



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería Mecánica

**DISEÑO, FABRICACIÓN Y VALIDACIÓN DE
MODELOS DESECHABLES OBTENIDOS
MEDIANTE IMPRESIÓN 3D PARA SU USO EN
PROCESOS DE MOLDEO EN ARENA.**

Autor:

BARRIO MARTÍN, MARTA

Tutor:

Santos Martín, Francisco Javier

Departamento de CMeIM/EGI/ICGF/EM/IPF.
Área de Ingeniería de los Procesos de
Fabricación.

Valladolid, mayo 2022.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres y mi hermana, por estar a mi lado durante todo este proceso y celebrar mis triunfos como si fuesen suyos.

A mis amigas, por apoyarme tanto durante todos estos últimos años y confiar en que podía lograrlo.

A los que empezaron siendo tan solo compañeros de clase, pero ahora son grandes amigos. Siempre he dicho que no habría logrado esto yo sola. Siguen esperándonos muchas más aventuras juntos.

A Francisco y Julián, por la dedicación, la ayuda y el tiempo invertido. Gracias a ellos todo esto ha sido posible.

A todos vosotros, muchas gracias.

RESUMEN

El objetivo de este trabajo era el uso de modelos desechables impresos en 3D en PLA para ser usados en procesos de moldeo en arena. Pretendía ser una mejora de los procesos tradicionales que redujese errores habituales.

El trabajo consta de la fase de diseño del modelo empleando CATIA-V5 y posteriormente su impresión en 3D.

Sin embargo, la idea original no fue viable ya que, tras las pruebas en el taller, se decidió que era un proceso demasiado peligroso. Por eso, se optó por intentar eliminar el PLA antes de realizar la colada del metal mediante un soplete y un horno, siendo esta última la opción elegida. Tras esto, se realizó la colada del metal para obtener la pieza en bronce.

Palabras claves: fundición de metal, moldeo en arena, modelo desechable, diseño 3D, impresión 3D.

ABSTRACT

The aim of this project was to use 3D printed disposable models in PLA to be used in sand moulding processes. It was intended to be an improvement of traditional processes to reduce common errors.

The project consists of the design phase of the model using CATIA-V5 and then its 3D printing.

However, the original idea was not viable because, after tests in the workshop, it was too dangerous. Therefore, it was tried to remove the PLA before metal casting using a blowtorch and an oven. Finally, the second option was chosen. After this, the metal was cast to obtain the bronze part.

Keywords: metal casting, sand moulding processes, disposable model, 3D design, 3D printing



ÍNDICE

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Introducción	2
1.2 Antecedentes	4
1.3 Objetivos.....	4
1.4 Estructura	5
CAPÍTULO II: ESTADO DEL ARTE.....	8
2.1 Introducción	9
2.2 Molde.....	12
2.2.1 Arenas.....	12
2.2.2 Aglutinantes y aglomerantes.....	13
2.2.3 Moldes para fundición en arena.....	14
2.2.4 Compactación	15
2.3 Modelo.....	16
2.4 Machos o núcleos.....	18
2.5 Sistema de alimentación.....	18
2.6 Proceso de fundición	19
2.6.1 Calentamiento y vertido del metal.....	20
2.6.2 Solidificación y enfriamiento.....	24
2.6.3 Tiempo de solidificación.....	27
2.6.4 Contracción	28
2.7 Defectos y cómo intentar evitarlos.....	30
2.7.1 Tipos de defectos.....	30



2.7.2 Prevención.....	32
CAPÍTULO III: DISEÑO EN 3D.	34
3.1 Introducción	35
3.2 Software empleado.....	35
3.3 Primer modelo diseñado	36
3.3.1 Modificación del primer modelo	38
3.4 Segundo modelo diseñado	39
3.4.1 Modificación del segundo modelo.....	40
3.5 Tercer modelo diseñado.....	42
CAPÍTULO IV: IMPRESIÓN EN 3D.	45
4.1 Introducción	46
4.2 Software empleado.....	46
4.3 Impresora empleada	47
4.4 Material impreso.....	49
4.5 Parámetros empleados en la impresión	50
4.6 Primeros modelos y sus defectos.....	51
4.7 Modelo final impreso	53
CAPÍTULO V: DESARROLLO PRÁCTICO EN EL TALLER DEL PROCESO DE MOLDEO EN ARENA.	58
5.1 Experiencia 1: Pruebas previas en el taller.....	59
5.1.1 Introducción	59
5.1.2 Metal empleado	59
5.1.3 Arenas empleadas	60
5.1.4 Geometría que se pretende alcanzar.....	60
5.1.5 Proceso realizado	61



5.1.6 Conclusiones.....	67
5.2 Experiencia 2: Utilización de un soplete para fundir el modelo impreso en PLA.....	68
5.2.1 Introducción	68
5.2.2 Proceso realizado	68
5.2.3 Conclusiones.....	75
5.3 Experiencia 3: Utilización de un horno para fundir el modelo impreso en PLA y obtención de la pieza final.....	76
5.3.1 Introducción	76
5.3.2 Primera parte de la experiencia: eliminación del PLA.....	76
5.3.3 Segunda parte de la experiencia: obtención de la pieza final.....	80
CAPÍTULO VI: CÁLCULOS Y MEDICIONES.....	84
6.1 Dimensiones del modelo 3 junto a su asiento, diseñados utilizando CATIA-V5.....	85
6.2 Dimensiones del modelo 3 junto a su asiento, impresos en PLA.....	85
6.3 Dimensiones de la pieza final obtenida en bronce	86
6.4 Derivaciones dimensionales	87
CAPÍTULO VII: COSTES ECONÓMICOS.....	89
7.1 Introducción	90
7.2 Materiales empleados.....	90
7.3 Costes directos	91
7.4 Costes indirectos	94
7.5 Costes totales	94
CAPÍTULO VIII: CONCLUSIONES.....	95
8.1 Conclusiones.....	96
8.2 Líneas futuras	98



Universidad de Valladolid

DISEÑO, FABRICACIÓN Y VALIDACIÓN DE MODELOS DESECHABLES
OBTENIDOS MEDIANTE IMPRESIÓN 3D PARA SU USO EN
PROCESOS DE MOLDEO EN ARENA.



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

CAPÍTULO IX: BIBLIOGRAFÍA.....	99
9.1 Bibliografía	100
ANEXOS	103
ANEXO 1: Cálculo de la masa de bronce necesaria en el proceso de fundición.	103
ANEXO 2: Planos del modelo 3 y de su asiento.	105



ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. Partes de un molde. (a) Molde abierto sencillo. (b) Molde cerrado complejo. Fuente [1].	15
FIGURA 2. Curva de enfriamiento para un metal puro durante la fundición. Fuente [1].	25
FIGURA 3. Estructura característica de los granos en un fundido. Fuente [1].	26
FIGURA 4. a) Diagrama de fase para un sistema de aleación cobre-níquel. b) Curva de enfriamiento asociada para una composición de 50% Ni y 50% Cu, durante la fundición. Fuente [1].	26
FIGURA 5. Estructura de grano característica de un fundido de aleación. Fuente [1].	27
FIGURA 6. Etapas en la contracción de un fundido cilíndrico durante la solidificación y enfriamiento. Fuente [1].	29
FIGURA 7. Logotipo de software Catia. Fuente: Imágenes de Google.	35
FIGURA 8. Modelo 1. Aspecto exterior. Fuente: elaboración propia empleando Catia.	37
FIGURA 9. Modelo 1. Aspecto interior. Fuente: elaboración propia empleando Catia.	37
FIGURA 10. Modelo 1 modificado. Aspecto exterior. Fuente: elaboración propia empleando Catia.	38
FIGURA 11. Modelo 1 modificado. Aspecto interior. Fuente: elaboración propia empleando Catia.	38
FIGURA 12. Modelo 2. Aspecto exterior. Fuente: elaboración propia empleando Catia.	39
FIGURA 13. Modelo 2, vista perfil. Fuente: elaboración propia empleando Catia.	40



FIGURA 14. Modelo 2. Aspecto interior. Fuente: elaboración propia empleando Catia.....	40
FIGURA 15. Modelo 2 modificado. Aspecto exterior. Fuente: elaboración propia empleando Catia.	41
FIGURA 16. Modelo 2 modificado, vista perfil. Fuente: elaboración propia empleando Catia.	41
FIGURA 17. Modelo 2 modificado. Aspecto interior. Fuente: elaboración propia empleando Catia.	42
FIGURA 18. Asiento para el modelo 2. Fuente: elaboración propia empleando Catia.	42
FIGURA 19. Modelo 3. Aspecto exterior. Fuente: elaboración propia empleando Catia.	43
FIGURA 20. Modelo 3, vista perfil. Fuente: elaboración propia empleando Catia.	44
FIGURA 21. Modelo 3. Aspecto interior. Fuente: elaboración propia empleando Catia.	44
FIGURA 22. Asiento para el modelo 3. Fuente: elaboración propia empleando Catia.	44
FIGURA 23. Logotipo del software Cura. Fuente: Imágenes de Google.	46
FIGURA 24. Impresora Creatily Ender Pro 3 disponible en el laboratorio. Fuente: elaboración propia.	48
FIGURA 25. Detalle de la estructura cuadrículada. Fuente: elaboración propia.	48
FIGURA 26. Detalle de los parámetros seleccionados por el usuario en la impresión. Fuente: Software Cura.	50
FIGURA 27. Modelo erróneo por problema de voladizo. Fuente: elaboración propia empleando Cura.	51



FIGURA 28. Contacto puntual del modelo. Problema por voladizo. Fuente: elaboración propia empleando Cura.	52
FIGURA 29. Contacto completo de la superficie inferior de la pieza. Fuente: elaboración propia empleando Cura.	52
FIGURA 30. Detalle del contacto completo de la superficie inferior. Fuente: elaboración propia empleando Cura.	53
FIGURA 31. Modelo 3. Fuente: elaboración propia empleando Cura.	54
FIGURA 32. Modelo 3. Contacto completo de la superficie inferior. Fuente: elaboración propia empleando Cura.	54
FIGURA 33. Asiento para el modelo 3. Fuente: elaboración propia empleando Cura.	55
FIGURA 34. Asiento para el modelo 3. Contacto de la superficie inferior. Fuente: elaboración propia empleando Cura.	55
FIGURA 35. Modelo 3 impreso en PLA. Fuente: elaboración propia.	56
FIGURA 36. Modelo 3 impreso en PLA. Fuente: elaboración propia.	56
FIGURA 37. Modelo 3 impreso en PLA. Fuente: elaboración propia.	57
FIGURA 38. Asiento diseñado para el modelo 3. Diferentes perspectivas. Fuente: elaboración propia.	57
FIGURA 39. Simulación del modelo 3 junto a su asiento. Fuente: elaboración propia.	57
FIGURA 40. Geometría que se pretende obtener en la prueba. Diferentes perspectivas. Fuente: elaboración propia.	60
FIGURA 41. Molde preparado junto al detalle de la eliminación de material en el modelo. Fuente: elaboración propia.	61
FIGURA 42. Aleación de bronce preparada en el crisol para ser fundida. Fuente: elaboración propia.	62
FIGURA 43. Fundición del bronce. Fuente: elaboración propia.	62



