bentonita: saco de 25 kg.
- Grafito en polvo: bolsa de 1kg.
- Arena: Se trabajará con arena silíceá fina, se solicitan 100 kg de ésta.
- Yeso: 2 sacos de yeso de fraguado rápido de 25 kg marca volcán.
- Cemento: Saco de 25 kg marca Polpaico
- Fundente de aluminio: Se solicitan los químicos de cloruro de potasio, cloruro de sodio y fluoruro de sodio para elaborarlo (1 kg de cada uno). La composición del fundente se divide en 42,5% Cloruro de sodio, 42,5% Cloruro de potasio y 5% Fluoruro de sodio.
- Chatarra de aluminio: Puede provenir de diversas fuentes como latas, perfiles, componentes mecánicos, etc.

4.4 Layout del laboratorio de fundición y moldeo

En este apartado se presenta un layout 3D de referencia para previsualizar las instalaciones del laboratorio de fundición y moldeo (figuras 4-17 y 4-18). El horno que se muestra en la imagen no corresponde con el modelo de horno real seleccionado, sino que es únicamente una representación.

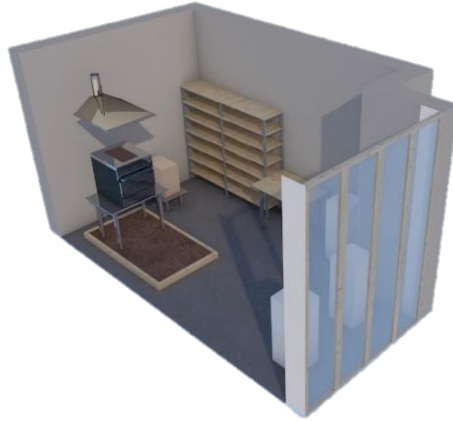


Figura 4-17 Layout laboratorio de fundición.

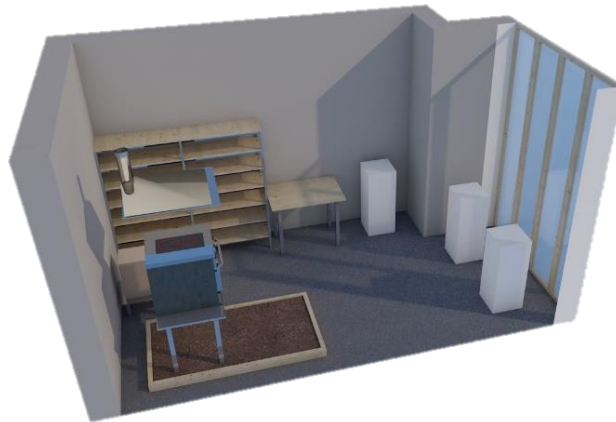


Figura 4-18 Layout laboratorio de fundición.

4.5 Recursos y costos del proyecto

En este apartado se adjuntan los costos asociados al proyecto de implementación del laboratorio de fundición. En la tabla 4-1 se presentan los costos de los equipos, y en la tabla 4-2 se presentan los costos de infraestructura.

Tabla 4-1 Costos de equipos

Ítem	Descripción	Costo unitario (CLP)	Cantidad	Costo total (CLP)
Horno de fusión	Se incluye valor del equipo y envío	12.376.000	1	12.376.000
Campana extractora	Fabricada bajo pedido	83.600	1	83.600

Tabla 4-2 Costos de infraestructura.

Ítem	Descripción	Costo unitario (CLP)	Cantidad	Costo total (CLP)
Arenero de seguridad	Valor de los materiales utilizados	20.000	1	20.000
Geomembrana	Base aislante para el arenero	18.000	1	18.000
Mesa de horno	La mesa fue reutilizada desde el taller se incluye únicamente el costo del revestimiento metálico	15.000	1	15.000
Mesa de moldeo	Reutilizada desde el mismo taller	0	1	0
Brazo de sujeción campana	La estructura fue fabricada con perfiles del taller, se incluye el costo de las cadenas y pernos de anclaje	10.000	1	10.000

En la tabla 4-3 se presentan los costos de herramientas del laboratorio:

Tabla 4-3 Costos de herramientas

Ítem	Descripción	Costo unitario (CLP)	Cantidad	Costo total (CLP)
Tamiz 8" n°80	Marca Pinzar certificado y normalizado	61.400	1	61.400
Tamiz 8" n°200	Marca Pinzar certificado y normalizado	80.600	1	80.600
Tamiz 12" n°80	Marca Pinzar certificado y normalizado	170.884	1	170.884
Tamiz 12" n°200	Marca Pinzar certificado y normalizado	229.300	1	229.300
Cajas de moldeo	Fabricación propia se designa el costo de materiales por unidad	12.000	3	36.000
Juego de limas	Juego de limas pequeñas para eliminar rebabas	4900	2	9800
Sierras de mano	Sierra manual tipo arco	6000	2	12000
Brochas	Brochas para pintar	1000	6	6000
Pala	Pala tamaño regular	7000	1	7000
Palas de mano	Palas plásticas pequeñas para su uso en las cajas de moldeo	1500	4	6000
Cepillos metálicos	Cepillos de alambre	1490	4	5960
Lancetas tipo cuchara	Cuchara espátula de acero inoxidable	2600	4	10400

En la tabla 4-4 se presentan los costos de insumos y misceláneos:

Tabla 4-4 Costos de insumos y misceláneos.

Ítem	Descripción	Costo unitario (CLP)	Cantidad	Costo total (CLP)
Arena gruesa	Arena lampa gruesa (0,5 m ³)	42.500	1	42.500
Arena fina	Arena fina silíceas	3.500	4	14.000
Bentonita (25 kg)	Aglutinante	25.000	1	25000
Grafito en polvo (1 kg)	Grafito pulverizado, lubricante sólido	41.000	2	82.000

Yeso (25 kg)	Yeso fraguado rápido marca volcán	5.500	2	11.000
Cemento (25 kg)	Cemento tradicional Polpaico	3.220	1	3.220
Lija n°100	Lija al agua	390	15	5.850
Lija n°240	Lija al agua	390	15	5.850
Lija n°500	Lija al agua	390	15	5.850
Laca de madera	Recubrimiento para las cajas de moldeo y perímetro de seguridad	12.390	1	12.390
Tornillos varios	Se aproxima el valor de todos los tornillos usados	24.000	N	24.000
Fundente	Cloruro de potasio (1kg)	24.980	1	24.980
	Fluoruro de sodio (1kg)	91.610	1	91.610
	Cloruro de sodio (1 kg)	3900	1	3900

Equipamiento de protección personal:

El equipamiento de protección personal fue donado por la empresa aceros AZA, este corresponde a 4 sets de polainas, colete y guantes de cuero aluminizado. Estos sets fueron complementados además con máscaras de gases y caretas faciales del taller de soldadura.

Instalación eléctrica:

La instalación eléctrica para el horno consistió en un circuito nuevo con un automático de 20 Amperios (en el tablero eléctrico del taller de soldadura) y enchufe de 16 Amperios/220 voltios. Esta instalación fue realizada por el equipo técnico de mantenimiento de la universidad y tuvo un valor de \$500.000 clp

5. Consideraciones de seguridad y medioambientales

En un laboratorio académico de fundición se presentan diversos riesgos asociados con el manejo de metales fundidos, equipos de alta temperatura, herramientas, entre otros. Es importante realizar una identificación y análisis de los riesgos presentes en las actividades del laboratorio y determinar cuáles son las medidas de seguridad a seguir [20].

1. Quemaduras:

Para el proceso de fundición se deben utilizar altas temperaturas para alcanzar el punto de fusión del metal por lo que esto supone un factor de riesgo a quemaduras

Medidas de Seguridad:

- Uso de equipo de protección personal (EPP) como trajes ignífugos, guantes resistentes al calor y protectores faciales.
- Capacitación sobre el manejo seguro de metales fundidos y el uso de equipos de protección.
- Instalación de señaléticas que indiquen riesgo de quemadura, en la zona del horno.
- Instalación de extintores en el interior del laboratorio.

2. Inhalación de humos y gases:

Cuando se lleva a cabo un proceso de fundición se emanan gases al ambiente los cuales son perjudiciales para la salud.

Medidas de Seguridad:

- Instalación de sistemas de ventilación adecuados para controlar la exposición a humos y gases.
- Uso de mascarillas de respiración o respiradores según sea necesario.

3. Derrames de metal fundido:

Durante el proceso de colada es pueden existir salpicaduras o derrames de metal líquido.

Medidas de Seguridad:

- Implementación de un perímetro de arena para contener derrames y evitar su propagación.
- Comprobar que ninguno de los equipos y elementos que entrarán en contacto con el metal fundido presente puntos de filtración.

4. Exposición a Sustancias Químicas:

En ocasiones puede ser necesario el uso de sustancias químicas a modo de fundente para llevar a cabo el proceso de fundición.

Medidas de Seguridad:

- Almacenamiento seguro de productos químicos con etiquetado claro.
- Uso de EPP adecuado al manejar y almacenar sustancias químicas.

5. Cortes y lesiones por objetos afilados:

Dentro del laboratorio se trabaja con herramientas como lijas y cierras que podrían ocasionar cortes, se debe tener también en cuenta que en ocasiones la pieza fundida presenta rebabas afiladas.

Medidas de Seguridad:

- Uso de guantes y equipo de protección para prevenir cortaduras.
- Manejo apropiado de herramientas y maquinaria.

6. Riesgos eléctricos:

El horno con el cual se trabaja es un equipo con una potencia relativamente alta de 3 kW por lo que se deben tener en consideración los riesgos que existirían en caso de fallo eléctrico.

Medidas de Seguridad:

- Inspección regular de equipos eléctricos.
- Capacitación sobre seguridad eléctrica y uso de dispositivos de protección.

7. Incendios:

Al trabajar con altas temperaturas, así como con equipos eléctricos se presenta el riesgo de incendio al interior de las instalaciones.

Medidas de Seguridad:

- Instalación de extintores de incendios adecuados y sistemas de detección.
- Evitar proximidad de cualquier elemento inflamable al horno.
- Procedimientos claros de evacuación.

8. Atrapamientos:

Durante la manipulación del horno podría existir riesgo de atrapamiento con el mecanismo móvil de éste, así como también de atrapamiento de la ropa con la mesa u otros elementos del laboratorio.

Medidas de Seguridad:

- Diseño seguro de maquinaria y equipos para prevenir atrapamientos.
- Capacitación sobre el uso seguro de equipos.

9. Caídas y Tropiezos:

Para cumplir con las actividades del laboratorio el personal y el alumnado deben desplazarse al interior de las instalaciones por lo que existen riesgos de caídas y tropiezo.

Medidas de Seguridad:

- Mantenimiento de áreas de trabajo ordenadas y libres de obstáculos.
- Uso de calzado antideslizante y señalización clara.

10. Manejo de desechos:

Durante los procesos de fundición y moldeo se generan desechos como escoria y escombros de yeso por lo que es necesario un plan de manejo para estos.

Medidas de Seguridad:

- Disposición adecuada de un plan de desechos y residuos.
- Cumplimiento de regulaciones ambientales locales.

11. Protección Personal:

Al interior del laboratorio se debe cumplir con el uso del equipamiento de seguridad apropiado.

Medidas de Seguridad:

- Durante el proceso de colada es requisito el uso adecuado de EPP, incluyendo careta facial, colete, guantes y polainas de cuero, calzado de seguridad, mascara de gases, entre otros.
- Acceso restringido a áreas peligrosas.

12. Capacitación Continua:

Se debe mantener al personal que dirige las actividades y opere los equipos al tanto de las pautas y medidas de seguridad a seguir.

Medidas de Seguridad:

- Brindar capacitación regular sobre seguridad a todo el personal y estudiantes.

6. Montaje, puesta en marcha y validación

6.1 Proceso de montaje

El proceso inició en junio de 2023 con una evaluación del estado del espacio designado para el laboratorio. Dicho espacio, para ese momento, estaba siendo utilizado como área de almacenamiento. En la figura 6-1 se puede observar el estado inicial del espacio.

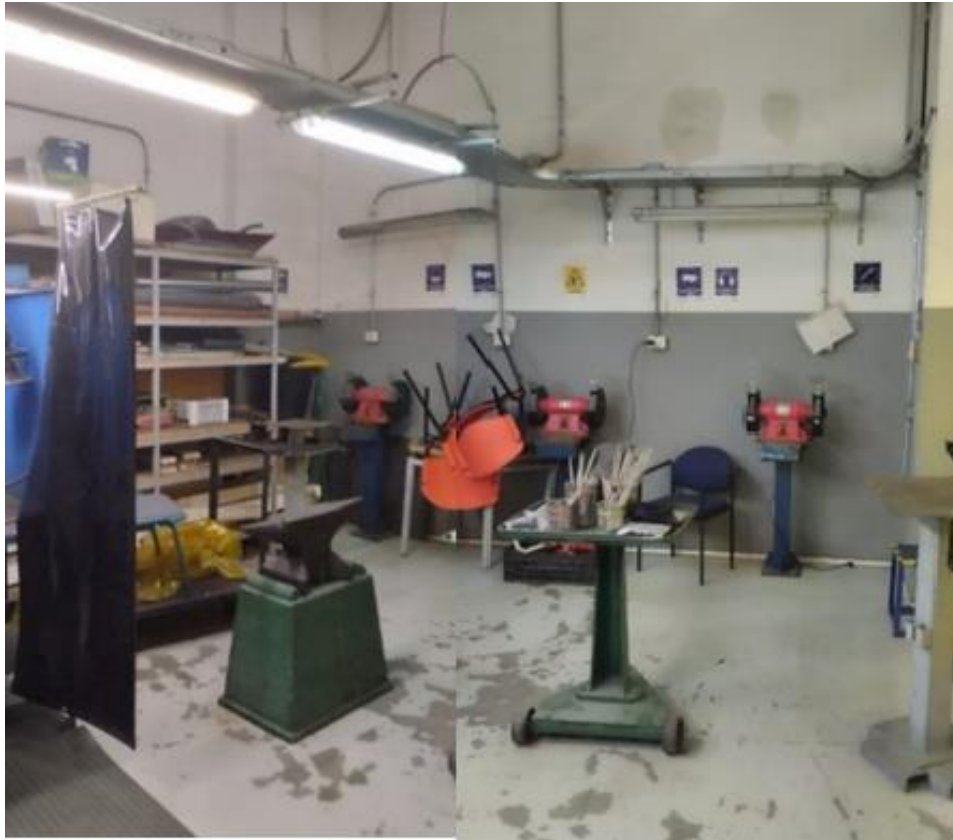


Figura 6-1 Estado inicial espacio de laboratorio.