FIGURA 44. Placa que impide la entrada de impurezas al modelo. Fuente: elaboración propia.	63
FIGURA 45. Secuencia de imágenes del proceso de colada sobre el modelo. Fuente: elaboración propia.	64
FIGURA 46. Modelo quemado tras la colada realizada. Fuente: elaboración propia.	65
FIGURA 47. Pieza en bronce obtenida. Fuente: elaboración propia.	65
FIGURA 48. Comparación del modelo impreso en PLA y la pieza final en bronce. Fuente: elaboración propia.	66
FIGURA 49. Comparación de los detalles reproducidos en la pieza final que provenían del modelo en PLA. Fuente: elaboración propia.	66
FIGURA 50. Molde preparado con el asiento del modelo. Fuente: elaboración propia.	68
FIGURA 51. Colocación del modelo sobre el asiento pegado con pegamento. Fuente: elaboración propia.	69
FIGURA 52. Molde completo preparado. Fuente: elaboración propia.	69
FIGURA 53. Semi molde superior junto al modelo. Fuente: elaboración propia.	70
FIGURA 54. Imperfecciones debidas a la adhesión del pegamento en las arenas. Fuente: elaboración propia.	71
FIGURA 55. Secuencia de la fundición del modelo impreso en PLA empleando un soplete. Fuente: elaboración propia.	73
FIGURA 56. Defecto en las arenas quemadas. Fuente: elaboración propia. ..	74
FIGURA 57. Defecto en las arenas quemadas. Fuente: elaboración propia. ..	74
FIGURA 58. Defecto en las arenas quemadas. Fuente: elaboración propia. ..	75
FIGURA 60. Molde preparado antes de ser introducido al horno. Fuente: elaboración propia.	77



FIGURA 61. Temperatura del proceso que se realiza en el horno. Fuente: elaboración propia.	78
FIGURA 62. Proceso de eliminación del PLA en el horno. Fuente: elaboración propia.....	79
FIGURA 63. Resultado tras el proceso de horneado. Fuente: elaboración propia.	79
FIGURA 64. Resultado de las arenas compactas tras el proceso de horneado. Fuente: elaboración propia.	80
FIGURA 65. Crisol que contiene la aleación de bronce. Fuente: elaboración propia.....	81
FIGURA 66. Cavidad del molde rellena de la aleación de bronce. Fuente: elaboración propia.	82
FIGURA 67. Desmoldeo de la pieza. Fuente: elaboración propia.....	82
FIGURA 68. Pieza final obtenida. Fuente: elaboración propia.....	83



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Ventajas y limitaciones de los diferentes procesos de fundición en los que se emplean moldes desechables. Fuente [2].....	11
Tabla 2. Características del proceso de fundición en arena. Fuente [2].	12
Tabla 3. Términos de la ecuación 1. Fuente [1].	20
Tabla 4. Términos de la ecuación 2. Fuente [1].	21
Tabla 5. Términos de la ecuación 5. Fuente [1].	22
Tabla 6. Términos de la ecuación 6. Fuente [1].	23
Tabla 7. Términos de la ecuación 7. Fuente [1].	23
Tabla 8. Términos de la ecuación 8. Fuente [1].	28
Tabla 9. Dimensiones del modelo 3 y su asiento, diseñados en CATIA-V5. Fuente: elaboración propia.	85
Tabla 10. Dimensiones del modelo 3 tomadas con un pie de rey digital. Fuente: elaboración propia.	86
Tabla 11. Dimensiones de la pieza en bronce. Fuente: elaboración propia. ..	86
Tabla 12. Derivaciones dimensionales del modelo de PLA respecto del teórico. Fuente: elaboración propia.	87
Tabla 13. Derivaciones dimensionales de la pieza de bronce respecto del modelo teórico. Fuente: elaboración propia.	87
Tabla 14. Derivaciones dimensionales de la pieza en bronce respecto del modelo de PLA. Fuente: elaboración propia.	88
Tabla 15. Estimación de días útiles trabajados. Fuente: elaboración propia.	91
Tabla 16. Gasto anual que supone contratar un trabajador. Fuente: elaboración propia.	91
Tabla 17. Horas empleadas en la elaboración del TFG. Fuente: elaboración propia.	92



Universidad de Valladolid

DISEÑO, FABRICACIÓN Y VALIDACIÓN DE MODELOS DESECHABLES
OBTENIDOS MEDIANTE IMPRESIÓN 3D PARA SU USO EN
PROCESOS DE MOLDEO EN ARENA.



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

Tabla 18. Costes directos amortizables. Fuente: elaboración propia.....	93
Tabla 19. Costes directos no amortizables. Fuente: elaboración propia.....	93
Tabla 20. Costes directos totales. Fuente: elaboración propia.	94
Tabla 21. Costes indirectos totales. Fuente: elaboración propia.....	94
Tabla 22. Costes totales del TFG. Fuente: elaboración propia.....	94



Universidad de Valladolid

DISEÑO, FABRICACIÓN Y VALIDACIÓN DE MODELOS DESECHABLES
OBTENIDOS MEDIANTE IMPRESIÓN 3D PARA SU USO EN
PROCESOS DE MOLDEO EN ARENA.



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.



1.1 Introducción

La **fundición** es un proceso en el cual el metal líquido fluye hacia un molde debido a una fuerza, como podría ser la de la gravedad, lugar en el cual se solidifica adquiriendo la forma de la cavidad de dicho molde. Este término también es aplicado a aquellos objetos que son fabricados mediante este proceso.

Los orígenes de la fundición se encuentran alrededor del año 4000 a.C. El primer metal que se descubrió fue el oro, el cual fue ampliamente utilizado por las civilizaciones antiguas debido a que era maleable y lograban darle la forma que deseaban a base de martillazos a temperatura ambiente. Sin embargo, el posterior descubrimiento del cobre, donde dicho proceso de darle forma a base de martillazos no era tan sencillo debido al endurecimiento por deformación, creó la necesidad de que se originase la fundición.

Se cree que la primera vez se produjo por accidente durante la reducción del mineral de cobre cuando este estaba siendo preparado para que posteriormente se martillase. Se atribuye el descubrimiento a Mesopotamia y se difundió rápidamente por el resto del mundo antiguo.

Supuso un gran avance ya que se podían obtener herramientas más complejas y sofisticadas, además de ornamentos, joyas, etc. Dos de los productos más importantes asociados con el desarrollo de la fundición fueron las campanas y el cañón. [1]

Sin embargo, el proceso de **fundición empleando moldes de arena** comenzó a desarrollarse más tarde, en torno al siglo XVII, debido a la necesidad de elaborar elementos de guerra durante la Revolución Industrial.



Hoy en día, sigue empleándose este proceso usando arenas, debido a su versatilidad a la hora de obtener diferentes piezas. Como es lógico, a lo largo de estos siglos, se han ido introduciendo mejoras en el proceso, por ejemplo, en relación a las arenas, donde destaca el uso de la de sílice y cuarzo, gracias a su buena funcionalidad a pesar de su bajo coste. También, se introdujeron aglutinantes, que aportan cohesión y plasticidad a las arenas, diferentes aditivos que mejoran el acabado superficial de las piezas o incluso desmoldeantes que tratan de evitar la aparición de imperfecciones en la superficie de la pieza.

Durante mucho tiempo, los modelos empleados en este tipo de fundición han sido de materiales como madera, aluminio, fundición u otros, pero existe un inconveniente a la hora de trabajar con estos materiales. Históricamente, este proceso se suele realizar empleando dos semi moldes llenos de arena compacta donde es colocado el modelo de, por ejemplo, madera. Una vez la forma de dicho modelo queda alojada en las arenas, los semi moldes se abren y se retira la pieza de madera. Al retirarla, pueden generarse imperfecciones en las arenas, ya que puede producirse algún tipo de desprendimiento en ellas y esto, por tanto, provocar problemas en la superficie de la pieza que posteriormente queremos obtener. [2]

Se pretende estudiar a lo largo de este trabajo de fin de grado la posibilidad de realizar este proceso de fundición con arenas empleando **modelos desechables** que sean diseñados previamente y, posteriormente impresos mediante una impresora 3D, en vez de modelos reutilizables como serían en nuestro ejemplo los de madera. Lo que se lograría sería evitar el paso en el que los semi moldes son abiertos y el modelo es retirado, reduciendo, por tanto, las posibilidades de que haya imperfecciones en la superficie de la pieza fruto de desprendimientos en las arenas.



1.2 Antecedentes

En la actualidad, la fundición empleando moldes de arena sigue siendo una de las formas de fundición más usadas gracias a la versatilidad que ofrece en cuanto a la obtención de diferentes geometrías en las piezas y los distintos volúmenes de producción que se pueden fabricar. [2]

En relación con las diferentes mejoras que se han introducido hasta ahora que tienen que ver con la impresión 3D, se han centrado en el diseño y la posterior impresión de los moldes necesarios para la realización del proceso. [3]

Sin embargo, a lo largo de este Trabajo de Fin de Grado (TFG) se estudiará la posibilidad de la realización de dicho proceso diseñando e imprimiendo el modelo que se quiere obtener como pieza final, usando para ello, moldes o semi moldes tradicionales con arenas compactas.

1.3 Objetivos

A lo largo de este trabajo que se ha realizado se plantean diferentes objetivos. Sin embargo, el principal es la mejora del proceso de fundición mediante colada directa empleando moldes con arena compacta que se ha realizado tradicionalmente. Se pretende diseñar un modelo el cual sea desechable que permita no tener que abrir los semi moldes y así, evitar posibles desperfectos que puedan originarse en las arenas al retirar el modelo.

Por tanto, de esta manera se quiere obtener una pieza que sea lo más parecida posible al modelo diseñado e impreso en 3D, que posea un buen acabado superficial. Las dimensiones y los detalles del modelo deben quedar reproducidos en la pieza que se obtenga como resultado final. Se cuantificará, empleando la metrología, valorando de tal modo cómo de fieles son las piezas obtenidas con relación al modelo.



Para lograr un modelo que sea adecuado, deberá realizarse un correcto proceso de diseño en 3D, en el cual todas las modificaciones que sufra el modelo deberán estar justificadas debidamente. Del mismo modo ocurrirá con el proceso de impresión.

Además, deberá quedar reflejado el resultado obtenido y una previsión del coste que alcanza la realización del trabajo de fin de grado completo.

1.4 Estructura

La memoria del trabajo se estructura en diferentes capítulos, los cuales quedan descritos a continuación.