Tras la evaluación, se realizó una propuesta de diseño conceptual para el laboratorio, la cual fue anteriormente descrita en el capítulo 4. Una vez teniendo el diseño y la selección de equipos y elementos del laboratorio, se efectuaron las solicitudes de compra de todos los elementos que serían necesarios para el montaje del laboratorio. Con el fin de optimizar los tiempos del proyecto se realizó una limpieza y ordenamiento del espacio mientras se esperaba la llegada de las compras solicitadas. En la figura 6-2 se observa el espacio tras realizar la limpieza.



Figura 6-2 Estado del laboratorio post limpieza.

Posteriormente se efectuó la recepción del horno y se realizó la instalación eléctrica reemplazando un enchufe existente de tipo tradicional por industrial de 220 V / 16 amperes tipo hembra, para alimentar la fuente de poder del horno (figura 6-3).



Figura 6-3 Llegada del horno e instalación eléctrica.

Una vez que llegaron los elementos solicitados, se inició el montaje de la cancha de arena y de la campana de extracción. Se redujo la altura de la mesa del horno a 800 [mm] para facilitar la operación del equipo. Producto de esta reducción de altura se obtuvo una sección pequeña de la estructura la cual se utilizó para elaborar un estante para la fuente de poder. Adicionalmente se organizaron todos los elementos del laboratorio de fundición (EPP, insumos y herramientas) en la repisa de almacenamiento. Todo lo anteriormente descrito se muestra en la figura 6-4.



Figura 6-4 Montaje de horno y campana de extracción.

A partir de este punto se comenzaron a realizar las primeras pruebas de fundición. Durante estas pruebas surgieron ciertas problemáticas que debían ser solucionadas, entre estas se encuentra que el peso de la campana producía que la manga de extracción cediera y bajara poco a poco, por lo que se elaboró un brazo de acero para anclarlo a la pared y sujetar la campana mediante cadenas. Las mesas debían ser recubiertas con acero como medida de seguridad en caso de derrames. Se instalaron además bridas de anclaje para evitar desplazamientos del horno sobre la mesa. Estos cambios se pueden observar en la figura 6-5.



Figura 6-5 Instalación brazo de soporte para campana.

Una vez terminada la infraestructura general del laboratorio, se elaboraron las herramientas faltantes utilizando materiales del taller metalmecánico, estas consistían en el crisol móvil (figura 6-7), pinzas metálicas para manipular el crisol (figura 6-6), y palas de escoria (figura 6-8). El detalle de las especificaciones técnicas de estas herramientas se describe en el apartado 4.3.3. Si bien estas herramientas se encuentran disponibles en el mercado, debían importarse y debido a la proximidad de las actividades académicas del laboratorio esta no era una opción viable.

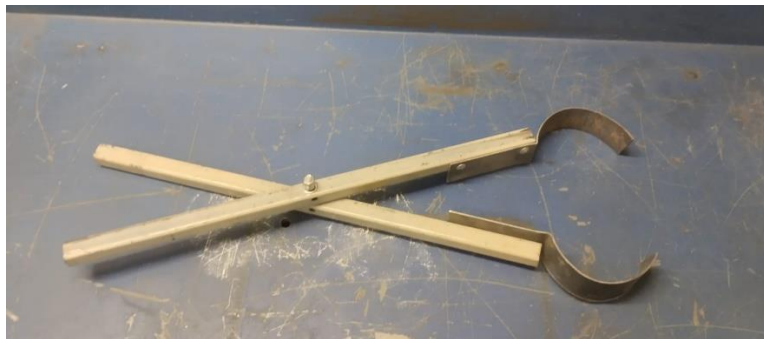


Figura 6-6 Pinzas de crisol elaboradas en el taller.



Figura 6-7 Crisol de acero inoxidable elaborado en el taller.



Figura 6-8 Palas de escoria elaboradas en el taller.

Como parte final del montaje se realizó una limpieza y ordenamiento del área de trabajo y de la zona de almacenaje, donde todos los insumos y herramientas del taller fueron cuidadosamente organizados.

6.2 Pruebas piloto de las actividades académicas

6.2.1 Pruebas para técnica de moldeo en arena verde

Las primeras pruebas fueron realizadas para el proceso de fundición en arena, en donde se utilizó como modelo un yunque pequeño realizado en impresión 3D y posteriormente enmasillado para dar mejor acabado superficial.

Inicialmente se trabajó con arena rubia, la cual fue comprada en formato de granel por lo que venía húmeda y con pequeñas piedras por lo que tuvo que ser tamizada y secada antes de su uso, posteriormente se almacenó esta arena en sacos y fue llevada al laboratorio de fundición.

Para la primera prueba de fundición, efectuada el 14 de septiembre de 2023, se realizó una mezcla de 22 kg de arena verde compuesta por 84% arena (18,5 kg), 8% bentonita (1,76 kg) y 8% agua (1,76 kg). El proceso de realización de la mezcla se representa en la figura 6-9.



Figura 6-9 Mezcla arena-bentonita.

Para el armado del molde se siguió la técnica tradicional para moldeo en arena verde descrito en el apartado 2.4.3. Sin embargo, se alteraron algunos pasos del procedimiento, entre estos, el llenado de la caja superior no fue completo y no se realizó el secado del molde previamente a la colada. Estos factores influyeron en afectando la rigidez del molde y el grado de humedad de este, respectivamente.

En la figura 6-10 se observa como el vertido del aluminio fundido se realizó directamente desde el horno al molde de arena lo que generó cierta dificultad en la precisión del proceso de colada.



Figura 6-10 1er procedimiento de colado.

En la figura 6-11 se observa el resultado obtenido tras el proceso de colada y solidificación del metal.



Figura 6-11 1era prueba de fundición en arena.

Posteriormente se eliminó el exceso de material mediante un proceso de corte y limado manual, obteniendo así el resultado de la figura 6-12.



Figura 6-12 Resultado 1era prueba de fundición en arena.

Como se puede observar, se presentan múltiples defectos de fundición entre ellos una alta porosidad, un acabado superficial de muy baja resolución, rebabas y llenado incompleto. La porosidad se puede explicar debido a que la arena no fue secada previamente a la colada por lo que al momento en que la arena entró en contacto con el metal fundido, se liberó una gran cantidad de humedad presente en el molde, produciendo la formación de burbujas. Respecto a la baja resolución, ésta se debe principalmente a que el tamaño de grano utilizado era muy grande, además de una gran cantidad de incrustaciones de arena. Las rebabas y llenado incompleto se deben principalmente al desmoronamiento de parte del molde, esto pudo haber ocurrido debido a que el llenado de la mitad superior fue incompleto lo que produjo que la parte superior del moldeo no quedara suficientemente compactada y firme para su manipulación.