- **Capítulo I: Introducción.**

Se trata de un capítulo introductorio. En él, se comenta brevemente el origen de los procesos de fundición, en concreto de los que se han realizado tradicionalmente empleando moldes de arena y las innovaciones que se pretenden introducir. Además, se describen los objetivos que se quieren alcanzar y los antecedentes que existen actualmente. Por último, se plantea la estructura que presenta la memoria de este trabajo de fin de grado.

- **Capítulo II: Estado del arte.**

A lo largo de este capítulo, se describe un marco teórico con los contenidos fundamentales necesarios para lograr entender lo expuesto en el presente trabajo de fin de grado, además de los estudios relacionados con el tema que se han realizado previamente.



- **Capítulo III: Diseño en 3D.**

Se describe el proceso de diseño del modelo desechable que pretendemos emplear en la fundición con moldes de arena, con sus debidas modificaciones y sus justificaciones. Además, se detalla el software empleado.

- **Capítulo IV: Impresión en 3D.**

Se detalla el proceso de impresión 3D empleando un determinado software del modelo generado previamente. Además, se indican los materiales empleados, la impresora, los parámetros seleccionados en el software y los posibles inconvenientes que hayan surgido a la hora de realizar la impresión.

- **Capítulo V: Desarrollo práctico en el taller del proceso de moldeo en arena.**

En el cuarto capítulo, queda descrita la parte experimental del trabajo, donde se lleva a cabo el proceso de fundición empleando moldes de arena en el taller. Se indican los problemas que aparecen a lo largo de esta práctica.

- **Capítulo VI: Cálculos y mediciones.**

Se realizan unos cálculos y mediciones con el fin de comparar las dimensiones y poder cuantificar las diferencias entre el modelo que fue diseñado inicialmente y el modelo que obtenemos tras la fundición.

- **Capítulo VII: Costes económicos.**

Se pretende realizar un estudio económico del trabajo de fin de grado donde se tienen en cuenta los costes directos e indirectos que intervienen en la realización de este.



- **Capítulo VIII: Conclusiones.**

Se exponen las conclusiones que se alcanzan al final del trabajo y se aportan unas posibles líneas futuras que se podrían llevar a cabo.

- **Capítulo IX: Bibliografía.**

Se añade la bibliografía que se ha empleado y consultado para la realización del trabajo de fin de grado y la posterior redacción de la memoria.

- **Anexos**

Se adjuntan cálculos y planos útiles para un óptima comprensión del trabajo realizado.



Universidad de Valladolid

DISEÑO, FABRICACIÓN Y VALIDACIÓN DE MODELOS DESECHABLES
OBTENIDOS MEDIANTE IMPRESIÓN 3D PARA SU USO EN
PROCESOS DE MOLDEO EN ARENA.



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

CAPÍTULO II: ESTADO DEL ARTE.



2.1 Introducción

La fundición empleando moldes de arena se ha utilizado de manera tradicional a lo largo de la historia y actualmente sigue siendo la forma prevaleciente de fundición por su gran versatilidad, logrando piezas de gran variedad de tamaños y pudiendo variar el volumen de producción según la necesidad. Sin embargo, posee limitaciones en el acabado superficial, necesitando generalmente un mecanizado posterior.

El proceso consiste en la colocación en la arena, la cual puede ser previamente tratada, de un modelo cuya forma es la que se pretende obtener posteriormente en la fundición para lograr que se quede impreso en la arena. Después, se le incorpora un sistema de alimentación y se retira el modelo para proceder al llenado de la cavidad principal del molde con el metal fundido. Tras el enfriamiento y la solidificación de dicho metal fundido, se separa el molde de arena, se retira la fundición y se procede a la inspección de la pieza para comprobar si tiene defectos como podrían ser rechupes, porosidades, falta de llenado del molde, etc.

Para la obtención de una pieza que cumpla las características que se desean, se debe disponer de un diseño y de una fabricación correctas del modelo y de los elementos que sean necesarios para el molde de arena.

Uno de los primeros aspectos que se deben conocer y tener en cuenta es la clasificación de los tipos de moldes, la cual se expone a continuación [2]:

- Moldes desechables.

Suelen producirse con materiales como arena, cerámica, yeso o similares los cuales están mezclados con agentes de unión denominados aglutinantes con el fin de mejorar sus propiedades. Hemos de tener en cuenta que dichos materiales son refractarios, es decir, que soportan las altas temperaturas



provenientes de los metales fundidos. Cuando estos solidifican, se rompe el molde para retirar la fundición.

Las proporciones habituales suelen ser 90% de arena, 7% de arcilla y 3% de agua.

-Moldes permanentes.

La principal característica de este tipo de moldes es su resistencia a altas temperaturas, gracias a los metales con los que son fabricados, Al contrario que el anterior tipo de molde, este puede ser reutilizado en sucesivas fundiciones. Ha de añadirse que los moldes metálicos conducen mejor el calor que los moldes desechables no metálicos, lo que provoca mayores velocidades de enfriamiento en la fundición, afectando, por tanto, a su microestructura y al tamaño de grano de esta.

-Moldes compósitos.

Están formados por dos o más materiales aprovechando las ventajas de cada uno. Poseen una parte desechable y otra permanente, empleadas en procesos de fundición para mejorar la resistencia del molde, lograr controlar las velocidades de enfriamiento y poder optimizar la economía global de los procesos de fundición.

Nuestro estudio se centrará en los moldes desechables ya que son los empleados en el proceso de fundición en arena. Sin embargo, existen multitud de procesos de fundición, además del realizado en arena, en los que se emplean moldes desechables. Los procesos más significativos aparecen reflejados en la *Tabla 1* junto a sus ventajas y desventajas con el fin de poder realizar una rápida comparación [2].



Tabla 1. Ventajas y limitaciones de los diferentes procesos de fundición en los que se emplean moldes desechables. Fuente [2].

Proceso	Ventajas	Limitaciones
En arena	<ul style="list-style-type: none"> -Bajo costo. -Uso de prácticamente cualquier metal fundido. -No hay límite en cuanto a forma, peso, tamaño, etc. 	<ul style="list-style-type: none"> -Necesidad de algún acabado. -Tolerancias amplias y acabado superficial grueso.
Molde en cáscara	<ul style="list-style-type: none"> -La precisión dimensional y el acabado superficial son buenas. 	<ul style="list-style-type: none"> -Hay limitación con relación al tamaño de la pieza. -Costes altos.
Modelo evaporativo	<ul style="list-style-type: none"> -Se pueden emplear prácticamente todo los metales fundidos. -No hay límite de tamaño y permite realizar geometrías complejas. 	<ul style="list-style-type: none"> -Baja resistencia de los modelos. -En pequeñas cantidades el coste es alto.
Molde de yeso	<ul style="list-style-type: none"> -Permite realizar partes de formas intrincadas. -Buena tolerancia dimensional y acabado superficial con baja porosidad. 	<ul style="list-style-type: none"> -Limitado a metales no ferrosos. -Límites: tamaño de la parte y volumen de producción. -Fabricación del molde: tiempo largo.
Molde cerámico	<ul style="list-style-type: none"> -Partes de formas intrincadas. -Partes con tolerancias cerradas. -Buen acabado superficial. 	<ul style="list-style-type: none"> -Tamaño limitado de la parte.
Por revestimiento	<ul style="list-style-type: none"> -Partes de formas intrincadas. -Muy buen acabado superficial y precisión. -Prácticamente cualquier metal fundido. 	<ul style="list-style-type: none"> -Partes de tamaño limitado. -Alto coste en general.

Se recoge a continuación en la *Tabla 2*, las principales características del proceso de fundición en arena [2].



Tabla 2. Características del proceso de fundición en arena. Fuente [2].

Materiales que suelen fundirse	Todos
Peso (kg): -Mínimo -Máximo	0,01 No hay límite
Tipo de acabado superficial (μm)	5-25
Espesor sección (mm): -Mínimo -Máximo	3 No hay límite
Tolerancia dimensional (mm)	1,6-4 (0,25mm para partes pequeñas)
Tiempo usual de entrega	Días
Cantidad mínima	1

2.2 Molde

2.2.1 Arenas

Generalmente, suele usarse arena de sílice (SiO_2) debido a su bajo precio y a que es adecuada por sus características de alta temperatura y elevado punto de fusión. Lo aconsejable para lograr una buena fundición es que la arena esté limpia y a poder ser, sea nueva.

Se pueden diferenciar dos tipos de arenas diferentes como la aglutinada naturalmente (banco de arena) y la sintética (arena de lago).

Es necesario que la arena disponga de propiedades como cohesión, plasticidad en estado húmedo, resistencia a la tracción y flexión, refractariedad, permeabilidad, conductividad térmica, disgregable, que se deforme para permitir contracción y que sea económica. Es decir, se requiere que soporte altas temperaturas sin que se funda o se degrade.

Otros aspectos para tener en cuenta son el tamaño de grano, la forma de dicho grano y la distribución de la mezcla. Si disponemos de arena que posee granos finos y redondos, esta se puede apisonar de manera más compacta y que el



molde obtenga una superficie más lisa. Este tipo de arena de grano fino refuerza la resistencia del molde además de reducir su permeabilidad. Sin embargo, una permeabilidad adecuada de los moldes y machos deja que los gases y vapores producidos durante la fundición escapen fácilmente.

Con el fin de evitar defectos como podría ser el desgarramiento y el agrietamiento en caliente, es necesario que el molde tenga una colapsabilidad que deje a la fundición contraerse cuando esta se enfríe.

Ha de destacarse que el costo es reducido y los desperdicios minimizados cuando se recupera la arena tras el proceso, por medio de refregado en seco, el lavado o incluso mediante calentamiento si se está trabajando con aglutinantes orgánicos.

El proceso de compactación de la arena en el molde se puede realizar de manera manual o empleando máquinas de presión neumática. [2].

2.2.2 Aglutinantes y aglomerantes

Existen dos grandes grupos con relación a las mezclas para el moldeo en arena, las arenas aglutinadas y las arenas aglomeradas.

En el primero de ellos, las arenas aglutinadas, se componen de una arena base más un aglutinante que suele ser una arcilla del grupo de las montmorillonitas (bentonitas), además de agua, originando atracciones electrostáticas entre el aglutinante y el agua que generan fuerzas de cohesión entre los granos que forman las arenas. Se trata de una cohesión no muy fuerte y se carácter físico, por lo que sus características mecánicas no son las más apropiadas a la hora de emplearse en la creación de piezas de gran responsabilidad.

Con relación a las arenas aglomeradas, la arena base es la misma que en el anterior grupo, pero en este caso, se añade un aglomerante. El mecanismo de aglomeración trata de una reacción química que le dota al molde o macho de



una gran consistencia. Es habitual que se añada una resina catalítica con el fin de acelerar el proceso de endurecimiento de la arena junto al aglomerante. Inicialmente su uso se focalizó en la fabricación de machos o núcleos debido a su gran resistencia y fiabilidad, pero posteriormente comenzó a usarse en la fabricación de piezas unitarias o series cortas en tamaño medio, grande o muy grande. [4]

2.2.3 Moldes para fundición en arena

El molde que se emplea en este tipo de proceso está formado por dos mitades diferenciadas o semi moldes, el marco superior y el inferior. Ambas mitades están contenidas en una caja de moldeo, la cual también está dividida en dos partes, una para cada marco. Merece la pena mencionar que la línea que separa dichas mitades recibe el nombre de línea de separación.