Al día siguiente (15 de septiembre de 2023), se realizó una segunda prueba, esta vez utilizando una arena más fina de sílice. La mezcla de arena verde fue preparada utilizando las mismas proporciones que en la primera prueba, se siguió el procedimiento tradicional de moldeo en arena verde descrito en el apartado 2.4.3, esta vez se incluyó el secado de la arena y llenado completo de ambas cajas. En esta ocasión el vertido se realizó utilizando un crisol móvil, lo cual brindó una mayor libertad de movimiento, comodidad y seguridad en el proceso de colado. Sin embargo, la presión metalostática produjo una leve separación de ambas mitades de la caja de moldeo, lo que ocasionó una filtración de colada en el plano divisor de la pieza y afectando el llenado de la misma. Respecto a la calidad superficial obtenida se logró un avance considerable al cambiar el tipo de arena. Es importante mencionar también que para este molde se ubicó uno de los bebederos en medio de la masa del yunque. El resultado obtenido se enseña en la figura 6-13.



Figura 6-13 2da prueba de fundición en arena.

Días después se realiza otra prueba donde se reutiliza la arena fina preparada anteriormente, pero se le añade una parte de arena gruesa para relleno. Se utilizó el mismo procedimiento anterior en la confección del molde, pero esta vez se prestó especial cuidado al proceso de extracción del modelo. Posterior al cierre de las cajas, se colocaron pesos sobre la mitad superior. Estos pesos tendrían como propósito contraponerse a la presión metalostática que se ocasiona durante el vertido. En la figura 6-14 se enseña el resultado de la pieza obtenida una vez concluido el proceso de colada y solidificación.



Figura 6-14 3era prueba de fundición en arena.

La pieza obtenida es fiel al modelo, con buenos acabados superficiales y llenado completo. El único defecto a considerar es un rechupe producido en la mitad del yunque, lo cual se podría deber a una concentración de esfuerzos durante la solidificación. La pieza calidad de la pieza obtenida se considera suficientemente buena para la actividad académica a desarrollar y por lo tanto se toma la tercera prueba de fundición en arena como el protocolo a seguir para la elaboración de moldes en arena verde.

6.2.2 Pruebas para técnica PLA perdido

Respecto a la fabricación del rin se seleccionó la técnica de PLA perdido. Esta decisión se debe a que la geometría del rin no permitía ángulos de desmoldeo, por ende, realizar esta pieza mediante moldeo en arena no era posible.

Para la primera prueba se realiza la impresión de un rin en PLA con relleno 0 y se le recubre con una fina capa de yeso mediante brocha, esto con la intención de conservar la calidad superficial de la pieza. Tras el secado del yeso se lleva el moldeo al laboratorio de fundición y se entierra en arena, dejando un canal de alimentación en donde la colada entraría directamente en contacto con el PLA, tal como se muestra en la figura 6-15. La idea era que el metal fundido quemara el PLA y fuera ocupando el espacio de este dentro del molde.



Figura 6-15 Molde de yeso recubierto en arena.

Durante la prueba se produjo una reacción violenta del PLA al entrar en contacto con el metal fundido, se trató de una evaporación repentina del material, lo que produjo un burbujeo al interior del metal. La pieza obtenida tubo un muy mal llenado, además de múltiples defectos como juntas frías, restos de PLA quemado en la superficie del metal generando un color negro y opaco, rechupes, llenado incompleto y sopladuras. Este resultado se observa en la figura 6-16. Debido a los malos resultados en la pieza y altos riesgos observados durante la prueba, el proceso de verter directamente sobre el PLA fue descartado.

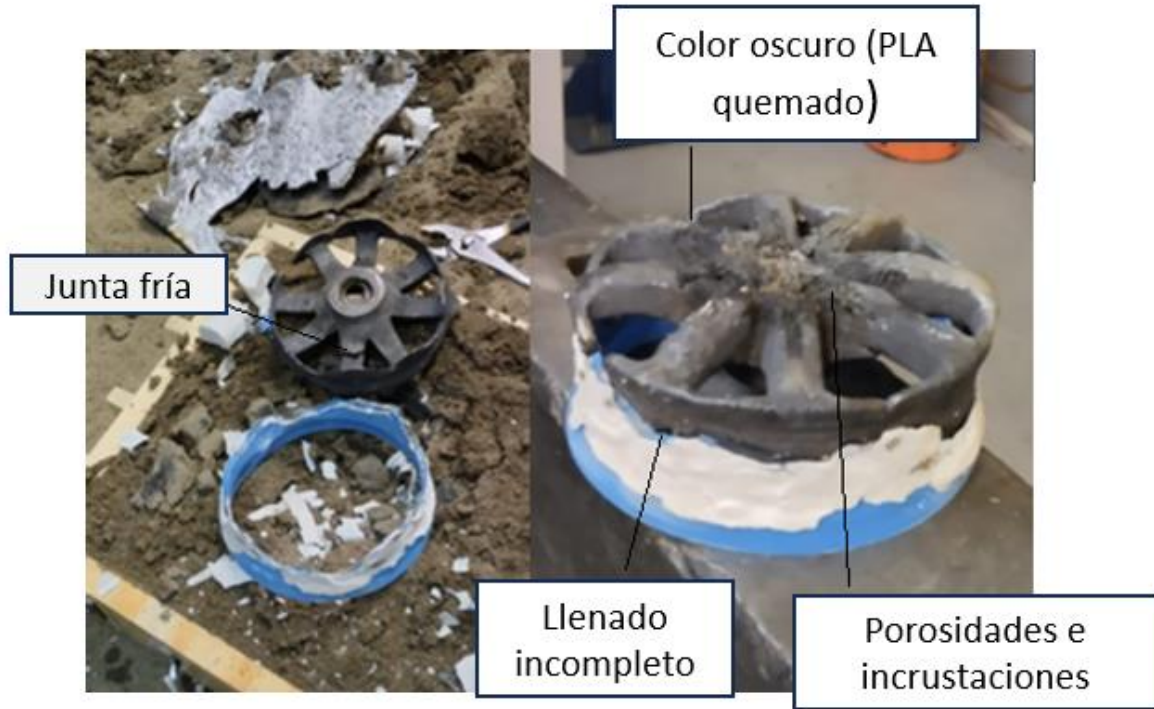


Figura 6-16 Resultado 1rea prueba PLA perdido.

Posteriormente, con la intención de optimizar el tiempo requerido para las pruebas de fundición, se imprimieron varios modelos de moais en impresión 3D, esto debido a que tardaban menos en imprimirse que los rines y eran piezas más sencillas de fundir. Esta vez los moldes también fueron realizados con yeso, pero empleando otra técnica, en donde el modelo es sumergido en yeso y una vez que solidifica, se quema el PLA del modelo dejando así un vaciado con la forma del modelo al interior del bloque de yeso. En el primer intento se eliminó el PLA mediante un soplete de gas licuado, tal como se observa en la imagen 6-17, lo que ocasionó que durante el vertido del metal fundido los remanentes de gas reaccionaran combustionando y generando sopladuras por dentro de todo el material fundido, como resultado se obtuvo una pieza altamente irregular, porosa y frágil. En un segundo intento se volvió a realizar el mismo procedimiento de moldeo, pero esta vez se utilizó un soplete de oxígeno-acetileno para quemar el PLA. Los resultados obtenidos de esta segunda prueba fueron similar a la primera presentándose los mismos problemas y defectos. En las figuras 6-17 y 6-18 se muestran los resultados obtenidos de ambas pruebas.



Figura 6-17 Eliminación PLA con soplete.



Figura 6-18 Resultado 2da prueba PLA perdido.



Figura 6-19 Resultados 2da prueba PLA perdido.