Tradicionalmente, la cavidad del molde es generada por un modelo, fabricado en madera u otros materiales, que reproduce la geometría de la pieza que se pretende obtener. La cavidad es creada mediante la compactación de arena alrededor del modelo, de tal manera que cuando es retirado el modelo, su forma queda reproducida en la arena compacta. El modelo suele estar sobredimensionado debido a la posterior contracción del metal cuando este se solidifica y enfría.

Sin embargo, en este trabajo de fin de grado no se generará de mediante un modelo que será retirado, sino con un modelo desechable impreso en 3D.

En los casos en los que la pieza final posee superficies internas, es necesario colocar un núcleo dentro de la cavidad del molde que defina dicho interior.

El metal fundido es introducido por el bebedero, el cual se conecta a la cavidad principal del molde gracias a un vaciadero o sistema de alimentación. Generalmente la parte superior del bebedero posee forma de embudo para

disminuir las salpicaduras y la turbulencia. [1]. En la *Figura 1* pueden observarse las diferentes partes de un molde en un molde complejo y en otro más sencillo.

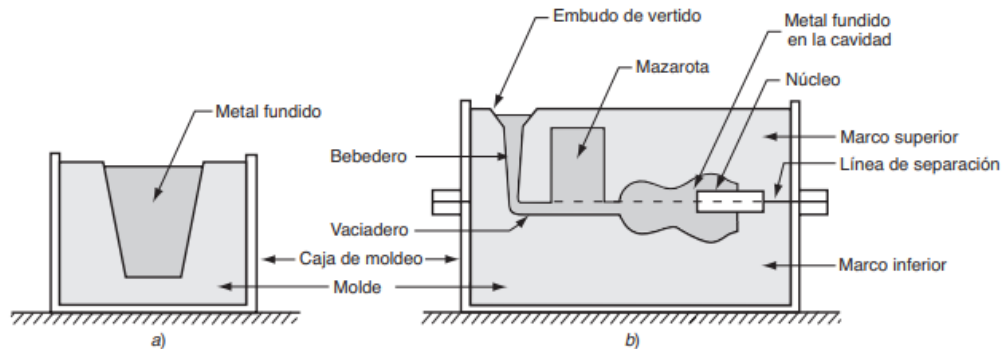


FIGURA 1. Partes de un molde. (a) Molde abierto sencillo. (b) Molde cerrado complejo.
Fuente [1].

2.2.4 Compactación

El proceso de compactación se realiza con diferentes técnicas en función de la velocidad de producción y el número de partes producidas.

En primer lugar, la compactación manual. La arena es depositada con una pala alrededor del modelo, el cual consta de una sola pieza y posteriormente se apisona a mano. Es necesaria bastante habilidad para lograr una compactación uniforme.

En segundo lugar, la compactación por medios mecánicos, como sacudidas o presión. Se emplea en la producción en masa, de tal modo que la arena es transportada a la estación de moldeo y esta se deja caer o se sopla en los modelos rodeados por cajas de moldeo.

En tercer lugar, la compactación dinámica, gracias a la cual se pueden obtener altas densidades. La arena se arroja por un propulsor de rotación rápida, o la



caja de moldeo se evacúa abriéndose una válvula a través de la cual la arena es introducida.

Por último, si se dispone de altas presiones, alrededor de 7 MPa, se puede emplear el moldeo sin caja, ya que la arena que debe estar aglutinada apropiadamente adquiere la resistencia suficiente para mantener la integridad del molde sin la caja de moldeo. Permite grandes volúmenes de producción y, además, se obtienen fundiciones de mayor exactitud.

En los tres primeros casos previamente mencionados, se ha de colocar un peso sobre la tapa superior que contrarreste la presión hidrostática que ejerce el metal fundido para evitar la presencia de fugas. [5].

2.3 Modelo

Tal y como se ha explicado previamente, gracias al modelo que reproduce la forma de la pieza, se genera la cavidad interior del molde donde será vertido el metal fundido.

El modelo es una reproducción casi igual a la pieza que se quiere obtener como resultado final, salvo por las sobredimensiones que se han de tener en cuenta por la posterior contracción del material empleado.

Suele diseñarse el modelo con sus paredes ligeramente inclinadas para que el momento de la extracción sea más sencillo, tratando de evitar desprendimientos de las arenas.

Tradicionalmente, dichos modelos han sido fabricados empleando diferentes materiales donde destaca el uso de madera, aluminio y hierro. La utilización de unos materiales u otros depende de la vida útil que se busque, el coste, el tamaño de los lotes de producción, la calidad en cuanto a acabado superficial que se necesite, etc.



Existen diferentes tipos de modelos. En primer lugar, los modelos sólidos, los cuales son los más sencillos y poseen la misma geometría que la pieza final, estando su tamaño ajustado a la posterior contracción y maquinado.

Son empleados cuando se necesitan pocas unidades de producción y su utilización no es sencilla, ya que aparecen problemas a la hora de ubicar la línea de separación. Además, interviene la habilidad del trabajador encargado de realizar la fundición para incorporar el sistema de paso y la mazarota.

En segundo lugar, los modelos deslizantes, formados por dos piezas cuyo eje de separación coincide con el eje que divide las partes del molde. Suele ser empleado en geometrías difíciles y cuando el volumen de producción no es demasiado elevado.

Por último, los modelos de placas ajustadas o modelos de capucha y base. Se emplean con volúmenes de producción mayores y son similares al modelo anterior, con la salvedad que en este caso las mitades que se separan están ajustadas a placas diferentes, de manera que las secciones diferentes se fabrican de manera independiente en vez de usar las mismas herramientas en ambos casos. [1].

Sin embargo, la principal mejora que se pretende implementar en el proceso de fundición empleando molde de arena, es la utilización de un modelo desechable impreso en plástico mediante una impresora 3D, y no un modelo que deba ser extraído de las arenas como hasta ahora se ha hecho.

Dicha innovación permitirá que ambas partes que conforman el molde no deban ser separadas para que el modelo se extraiga, y así disminuir las probabilidades de que la cavidad principal del molde se vea afectado debido a posibles desprendimientos de las arenas durante dicha extracción.

Por tanto, el modelo será diseñado e impreso en 3D, diseño el cual contará con la geometría de la pieza final, el bebedero, el canal de alimentación y todas las partes necesarias para la ejecución del proceso. Posteriormente, se introducirá



en las cajas de moldeo y se rellenará con las arenas compactas, de la misma manera que se realiza tradicionalmente.

A continuación, se verterá el metal fundido con la finalidad de obtener la pieza final deseada, que diferirá del modelo diseñado ligeramente debido a las contracciones que sufre el metal en la etapa de solidificación y enfriamiento.

2.4 Machos o núcleos

En aquellos casos que la pieza final posee superficies internas, es necesario la utilización de machos o núcleos, los cuales son modelos que reproducen el interior de la pieza. Ha de colocarse en la cavidad del molde antes de que se produzca el vertido, de tal modo que tras el vertido quedarán definidas tanto las superficies internas como las externas.

La formación del núcleo y las tolerancias que posee son exactamente iguales que en el modelo empleado para obtener la superficie externa y que ha sido explicado previamente.

Existen casos en los que dicho núcleo debe ser colocado mediante soportes que reciben el nombre de coronas, las cuales poseen una temperatura de fusión mayor que el metal empleado en la fundición.

Ha de mencionarse que la formación de las superficies interiores no es su única finalidad, también suele resolver problemas de contrasalidas y ángulos salientes en las piezas. [1]

2.5 Sistema de alimentación

El sistema de alimentación, o también denominado sistema de paso, es el conjunto de canales por los que atraviesa el metal en estado líquido desde el exterior hasta la cavidad del molde.



La composición de dicho sistema de alimentación depende de la pieza que se vaya a obtener como resultado. Generalmente está conformado por al menos un bebedero y un canal de alimentación el cual une dicho bebedero y la cavidad principal del molde, pudiendo ser varios canales en caso de que el diseño de la pieza lo requiera.

Se ha de tener en cuenta que estos canales deben ser diseñados de tal modo que la velocidad a la entrada de este sea la adecuada e intentando que el régimen del fluido sea lo más cercano posible a laminar.

Es apropiado que el inicio del bebedero posea forma de embudo, con el fin de reducir la turbulencia del metal líquido cuando es introducido en el molde y, además, disminuir las salpicaduras que se pudieran general al ser vertido.

Por último, es recomendable dotar de retenedores de escoria a estos sistemas de alimentación con el propósito de evitar que se introduzcan en la cavidad principal del molde algunas impurezas o desprendimientos de arena, elementos los cuales generarían defectos en la pieza que se pretende obtener como resultado final. [3].

2.6 Proceso de fundición

A lo largo de este apartado se plasmará cómo ha de llevarse a cabo el proceso de fundición. Una de la condiciones fundamentales es que el metal ha de calentarse por encima de su punto de fusión gracias a diferentes hornos y posteriormente verterse en el interior de la cavidad del molde para que se solidifique.



2.6.1 Calentamiento y vertido del metal

La energía calorífica necesaria es la suma del calor necesario para alcanzar la temperatura de fusión, el calor necesario para que el estado pase de sólido a líquido y, por último, el calor para que el metal alcance la temperatura a la que se quiere verter dicho metal. La expresión es la siguiente [1]:

$$H = \rho V [C_s (T_m - T_o) + H_f + C_l (T_p - T_m)] \quad (\text{Ecuación 1})$$

Tabla 3. Términos de la ecuación 1. Fuente [1].

$H [J]$	Calor total necesario para subir la temperatura del metal a la temperatura a la cual será vertido.
$\rho \left[\frac{g}{cm^3}\right]$	Densidad.
$V [cm^3]$	Volumen del metal calentado.
$C_s \left[\frac{J}{g^\circ C}\right]$	Calor específico por peso para el metal en estado sólido.
$T_m [^\circ C]$	Temperatura de fusión del metal.
$T_o [^\circ C]$	Temperatura inicial del proceso.
$H_f \left[\frac{J}{g}\right]$	Calor de fusión.
$C_l \left[\frac{J}{g^\circ C}\right]$	Calor específico por peso para el metal en estado líquido.
$T_p [^\circ C]$	Temperatura a la que se realiza el vertido.

Existen varios factores que son determinantes a la hora de llevar a cabo el vertido en dicho proceso de fundición, en el cual es imprescindible que el fluido llegue a todas las partes del moldes antes de que se solidifique. A continuación, se exponen dichos factores [1]:

1. La **temperatura del vertido**, es decir, aquella temperatura que posee el fluido al introducirse en el molde. Es importante la diferencia de temperatura la temperatura del metal al verterse y la temperatura de este cuando comienza a solidificarse. En ocasiones, dicha diferencia recibe el nombre de sobrecalentamiento.