Posteriormente un grupo de alumnos del curso proporcionó un diseño de rin para utilizarlo como modelo de pruebas, este modelo fue impreso con un diámetro de 100 [mm] y relleno 0%, se incluyeron además las mazarotas y el canal de alimentación. El modelo se montó en una cubeta y se sumergió en yeso hasta que ese fraguara. Tanto el modelo de rin, como la elaboración del molde en yeso, se pueden ver en la figura 6-20. En cuanto a la eliminación del PLA, esta vez se decidió optar por quemarlo en un horno de secado, dejando el molde a 300°C durante 12 horas.

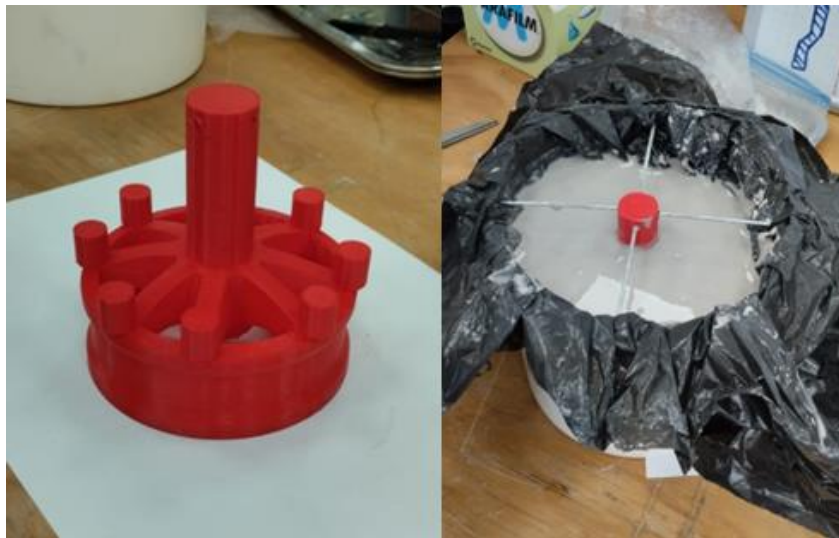


Figura 6-20 Elaboración molde de rin para pruebas.

Tras cumplirse el ciclo dentro del horno, el molde fue llevado al laboratorio de fundición donde se realizó el vertido de aluminio fundido, esta vez no se presentaron inconvenientes durante el procedimiento de colada y se logró obtener la pieza deseada del rin (figura 6-21). Si bien se presentaron algunos errores como pequeñas faltas de llenado en la base o una junta fría, estos errores eran producto de errores de diseño en el modelo y no debido a errores en el procedimiento

de moldeo y fundición utilizado, por lo que el proceso elegido se podía considerar como un resultado suficientemente bueno para la actividad de laboratorio que buscaba realizar.

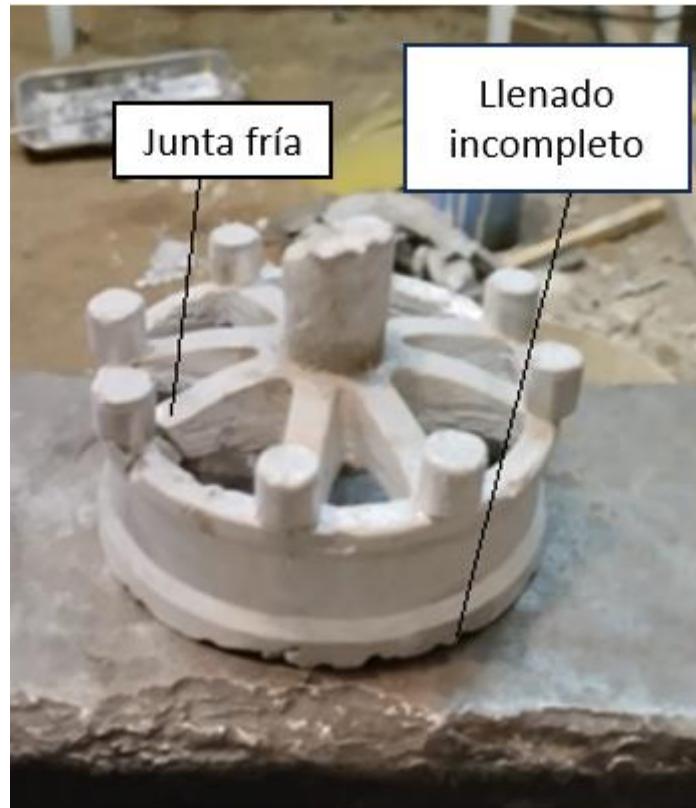


Figura 6-21 Resultado 3era prueba PLA perdido.

Posteriormente se realizaron dos moldes de moais siguiendo el mismo procedimiento de moldeo en yeso, sin embargo, al extraerlos del horno los moldes se fracturaban debido a su alta fragilidad. La solución para poder llevar a cabo las pruebas fue encintar los moldes por fuera de forma de mantener la estructura de estos. Se decidió conservar uno de los moldes como ejemplo para los alumnos (figura 6-22) y utilizar el otro para llevar a cabo el procedimiento de colada, al momento de llevar a cabo dicho proceso no se presentaron inconvenientes. El resultado obtenido fue un moai de alta calidad superficial, pero con “venas” producto del agrietamiento en el molde, posteriormente estos desperfectos fueron limados consiguiendo así piezas de moai de gran calidad, enseñado en la imagen 6-23.

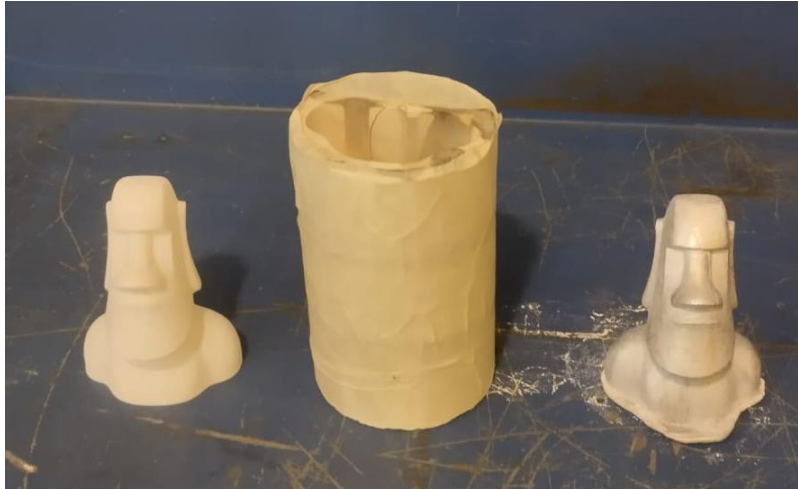


Figura 6-22 Modelo, molde y pieza terminada de moai



Figura 6-23 Resultado 4ta prueba PLA perdido.

Con los últimos resultados obtenidos en las pruebas del rin y de los moais, se consideró que tanto la infraestructura del laboratorio como el procedimiento utilizado para las actividades cumplía con las condiciones adecuadas para llevar a cabo las actividades académicas planificadas.

6.3 Correcciones y parámetros seleccionados

En base a las pruebas piloto realizadas se deciden establecer parámetros a seguir como protocolo para realizar las actividades académicas del laboratorio de fundición y moldeo.