2. La **velocidad del vertido** ya que, si es demasiado baja y el metal se enfría, se solidificará antes de rellenar la cavidad al completo. Sin embargo, tampoco puede ser demasiado elevada ya que se generaría turbulencia, de tal modo que el flujo se agita y se hace irregular. Dicha turbulencia ha de evitarse por varios motivos, entre ellos que fomenta la formación de óxidos de metal que pueden quedar atrapados cuando se produce la solidificación, reduciendo la calidad del fundido. Además, aumenta la erosión del molde, pudiendo afectar a la cavidad principal del molde y, por tanto, a la pieza que se pretende obtener.

Para comprender el comportamiento del metal líquido que fluye por la cavidad del molde y el sistema de alimentación, han de considerarse varias relaciones [1].

En primer lugar, el teorema de Bernoulli, el cual afirma que la suma de energías piezométrica, de presión, cinética y de fricción, entre dos puntos cualquiera (1 y 2) de un líquido el cual fluye, son iguales. Es decir:

$$h_1 + \frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2g} + F_1 = h_2 + \frac{p_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2g} + F_2 \quad (\text{Ecuación 2})$$

Tabla 4. Términos de la ecuación 2. Fuente [1].

$h [cm]$	Altura piezométrica.
$p \left[\frac{N}{cm^2} \right]$	Presión del líquido.
$\rho \left[\frac{g}{cm^3} \right]$	Densidad.
$v \left[\frac{cm}{s} \right]$	Velocidad del flujo.
$g \left[\frac{cm}{s^2} \right]$	Constante de la aceleración de la gravedad cuyo valor es 981.
$F [cm]$	Pérdidas piezométricas debidas a la fricción.



Con la finalidad de simplificar la expresión anterior, se considera que hay presión atmosférica en ambos puntos y que las pérdidas por fricción pueden despreciarse, a pesar de que seguramente la fricción afecte al flujo del metal líquido. Por tanto:

$$h_1 + \frac{v_1^2}{2g} = h_2 + \frac{v_2^2}{2g} \quad (\text{Ecuación 3})$$

De este modo se conoce la velocidad del metal en la base del bebedero a la entrada de la cavidad principal del molde. El punto 1 corresponde con la parte superior de la mazarota y el punto 2 con la base de esta. Considerando el punto 2 como el plano de referencia, $h_2 = 0$ y h_1 es la altura de la entrada. Además, la velocidad inicial en la parte superior es 0 ($v_1 = 0$). Con dichas simplificaciones, la expresión queda de la siguiente manera:

$$h_1 = \frac{v_2^2}{2g} \quad (\text{Ecuación 4})$$

Por tanto, la velocidad de flujo:

$$v = \sqrt{2gh} \quad (\text{Ecuación 5})$$

Tabla 5. Términos de la ecuación 5. Fuente [1].

$v \left[\frac{cm}{s} \right]$	Velocidad del metal líquido en la base de la mazarota.
$g \left[\frac{cm}{s^2} \right]$	Constante de la aceleración de la gravedad cuyo valor es 981.
$h [cm]$	Altura del bebedero.

Además, hemos de considerar la ecuación de continuidad, relación que establece que la tasa de flujo volumétrico permanece constante a través



del líquido. El gasto volumétrico corresponde con el producto de la velocidad por el área del punto que se esté estudiando, es decir, si el área aumenta, la velocidad debe disminuir, y viceversa. Se expresa del siguiente modo, refiriéndose los subíndice 1 y 2 a los diferentes puntos de estudio:

$$Q = v_1 A_1 = v_2 A_2 \quad (\text{Ecuación 6})$$

Tabla 6. Términos de la ecuación 6. Fuente [1].

$Q \left[\frac{cm^3}{s} \right]$	Gasto volumétrico.
$v \left[\frac{cm}{s} \right]$	Velocidad.
$A [cm^2]$	Área de la sección transversal del líquido.

De las expresiones anteriormente citadas, se obtiene la conclusión de que el bebedero debe ser ahusado, cuya sección sea decreciente de manera progresiva con la finalidad de que el llenado se produzca sin exceso de velocidad y evitando que se produzcan turbulencias [1].

Una vez es conocido el gasto volumétrico y el volumen del molde, incluyendo el sistema de alimentación y las mazarotas, es posible conocer el tiempo de llenado de dicho molde, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$T_{MF} = \frac{V}{Q} \quad (\text{Ecuación 7})$$

Tabla 7. Términos de la ecuación 7. Fuente [1].

$T_{MF} [s]$	Tiempo de llenado del molde.
$V [cm^3]$	Volumen de la cavidad del molde.
$Q \left[\frac{cm^3}{s} \right]$	Gasto volumétrico.



Por último, hemos de mencionar otro rasgo importante que caracteriza el flujo del metal, la fluidez, es decir, la capacidad del líquido de trasladarse para completar la cavidad del molde antes de que comience la solidificación [3].

Algunos de los factores que intervienen en la fluidez son la temperatura del vertido, el material que se haya fundido, la viscosidad del líquido y la capacidad de transmisión de calor.

Se alcanzará una mayor fluidez si la temperatura de vertido es bastante mayor que la temperatura de fusión, pero si dicha temperatura de vertido es demasiado elevada, será más abrasivo para las paredes del molde, favoreciendo la oxidación y la formación de poros gaseosos. Por tanto, ha de encontrarse un equilibrio que nos genere una buena fluidez pero que no sea abrasivo para el molde [3].

2.6.2 Solidificación y enfriamiento

Tras el vertido, comienza la etapa de enfriamiento y solidificación, en la cual el metal pasa de estado sólido.

La **solidificación** no se produce de igual manera en todos los metales, destacando las diferencias entre los metales puros y los aleados.

En el primer grupo, los *metales puros*, la solidificación se da cuando se alcanza la temperatura constante que corresponde con el punto de adhesión y también con el de fusión.

Se denomina tiempo local de solidificación al tiempo que corresponde a la solidificación real donde el calor de fusión latente del metal se libera hacia el molde en el que está contenido. Además, el tiempo total de solidificación es aquel que transcurre entre el vertido y la finalización de la solidificación, tras la cual continuará el enfriamiento. En la *Figura 2*, puede observarse la curva de enfriamiento propia de un metal puro durante la fundición.

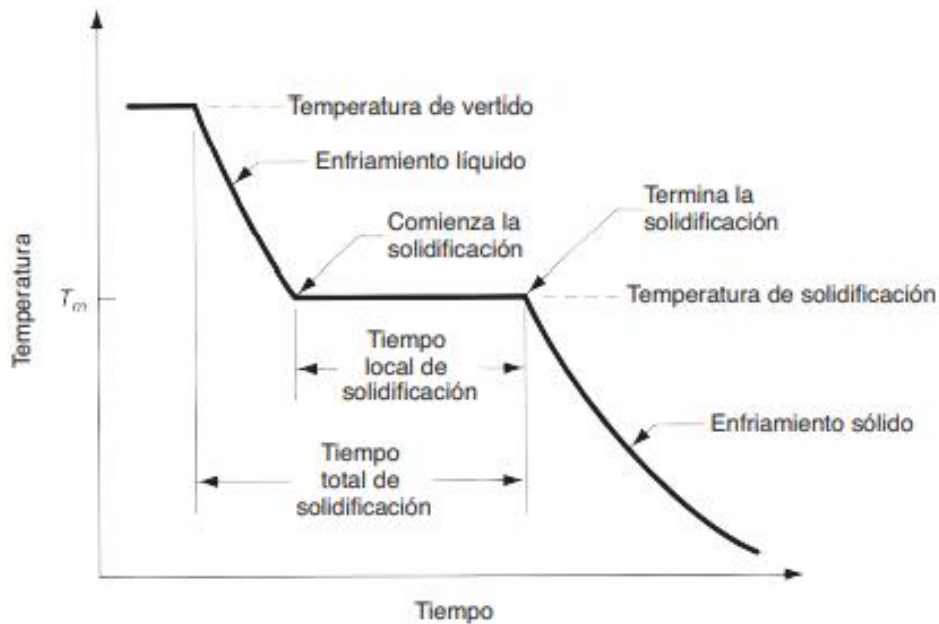


FIGURA 2. Curva de enfriamiento para un metal puro durante la fundición. Fuente [1].

Se irá generando una capa fina de metal sólido tras el vertido debido a la acción enfriadora del molde y, a medida que la solidificación avanza hacia el centro de la cavidad, dicha capa irá haciéndose más gruesa.

Ha de tenerse en cuenta que la tasa a la que se produce la solidificación depende de la transferencia de calor al molde y las de las propiedades térmicas del metal en concreto.

Merece la pena destacar que, en los metales puros, la estructura característica de los granos en fundidos de dicho metal puro corresponde con granos pequeños cuya orientación es al azar en las zonas próximas a la pared del molde mientras que en la zona central el crecimiento es dendrítico, con granos alargados y grandes orientados hacia el centro del fundido.

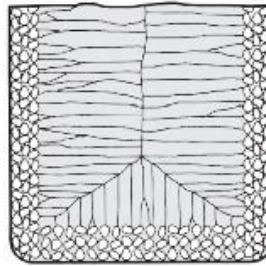


FIGURA 3. Estructura característica de los granos en un fundido. Fuente [1].

En el segundo grupo, aparecen las *aleaciones en general*, las cuales suelen solidificar dentro de un rango de temperaturas, el cual depende de la aleación que se esté trabajando.

El comienzo de la solidificación es similar a la previamente comentada en los metales puros. Sin embargo, en este caso, al existir un intervalo de temperaturas, apreciamos una dispersión entre la línea de solidus y liquidus, por lo que el crecimiento dendrítico es interrumpido por una zona donde coexiste material líquido y sólido, generándose una zona blanda cuya consistencia es suave.

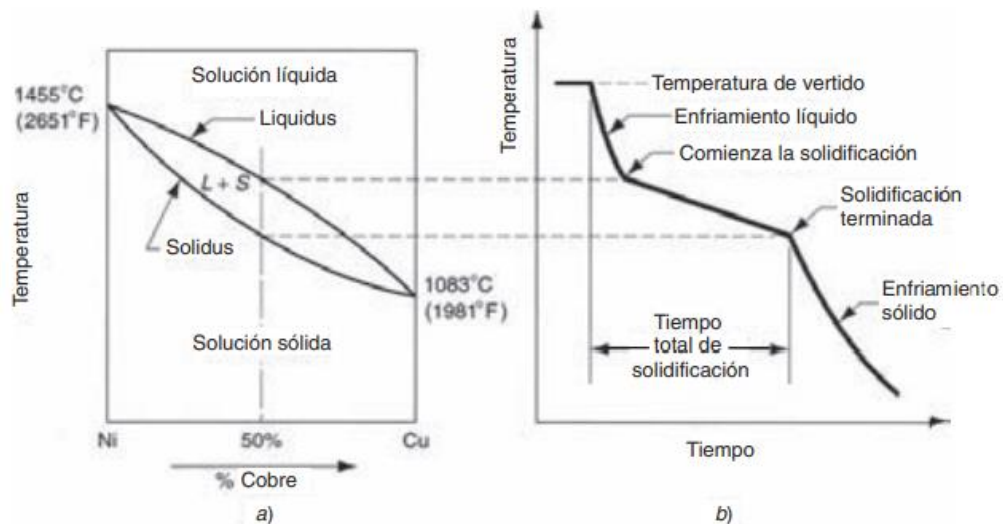


FIGURA 4. a) Diagrama de fase para un sistema de aleación cobre-níquel. b) Curva de enfriamiento asociada para una composición de 50% Ni y 50% Cu, durante la fundición. Fuente [1].