Respecto a la fundición en arena, se decidió optar por la técnica de arena verde usando arena de sílice fina, mezclada con una pequeña parte de arena gruesa. Como composición para la arena de moldeo se fijó un 84% arena, 8% bentonita y 8% agua. El proceso de moldeo en arena será llevado a cabo en horario de clases dentro de la experiencia del laboratorio de fundición utilizando un modelo elaborado por el cuerpo docente.

Para la técnica de PLA perdido, se optó por utilizar una mezcla 5:1 de yeso-cemento para proporcionar mayor resistencia a la fractura en los moldes. En cuanto al proceso de eliminación del PLA, se decidió utilizar el quemado en un horno de secado con un ciclo de 10 horas a 300°C.

Para el diseño de los rines se solicita que se incluyan mazarotas, bebedero y respiradero dentro del modelo 3D, con el propósito de lograr un llenado correcto del molde durante el vertido de metal fundido, evitando defectos como llenado incompleto y rechupes.

Como material de fundición se utiliza chatarra de aluminio la cual debe ser fundida en lingotes de forma previa a la actividad de laboratorio con el fin de optimizar los tiempos de fundición dentro de la clase. La temperatura de sobrecalentamiento para el proceso de colada se fijó en 1100°C.

7. Registro de actividades académicas

Para las actividades académicas del laboratorio de fundición del segundo semestre 2023 se distribuyeron a los alumnos en 13 equipos de trabajo, donde cada equipo debía elaborar un modelo de rin mediante la técnica de PLA perdido siguiendo el procedimiento descrito en el apartado 3.4. Los 13 equipos de alumnos fueron divididos en seis experiencias de laboratorio, programadas para los bloques 1-2 y 3-4 de los días lunes y martes comprendidos entre las fechas de 16 y 31 de octubre. Dentro de cada experiencia se citaron 2 equipos a la vez, con excepción de la experiencia del día 31 de octubre donde participaron 3 grupos.

Previo a las actividades del laboratorio, cada grupo desarrolló un modelo de rin en formato CAD 3D siguiendo las instrucciones y parámetros de diseño establecidos previamente. El diseño incluyó también el sistema de alimentación y mazarotas. Posteriormente, se imprimieron los modelos de cada grupo, de los 13 modelos 12 fueron impresos exitosamente y 1 presentó fallos durante la impresión, debido a que las fechas de las actividades eran muy próximas se le proporcionó a este equipo un modelo de rin provisorio para que pudieran participar de las actividades del laboratorio y se reagendó la fundición de su modelo de rin propio para la semana recuperativa correspondiente a la primera semana de noviembre.

Para la elaboración de los moldes de yeso-cemento, cada grupo fue citado durante la semana previa a la experiencia de fundición, en las instalaciones del laboratorio de manufactura avanzada (maker space), para que en conjunto con el ayudante del laboratorio pudieran llevar a cabo el proceso de moldeo de PLA perdido y registrar dicha actividad.

La experiencia de fundición fue realizada de la siguiente manera:

- Los alumnos tuvieron una charla sobre conceptos teóricos del proceso de fundición y las técnicas de moldeo en arena verde y PLA perdido.
- Posteriormente, se cargó el horno con el material de aluminio y mientras este se fundía, los estudiantes elaboran un molde en arena siguiendo las indicaciones del profesor.
- Tras concluir el molde en arena se procedió a realizar el proceso de colada de los rines en los moldes de Yeso.
- Una vez solidificado el metal se realizó la extracción del modelo y limpieza del mismo mediante el uso de limas.
- Se dieron las conclusiones finales de la actividad y respondió a las preguntas de los alumnos

Tras concluir las experiencias de laboratorio de los 13 grupos, se obtuvieron 11 piezas bien conformadas, que, si bien presentaban defectos menores como micro porosidades, pequeñas faltas de llenado y rebabas, eran suficientemente buenas para el objetivo buscado y aptas para pasar al proceso de mecanizado. Por otra parte, se reagendó una fecha en la semana posterior a las actividades de fundición para que los estudiantes que no lograron obtener una pieza exitosa pudieran volver a realizar este proceso. En las figuras 7-1 a 7-4 se presenta un registro de las actividades realizadas al interior del laboratorio de fundición.



Figura 7-1 Registro de elaboración moldes de arena en actividades académicas.



Figura 7-2 Registro de proceso de colada en actividades académicas.



Figura 7-3 Registro extracción y limpieza de pieza en actividades académicas.



Figura 7-4 Registro equipo de trabajo en actividades académicas.

A medida que los grupos obtuvieron su rin fundido, se les agendó un horario para la etapa final de acabado mediante mecanizado en CNC. Los equipos utilizaron el mismo archivo CAD de su modelo para programar una secuencia de mecanizado. En la figura 7-5 se observa el proceso de mecanizado de uno de los rines.



Figura 7-5 Registro proceso de CNC en actividades académicas.

Tras terminar con las actividades del laboratorio de fundición y etapas de mecanizado, los 13 grupos lograron obtener su pieza terminada. Además de la actividad práctica, se implementó un certamen grupal dentro de la asignatura de procesos de manufactura para evaluar los conocimientos teóricos adquiridos por los alumnos. En la figura 7-6 se presenta el resultado final de las 13 piezas desarrolladas por los equipos.



Figura 7-6 Resultado final de las piezas de los equipos después de las actividades académicas.

8. Conclusiones

Retomando los objetivos propuestos en el capítulo 1, y contrastándolos con lo conseguido al término de las actividades prácticas del laboratorio de fundición, se pueden brindar las siguientes conclusiones:

En cuanto al objetivo principal; “Diseñar e implementar un laboratorio de fundición y moldeo de uso docente para el Santiago Campus San Joaquín de la UTFSM, el cual debe contar con los equipos y condiciones que permitan llevar a cabo actividades pedagógicas con el fin de acercar a los alumnos mediante la experimentación a los procesos industriales de fundición y moldeo”, se puede concluir que tanto el diseño del laboratorio de fundición y moldeo así como su implementación se pudo llevar a cabo con éxito, pues se logró contar con todos los equipos, implementos e infraestructuras que permitieron realizar las actividades pedagógicas planificadas al interior de las instalaciones del laboratorio.

Tras la realización de las actividades académicas propuestas para el laboratorio de fundición y moldeo, los alumnos experimentaron la creación de un modelo de rin desde una fase inicial de diseño y modelación 3D, hasta la obtención de una pieza de aluminio con acabados superficiales en CNC. De los 13 equipos participantes, todos lograron completar cada una de las etapas del proceso (diseño del modelo en CAD 3D, impresión del modelo, elaboración del molde, fundición y mecanizado), lo cual implicó una gran cantidad de trabajo y tiempo por parte de los alumnos y profesores, pues se enfrentaron a las múltiples dificultades que implica el de fundición y moldeo. Una vez concluidas las actividades prácticas los alumnos fueron capaces de relacionar los fallos obtenidos en la pieza con errores de diseño, ejecución de los procesos de moldeo y fundición, programación y/o alineaciones del mecanizado, entre otros. Además, es importante mencionar que el apartado teórico fue reforzado con una evaluación de tipo certamen tras finalizar la experiencia.

En cuanto a los objetivos específicos:

- Se definió un espacio de laboratorio de fundición y moldeo en donde se consideraron todos los equipos, insumos y la infraestructura requerida.
- Se implementaron las instalaciones físicas del laboratorio de fundición y moldeo, bajo estándares que permitieron llevar a cabo las actividades pedagógicas que se buscaba desarrollar.
- Se realizó el diseño de la experiencia de laboratorio integrando el diseño asistido por computadora de un modelo para elaboración de moldes, el proceso de fundición y mecanizado.
- Se desarrollaron las experiencias académicas poniendo a punto a los equipos y evaluando su funcionamiento durante las actividades de fundición del curso MEC161 de la carrera Ingeniería Civil Mecánica de la USM.