Además, se genera un fenómeno de segregación en el interior de las piezas. A la hora de crearse las dendritas, predomina el punto de fusión más alto del metal, provocando que la composición no sea uniforme y se produzcan segregaciones, pudiendo ser estas microscópicas o macroscópicas.

La diferencia entre un tipo y otro es que en la segregación microscópica la composición química varía entre los granos individuales mientras que, en la macroscópica, también conocida como segregación de lingote, la composición varía en todo el fundido, produciéndose una segregación generalizada por toda la sección transversal.

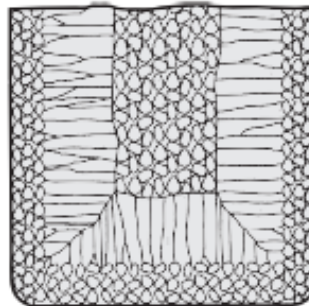


FIGURA 5. Estructura de grano característica de un fundido de aleación. Fuente [1].

Ha de mencionarse la excepción provocada por las aleaciones eutécticas, ya que en ellas el solidus y el liquidus están a la misma temperatura, es decir, la solidificación no se produce en un rango de temperaturas, sino a una temperatura constante.

2.6.3 Tiempo de solidificación

El **tiempo de solidificación** depende del tamaño y la forma del fundido que se va a realizar. La regla empírica de Chvorinov afirma que un fundido con una



razón grande de volumen a superficie tardará más tiempo en enfriarse y solidificarse que otro que tuviese una razón menor. La regla afirma lo siguiente:

$$T_{TS} = C_m \left(\frac{V}{A}\right)^n \quad (\text{Ecuación 8})$$

Tabla 8. Términos de la ecuación 8. Fuente [1].

$T_{TS} [min]$	Tiempo total de solidificación.
$C_m \left[\frac{min}{cm^2}\right]$	Constante del molde, basado en datos experimentales previos y dependiendo de la condiciones de la operación.
$V [cm^3]$	Volumen del metal fundido.
$A [cm^2]$	Superficie del metal fundido.
n	Exponente cuyo valor es igual a 2.

Esta regla suele emplearse para el diseño de la mazarota, donde ha de cumplirse que dicha mazarota permanezca en estado sólido más tiempo que el metal fundido.

En caso de que se diseñe la mazarota con una razón mayor de volumen a superficie, se puede obtener una situación razonablemente segura en la que se minimicen los efectos de la contracción.

2.6.4 Contracción

Además, ha de tenerse en cuenta un efecto muy importante que se produce, la **contracción**, la cual sucede en tres etapas diferenciadas. En primer lugar, la contracción líquida durante el enfriamiento antes de la solidificación. En segundo lugar, la contracción por solidificación, producida en el cambio de fase líquida a sólida y, por último, la contracción térmica del fundido solidificado gracias al enfriamiento a temperatura ambiente.

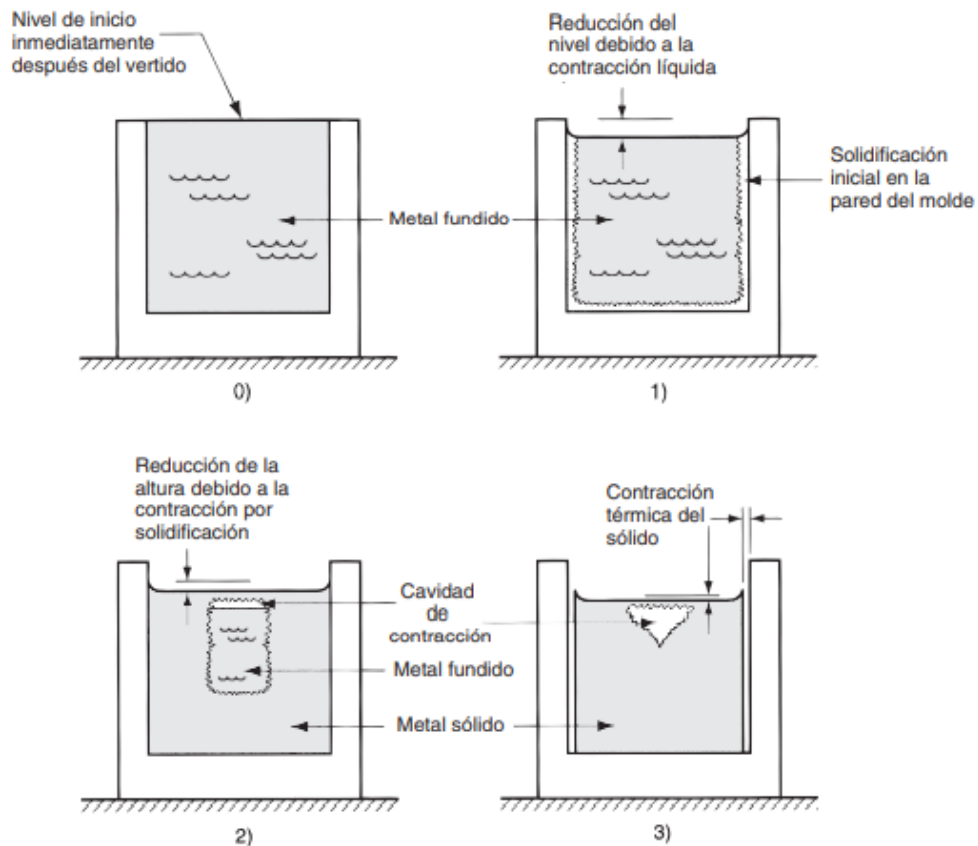


FIGURA 6. Etapas en la contracción de un fundido cilíndrico durante la solidificación y enfriamiento. Fuente [1].

En la *Figura 6*, podemos observar como a medida que se va solidificando el metal alrededor de las paredes del recipiente que lo contiene, el nivel de este va disminuyendo. El porcentaje que corresponde con la cantidad de metal que se contrae en la fase de contracción líquida es de un 0,5%.

En el momento en el que comienza la contracción por solidificación, en el paso 2 de la *Figura 6*, el nivel sigue disminuyendo y, además, la cantidad de metal líquido para alimentar la porción central y superior del metal fundido se ve restringida. Suele ser la última parte en solidificar y la ausencia de metal genera un vacío en esa zona del fundido, generalmente conocido como *rechufe*.

Finalmente, cuando se ha solidificado por completo, experimenta aún más contracción en su diámetro y altura, la cual depende del coeficiente de



expansión térmica del metal, el cual es aplicado a la inversa para hallar la contracción.

Sin embargo, para hacer los modelos y los moldes se emplean reglas de contracción, ya que estos son fabricados de tal modo que las cavidades aumenten de tamaño, empleando una tolerancia por contracción del modelo. A pesar de que la contracción es volumétrica, las dimensiones del fundido generalmente se expresan de manera lineal y las tolerancias deben aplicarse en concordancia. Dependiendo del metal fundido, las reglas de contracción son entre un 1% y un 5% mayores que la regla estándar.

2.7 Defectos y cómo intentar evitarlos

2.7.1 Tipos de defectos

Ha de tenerse en cuenta que a lo largo del proceso se pueden generar defectos en nuestra pieza, los cuales dependen de los materiales empleados, el diseño que se haya llevado a cabo y las técnicas que se usen en el procedimiento. Existen defectos que solo afectan a la estética de la pieza obtenida, pero otros afectan a la estructura de esta, imposibilitando el uso de la pieza.

A continuación, se plasma la clasificación de los posibles defectos que podrían darse en el proceso de fundición [2]:

1. **Proyecciones metálicas:** se trata de aletas, rebabas o proyecciones similares a ampollas y superficies rugosas.
2. **Rechupes, cavidades o huecos:** los cuales podrían ser internos o externos y de infinidad de geometrías y tamaños, y su formación se produce en la contracción del metal al enfriarse. Las zonas más propensas a la formación de rechupes son las partes de la pieza con grandes espesores donde se forman puntos calientes.



3. **Discontinuidades:** las cuales podrían ser grietas, puntos fríos o desgarramientos en frío o en caliente, derivadas de que el metal, durante la solidificación, no se contrae libremente. Algunos factores que favorecen la formación de grietas y desgarramientos son el tamaño grueso de grano y la presencia de segregaciones cuyo punto de fusión es bajo a lo largo de los límites de los granos. Además, el punto frío es provocado por la unión de dos corrientes de metal líquido cuyo origen no es el mismo, que generan que la interfaz en la fundición no se funda completamente.
4. **Superficie defectuosa:** podrían generarse pliegues, capas de arena adherida, etc.
5. **Fundición incompleta:** existen problemas derivados de la solidificación prematura, además de la posibilidad de que el volumen de la pieza quede insuficientemente llenado y de la producción de fugas. Podrían ser fruto también de que la temperatura del metal fundido sea demasiado baja, de un vertido muy lento de dicho metal o de que la sección transversal del molde sea demasiado delgada.
6. **Formas o dimensiones erróneas:** provienen de múltiples factores como podrían ser una contracción irregular o un incorrecto montaje del modelo.
7. **Inclusiones:** suele ser no metálicas y se forman durante la fusión, solidificación y moldeo. El principal problema es la reducción de resistencia que generan en la fundición ya que estas actúan como multiplicadoras de esfuerzos.
8. **Microporosidad:** son pequeños vacíos producidos por la falta de solidificación localizada del metal fundido en la estructura dendrítica.



Además de los anteriormente citados, existen otros tantos también en relación con el uso de los moldes durante el proceso, pudiéndose provocar grietas en el molde, desplazamientos laterales de la capucha del molde en relación con la base, etc.

2.7.2 Prevención

Con la intención de reducir al máximo, en la medida de los posible, los defectos que puedan generarse en la pieza se introducen diferentes tecnologías que ayudan a ello.

En primer lugar, las **mazarotas**, las cuales deben ser colocadas en las zonas de la pieza que sean propensas a formar rechupes cuando el metal se contrae al solidificarse. Las zonas más comunes suelen ser aquellas que se enfrían en último lugar y donde encontramos puntos calientes. Existen mazarotas de múltiples formas, pudiendo ser ciegas o abiertas.

Se trata de material líquido de reserva el cual se encarga de compensar la contracción del metal al solidificarse. Ha de tenerse en cuenta que debe contar con un buen diseño, del tal modo que la mazarota debe ser la última parte en solidificarse y que su localización sea la correcta para que el acceso al líquido de la cavidad principal esté garantizado.

En el proceso de diseño debe considerarse que la razón de volumen entre área de la pieza sea menor que la de la mazarota, produciendo esto que esta solidifique después, es decir, su tiempo de solidificación es mayor. Además, ha de contemplarse que el tamaño de esta debe ser el menor posible para reducir el desperdicio de material.



Es importante que el punto que está en contacto con el metal fundido de la cavidad principal no solidifique antes que el final de la mazarota para que cumpla su función adecuadamente.

Sin embargo, existen geometrías complejas donde, a pesar de que se pueden formar rechupes, no puede ser colocada una mazarota. En estos casos, se emplean **enfriadores**, los cuales son porciones de metal cuyo fin es absorber rápidamente el calor de su alrededor favoreciendo la solidificación. Al igual que en el caso de las mazarotas, existen enfriadores de infinidad de formas y tamaños y suelen estar fabricados de aluminio o acero. [3]



Universidad de Valladolid

DISEÑO, FABRICACIÓN Y VALIDACIÓN DE MODELOS DESECHABLES
OBTENIDOS MEDIANTE IMPRESIÓN 3D PARA SU USO EN
PROCESOS DE MOLDEO EN ARENA.



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

CAPÍTULO III: DISEÑO EN 3D.



3.1 Introducción

El diseño asistido por ordenador (CAD) se basa en la utilización de programas que permiten la creación, modificación, análisis y documentación de representación gráficas en 2D o 3D. Este método de diseño suele ser empleado en prácticamente todos los procesos de ingeniería, desde el desarrollo conceptual hasta el método en el que se va a fabricar la pieza en cuestión.

Gracias al diseño asistido por ordenador se logra un proceso de diseño más rápido y visual, donde las piezas que se pretende lograr pueden ser modificadas fácilmente, obteniendo una gran precisión conociendo en todo momento la geometría, las dimensiones y los materiales de estas. [6]

3.2 Software empleado

La etapa de diseño de este trabajo se llevará a cabo empleando el software CATIA (*Computer-Aided Three dimensional Interactive Application*, en inglés), comercializado por el fabricante Dassault Systèmes. Se trata de una multiplataforma que permite el diseño de sólidos, superficies, ensamblajes, planos, etc., utilizados en diferentes industrias, como podría ser la aeronáutica, automovilística, naval, entre otras.



FIGURA 7. Logotipo de software Catia. Fuente: Imágenes de Google.



La creación del programa surge en el año 1971 ante la necesidad de tener que diseñar un avión de combate llamado Mirage. Inicialmente recibió el nombre de CATI (*Conception assistée tridimensionnelle interactive*, en francés) pero diez años más tarde, en 1981, se renombró con el nombre con su nombre actual.

Dispone de herramientas para el modelado paramétrico y renderizado fotorrealista. Ha de añadirse que se pueden crear modelos 3D tanto paramétricos como no paramétricos.

Además, es compatible con Windows, Solaris, IRIX y HP-UX pero no cuenta con ninguna versión en español y sus licencias no son gratuitas. [7]

3.3 Primer modelo diseñado

En relación con el primer modelo que fue diseñado, se trató de replicar, en cierta manera la que sería la forma del modelo, junto a su bebedero, canal de alimentación y conductos para la salida de gases, que se dispondría en proceso de fundición empleando moldes de arena de manera tradicional.

Como se puede observar en las *Figuras 8 y 9*, el bebedero posee en su parte superior una forma de tronco de cono invertido con el fin de que el vertido de la colada se viese favorecido. Además, dispone de un asiento cuya cota Z, está por debajo del canal de alimentación, con la finalidad de que la colada del metal empleado se produzca de la mejor manera posible.

Además, del propio modelo en sí que posee forma de paralelepípedo, salen unos finos conductos por donde deberían escapar los gases fruto de la combustión. Ha de tenerse en cuenta que el primer modelo fue diseñado hueco, con un fino espesor de pared, buscando que hubiese la menor cantidad de plástico posible de cara a la posterior fundición.

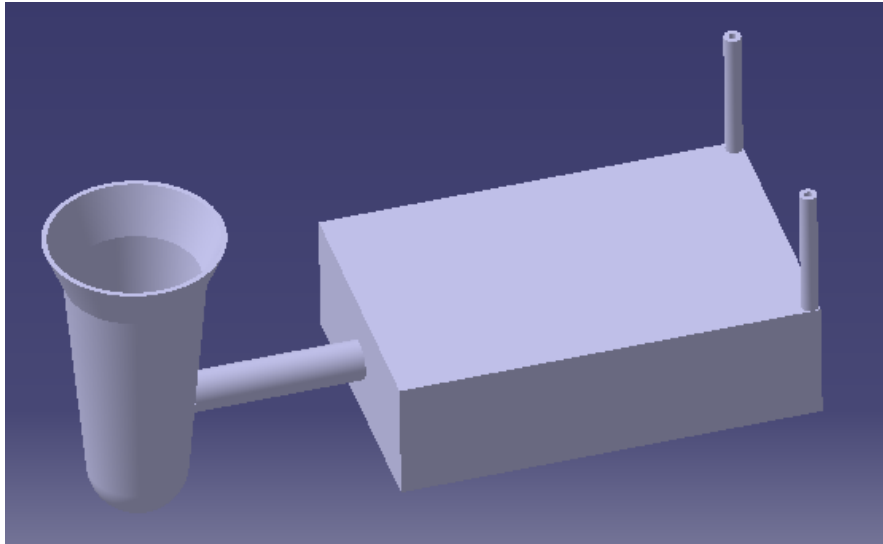


FIGURA 8. Modelo 1. Aspecto exterior. Fuente: elaboración propia empleando Catia.

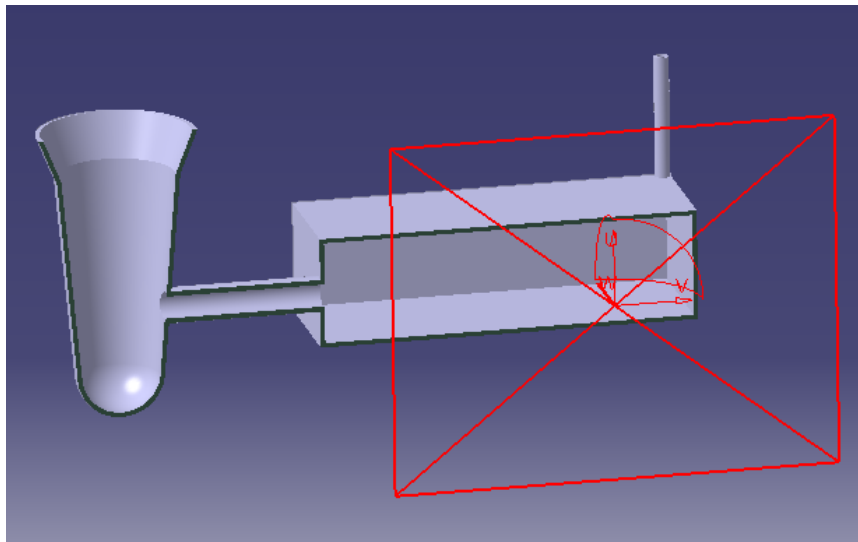


FIGURA 9. Modelo 1. Aspecto interior. Fuente: elaboración propia empleando Catia.

3.3.1 Modificación del primer modelo

La geometría del primer modelo se conservó completamente, sin embargo, de cara a la impresión 3D, no sería posible imprimir el modelo hueco, ya que la impresión 3D se genera colocando una capa de plástico sobre una capa previa. Por tanto, para que el modelo se imprima adecuadamente y conservando la geometría que se pretende obtener, es necesario que sea macizo. Es esta la modificación que se realiza sobre el primer modelo, la cual puede ser observada en las *Figuras 10 y 11*.

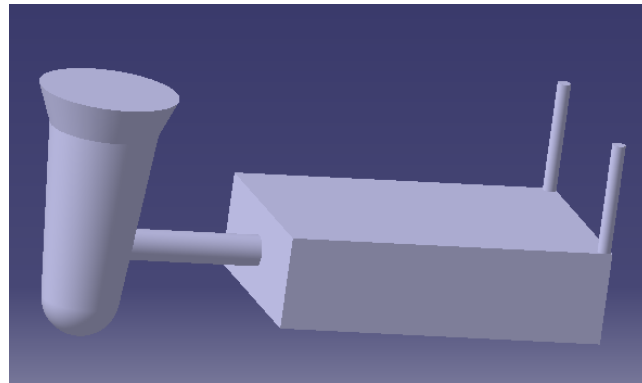


FIGURA 10. Modelo 1 modificado. Aspecto exterior. Fuente: elaboración propia empleando Catia.

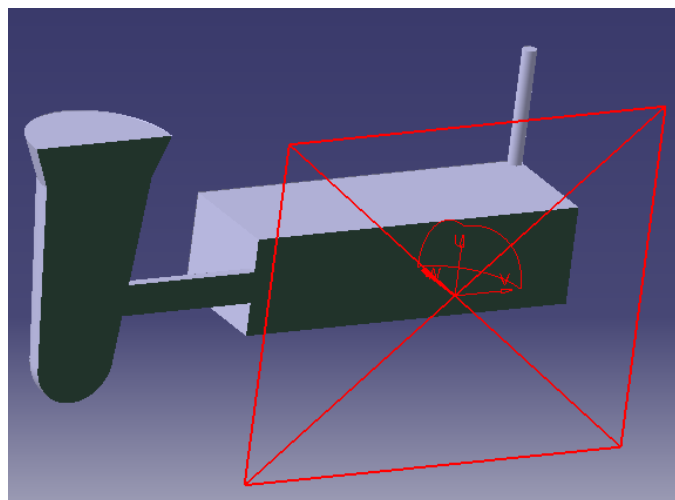


FIGURA 11. Modelo 1 modificado. Aspecto interior. Fuente: elaboración propia empleando Catia.

3.4 Segundo modelo diseñado

Ante un nuevo problema a la hora de imprimir en 3D el modelo, es necesario hacer nuevas modificaciones. El primer modelo, se ajustaba a la forma que poseería un proceso tradicional de fundición en arena como previamente ha sido explicado.

Sin embargo, de cara a la impresión, no es posible que posea esa forma ya que el único punto de sustentación sería la base del asiento, ya que es el punto que posee una cota Z más baja. Esto provocaría que el resto del modelo quedase en voladizo, siendo imposible por tanto su impresión en 3D.

El modelo de CATIA es modificado de tal manera que la cota inferior del bebedero, del sistema de alimentación y del paralelepípedo es la misma, teniendo, por tanto, una amplia base donde la impresora puede generar el modelo sin problema. Dichos cambios pueden observarse en las *Figuras 12, 13 y 14*. Se detallará en mayor medida este problema en el siguiente capítulo, en el cual se trata la impresión 3D del modelo.