8.1 Evaluación de desempeño del laboratorio

Durante las actividades del laboratorio se pudieron poner a prueba las instalaciones del mismo en condiciones reales de operación, a grandes rasgos la experiencia pudo ser llevada cabo sin problemas y todos los equipos, herramientas, suministros y herramientas lograron cumplir su propósito, los alumnos consiguieron observar el proceso de fundición de material, colado y extracción de la pieza en el molde de yeso, además pudieron elaborar un molde utilizando la técnica de moldeo en arena verde.

Si bien las actividades propuestas se cumplieron sin mayores inconvenientes, la práctica deja en evidencia que el laboratorio presenta una serie de puntos en los cuales se debe trabajar para brindar una mejor experiencia a los usuarios, estos serán tratados en el apartado 9 del informe.

A modo general la evaluación de las experiencias del laboratorio de fundición es positiva, ya que los grupos pudieron cumplir con el programa propuesto y obtener la pieza de rin deseada, brindando por primera vez una experiencia práctica para el alumnado en los procesos de fundición y moldeo; Lo cual marca un hito en el campus San Joaquín, convirtiéndose así, en un avance considerable en la rama de procesos de manufactura para la carrera de ingeniería civil mecánica, contribuyendo al aprendizaje y formación de futuros profesionales.

9. Recomendaciones

Como se desarrolló en el capítulo anterior el laboratorio cuenta con una serie de puntos a mejorar, ante esto se proponen las siguientes recomendaciones:

Infraestructura:

En cuanto a la infraestructura del laboratorio recomienda el reemplazo de la mesa de moldeo actual por mesones metálicos los cuales podrían ser tomados desde el área de soldadura, de esta forma se dispondría de una base más estable para trabajar en las cajas de moldeo, así como de una mayor área de trabajo, haciendo posible que trabajen dos equipos a la vez teniendo cada uno su propio molde. Debido a que los mesones requieren de un mayor espacio, se debe mover la repisa de almacenamiento y un esmeril, esta repisa podría ser utilizada como muestrario para las piezas obtenidas desde el laboratorio de fundición y taller de soldadura. Para solventar la pérdida de almacenamiento se sugiere utilizar la zona de almacenaje en el inferior de los mesones e instalar repisas en el muro. Por otra parte, en cuanto al sistema de extracción se sugiere añadir una extensión en el brazo extractor a modo de darle mayor alcance y así brindar más libertad a la campana de extracción. Como mejora adicional se puede añadir también un sistema de poleas que permita regular la altura de la campana. Finalmente, se recomienda instalar perfiles metálicos en los bordes internos del arenero de seguridad para evitar la separación entre la geomembrana y el cajón.

Se puede considerar como una alternativa a largo plazo la adquisición de un nuevo horno de fundición el cual cuente con mayor capacidad tanto en volumen de material fundido, como en temperatura máxima de calentamiento, de esta forma se podrían fundir aleaciones ferrosas, ampliando así la variedad de diseños y materiales posibles en la elaboración de piezas fundidas.

Implementos:

Respecto a los implementos del laboratorio existen algunos que deben ser reemplazados para garantizar una mayor durabilidad y comodidad al momento de realizar la experiencia. En la tabla 9-1 se presentan las recomendaciones para el laboratorio en cuanto al apartado de implementos.

Tabla 9-1 Recomendaciones para implementos del laboratorio.

Elemento	Recomendación
Crisoles	Se debe considerar la compra de crisoles para disponer de repuesto dado que estos se desgastan con el uso.
Pinzas de crisol	Reemplazar las pinzas de crisol por pinzas de hierro fundido.
Apisonadores	Se deben reemplazar los apisonadores existentes realizados en impresión 3D, por unos metálicos que presenten mayor durabilidad y propiedades mecánicas.
Modelo para arena	Reemplazar el modelo existente en impresión 3D por un modelo desarrollado en madera o metal que presente mejores propiedades mecánicas. Lo ideal es contar con varios modelos para fundición en arena dentro del laboratorio.

Gorro de soldador	Se deben completar los sets de EPP añadiendo gorro de soldador para proteger la zona del pelo y cabeza
Cajas de moldeo	Considerar tareas de mantenimiento para las cajas de moldeo a medida que estas se degasten.
Lingoteras	Se deben adquirir lingoteras para facilitar la elaboración de lingotes de aluminio a partir de chatarra
Sistema de encofrado para moldes de yeso.	Se debe elaborar un nuevo sistema de encofrado que ofrezca una operación más sencilla y mayor durabilidad, ya que el sistema utilizado actualmente consiste en un macetero cortado a la mitad y se utiliza cinta para sellarlo. Si bien dio resultado se debe buscar una solución de tipo permanente.
Material de impresión 3D	Se podría implementar el uso de Polycast el cual es un filamento diseñado específicamente para la técnica de material perdido, por lo cual podría facilitar el proceso de quemado del modelo al interior del molde.
Máquina soldadora de aluminio	El disponer de una máquina para soldar aluminio podría ayudar a corregir pequeños errores de falta de llenado en las piezas, antes de pasar a la etapa de mecanizado.

Planificación:

La primera experiencia de laboratorio fue programada justo después de terminar el montaje de las instalaciones y debido a que se disponía de poco tiempo la planificación no fue tan cautelosa, por lo tanto, para mejorar este aspecto se recomienda lo siguiente:

- La realización de los moldes debe ser planificada y agendada con anticipación, se debe contar con bloques horarios establecidos para atender a los equipos de trabajo.
- Contar con un procedimiento para el manejo de residuos del laboratorio en donde estos puedan ser desechados de forma periódica.
- Elaborar un video a modo de guía para la actividad del laboratorio de fundición en el cual los alumnos puedan ver el proceso en detalle previamente a realizar la actividad.
- Realizar un calendario de mantenimiento en donde se considere el mantenimiento de los equipos e instalaciones, así como la compra de insumos de forma periódica.

Entre otras posibles mejoras podría considerarse la integración de otros procesos de función como la fundición centrífuga o la fundición con moldes permanentes, el empleo del laboratorio para labores de investigación y proyectos universitarios de alumnos y profesores. Es importante también considerar la vinculación del proceso de fundición con otros procesos de manufactura presentes en la universidad o con aquellos que podrían integrarse en un futuro.

Las recomendaciones brindadas en este apartado tienen como fin mejorar la experiencia de las actividades en el laboratorio de fundición. Es fundamental mantener un enfoque de mejora continua ante otras posibles mejoras y recomendaciones que puedan surgir de forma posterior, de este modo se consigue un progreso constante en el laboratorio y en la calidad de las actividades que se realicen.

10. Referencias bibliográficas

- [1] D. Tien, «What is Green Sand Casting?,» [En línea]. Available: <https://vietnamcastiron.com/green-sand-casting/>.
- [2] M. Groover, Fundamentos de manufactura moderna, McGraw-Hill, 2007.
- [3] E. Gilardoni, «Flujos laminares, turbulentos o una transición entre ambos,» [En línea]. Available: <https://studylib.es/doc/4629418/flujos-laminares--turbulentos-o-una-transici%C3%B3n-entre-ambos>.
- [4] D. Hidalgo y D. Velastegui, «Optimización del proceso de fundición de aluminio para reducir los defectos en piezas artesanales mediante la sustitución de la arena de moldeo e implementación de desgasificante en la colada.,» Guayaquil, 2021.
- [5] E. Alvarez, «Fundamentos de Procesos de Fundición de Metales,» [En línea]. Available: <https://slideplayer.es/slide/10716914/>.
- [6] ikastaroak, «DMMF03.- Diseño de la pieza y el molde para fundición por gravedad,» [En línea]. Available: https://ikastaroak.ulhi.net/edu/es/DFM/DMMF/DMMF03/es_DFM_DMMF03_Contenidos/sing lepage_index.html.
- [7] Rapid Direct, «11 tipos diferentes de proceso de fundición,» 19 Junio 2022. [En línea]. Available: <https://www.rapiddirect.com/es/blog/different-types-of-casting-process/>.
- [8] ikastaroak, «DMMF01.- Selección de moldes y modelos de fundición,» [En línea]. Available: https://ikastaroak.ulhi.net/edu/es/DFM/DMMF/DMMF01/es_DFM_DMMF01_Contenidos/we bsite_132_moldeo_en_moldes_de_arena.html.
- [9] «Arenas de moldeo,» 13 Julio 2020. [En línea]. Available: <https://www.slideshare.net/marycristobal3/arenas-de-fundicion>.
- [10] R. P. Jorge, «Moldeo de precisión,» Universidad politécnica de Valencia, 22 Octubre 2018. [En línea]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=bfggFMERV-M>.
- [11] engineering product design, «Investment Casting,» 16 enero 2022. [En línea]. Available: <https://engineeringproductdesign.com/knowledge-base/investment-casting/>.
- [12] F. Cosios, «Estudio del Proceso de Fundición de Aleaciones No Ferrosas en moldes de yeso,» Guayaquil, 1996.
- [13] M. Diaz-Aleman, C. Meier, L. Pérez-Conesa y J. Saorin, «Fundición artística de objetos complejos impresos en 3D con PLA (ácido poliláctico) como alternativa al modelo de cera.,» 2019. [En línea]. Available: <https://doi.org/10.5209/aris.60906>.

- [14] M. J. Reig Pérez, «Fundición en molde permanente,» Octubre O 2018. [En línea]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=lrlecu0Dz0o>.
- [15] B. Ravi, «Casting Defects,» Julio 2022. [En línea]. Available: <https://www.slideshare.net/slideshow/120048832castingdefectspptpdf/252209612>.
- [16] G. Caiza y F. Guzmán, «Aseguramiento de la calidad en las fundiciones de aluminio, en base a los procedimientos de moldeo en el laboratorio de fundición de la facultad mecánica,» Riobamba-Ecuador, 2011.
- [17] S. Babu y R. Mathivanan, *Getting Started with Inventor HSM for Designers and Engineers*, Bangalore, 2014.
- [18] Nabertherm, Hornos de fusión con calentamiento, Lilienthal, 2020.
- [19] Falabella, «sodimac.falabella.com,» [En línea]. Available: <https://sodimac.falabella.com/sodimac-cl/product/110044000/Compresor-de-aire-portatil-2-HP-50-litros/110044002>. [Último acceso: arzo 2024].
- [20] R. Portal-Nodarse, M. Dumpun-Fonseca, E. Ibarra-Hernandez y J. Fabelo, «Análisis de riesgo en una fundición de metales no ferrosos (aluminio) y su impacto ambiental,» Mayo 2012. [En línea]. Available: http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S2224-61852012000100009&script=sci_arttext&tlng=en.
- [21] E. Salado, «Los 5 mejores software CAD para diseño industrial, fabricación y simulaciones (y últimas tendencias en diseño CAD),» [En línea]. Available: <https://softwaredoit.es/software-industrial/software-cad.html>.
- [22] M. Lynch, «CNC o control numérico por computadora: qué es y cómo funciona,» 01 Abril 2023. [En línea]. Available: <https://www.mms-mexico.com/articulos/cnc-o-control-numericopor-computadora-que-es-y-como-funciona>.

11. Anexos

11.1 Conceptos

11.1.1 Diseño CAD 3D:

Un diseño CAD 3D es un modelo tridimensional creado utilizando software de diseño asistido por computadora (CAD, por sus siglas en inglés). El término "CAD" hace referencia a un conjunto de herramientas y técnicas que permiten a los diseñadores crear representaciones digitales precisas y detalladas de objetos, edificios o componentes mecánicos en tres dimensiones.

En un diseño CAD 3D, el modelo se representa utilizando geometría tridimensional, lo que significa que el objeto se puede ver desde todos los ángulos y se captura su volumen y forma completa. Los diseños CAD 3D son una parte esencial de la ingeniería y el diseño en diversas industrias, como la arquitectura, la ingeniería mecánica, la industria automotriz, la manufactura, la medicina y muchos otros campos.

El proceso de creación de un diseño CAD 3D generalmente implica utilizar software especializado que permite al diseñador dibujar, modelar y editar el objeto de manera interactiva en un entorno de computadora. Algunos de los softwares de modelado 3D más populares incluyen Autodesk Fusion 360, SolidWorks, CATIA, Micro Station, SketchUp, entre otros [21].

Los diseños CAD 3D ofrecen numerosas ventajas sobre los diseños 2D tradicionales, ya que permiten una visualización más realista y detallada del objeto, lo que facilita la identificación de problemas potenciales y la realización de ajustes antes de la fabricación real. Además, los diseños CAD 3D pueden ser utilizados para realizar simulaciones, análisis de resistencia, estudios ergonómicos y pruebas virtuales, lo que ayuda a mejorar la eficiencia y precisión del proceso de diseño y a reducir costos y tiempo en la fase de prototipado.

Una vez que el diseño CAD 3D está completo, se puede utilizar para diversas aplicaciones, incluyendo la impresión 3D, la fabricación CNC (control numérico por computadora), la animación, la realidad virtual y la realidad aumentada. También se puede compartir y colaborar fácilmente con otros profesionales, lo que facilita el trabajo en equipo y la comunicación durante el proceso de diseño y desarrollo del producto. En resumen, los diseños CAD 3D son una herramienta valiosa e imprescindible para la creación y desarrollo de productos en la era moderna.

11.1.2 CNC

El CNC, que significa "Control Numérico Computarizado" por sus siglas en inglés (Computer Numerical Control), se refiere a un sistema automatizado utilizado en la fabricación y procesos industriales para controlar y guiar herramientas y maquinaria mediante comandos programados. En un sistema CNC, un ordenador o controlador recibe instrucciones numéricas y codificadas, a menudo en forma de código G, que describen las acciones específicas que la máquina debe realizar [22].

Este enfoque permite la automatización precisa de operaciones como fresado, torneado, taladrado y otros procesos de mecanizado. El CNC reemplaza los sistemas manuales tradicionales al utilizar tecnología informática para controlar la posición, velocidad y acciones de herramientas y dispositivos de trabajo en máquinas, lo que resulta en una producción eficiente, repetible y de alta precisión. Este sistema es esencial en la fabricación moderna, permitiendo la producción de componentes y productos con tolerancias ajustadas y formas complejas.