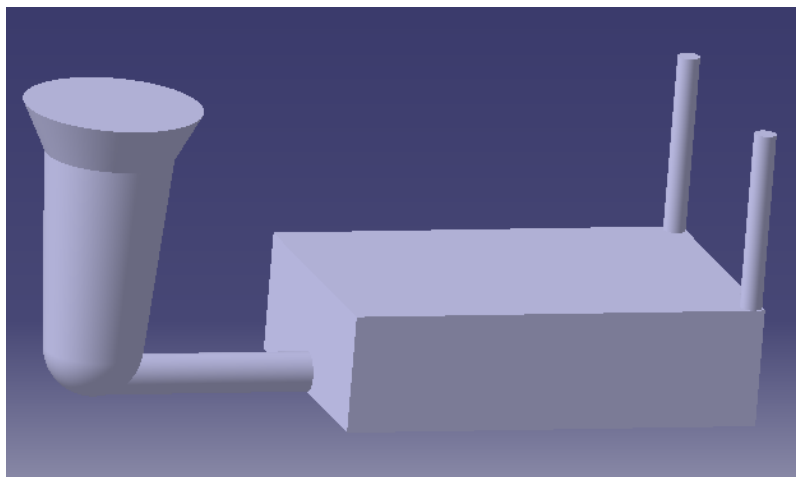


FIGURA 12. Modelo 2. Aspecto exterior. Fuente: elaboración propia empleando Catia.



FIGURA 13. Modelo 2, vista perfil. Fuente: elaboración propia empleando Catia.

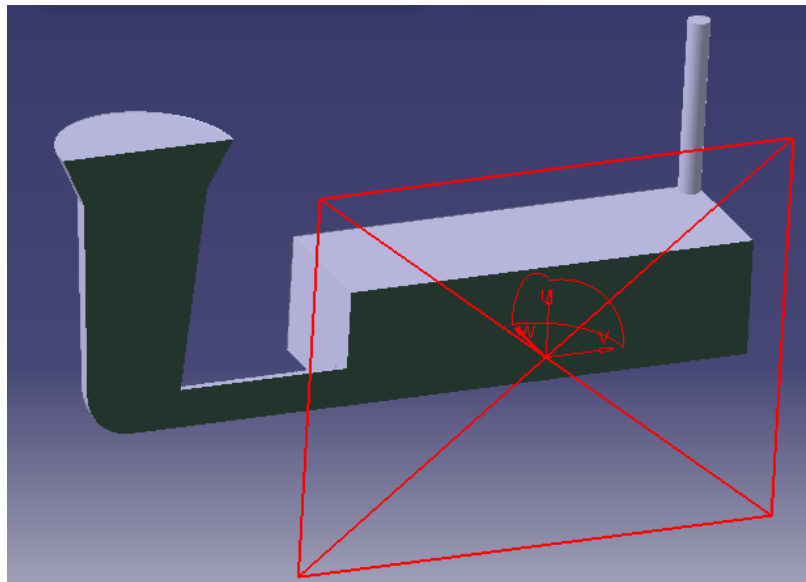


FIGURA 14. Modelo 2. Aspecto interior. Fuente: elaboración propia empleando Catia.

3.4.1 Modificación del segundo modelo

La necesidad de que nuestro modelo diseñado posea un asiento hace que el modelo sea modificado de tal modo que se diseñan dos piezas independientes.

Por un lado, el modelo al completo con el bebedero, el sistema de alimentación y las salidas de gases, y, por otro lado, un asiento que se colocará debajo del bebedero cuando toda la pieza sea introducida en la arena compacta.

La pase del bebedero es plana y posee el mismo radio que el asiento para que quede superpuesta como si se tratase en global de una única pieza y así sufragar el problema de no poderlo imprimir conjuntamente.

Además, el canal del sistema de alimentación varía. Su longitud es reducida y su diámetro aumenta, de tal modo que el fluido llegará en menor tiempo a rellenar todo el paralelepípedo, intentando evitar un enfriamiento prematuro que llegue a provocar defectos en nuestra pieza como por ejemplo que el modelo no llegue a rellenarse por completo, y, por tanto, obtengamos una geometría errónea.

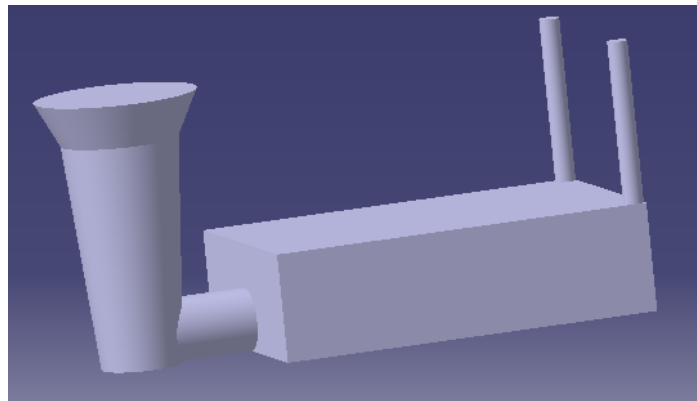


FIGURA 15. Modelo 2 modificado. Aspecto exterior. Fuente: elaboración propia empleando Catia.



FIGURA 16. Modelo 2 modificado, vista perfil. Fuente: elaboración propia empleando Catia.

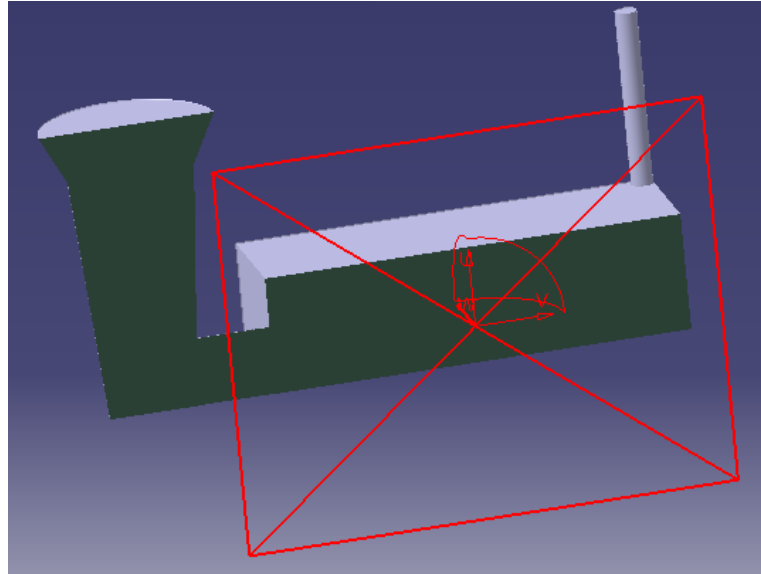


FIGURA 17. Modelo 2 modificado. Aspecto interior. Fuente: elaboración propia empleando Catia.

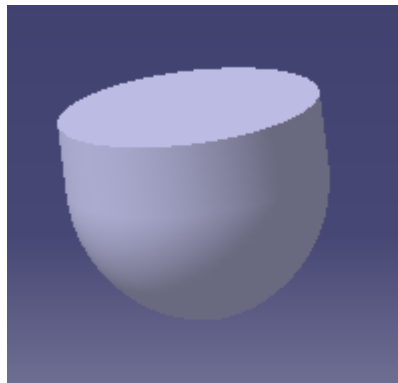


FIGURA 18. Asiento para el modelo 2. Fuente: elaboración propia empleando Catia.

3.5 Tercer modelo diseñado

Tras las primeras pruebas en el taller donde se pudo comprobar cómo actúa el plástico impreso ante la colada directa de la fundición, proceso en el cual se profundiza en el *Capítulo V*, se decide reducir al máximo, en la medida de lo posible la cantidad de plástico impreso. Por tanto, el bebedero y el sistema de

alimentación serán huecos, mientras que el paralelepípedo será macizo, por las razones de impresión previamente citadas.

En este nuevo modelo, los cambios con relación a la geometría son más significativos que en anteriores modificaciones. El bebedero posee una forma cilíndrica cuyo radio es mayor que en anteriores modelos, por lo que el volumen de metal fundido aumentará. Además, el canal de sistema de alimentación posee todavía una longitud menor que en el anterior modelo, con lo que se pretende lograr que el paralelepípedo sea rellenado en el menor tiempo posible. Para lograr este hecho, se decide modificar las dimensiones de dicho paralelepípedo, reduciéndolo 10 milímetros en los tres ejes.

Por último, para que la cantidad de plástico impreso sea menor todavía, se eliminan los conductos de salida de gases. Al ser estos imprescindibles, cuando el proceso sea realizado en el taller y el modelo se encuentre introducido en la arena compacta, se perforará dicha arena para que los gases fruto de la combustión puedan salir.

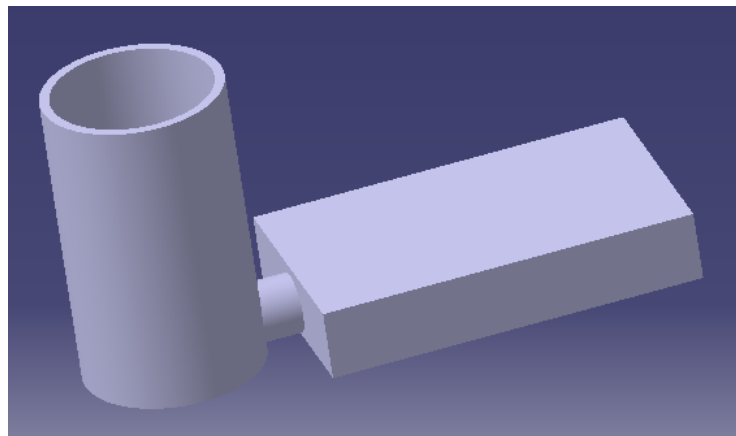


FIGURA 19. Modelo 3. Aspecto exterior. Fuente: elaboración propia empleando Catia.

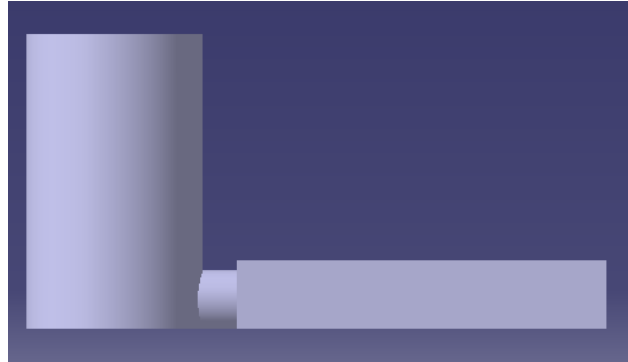


FIGURA 20. Modelo 3, vista perfil. Fuente: elaboración propia empleando Catia.

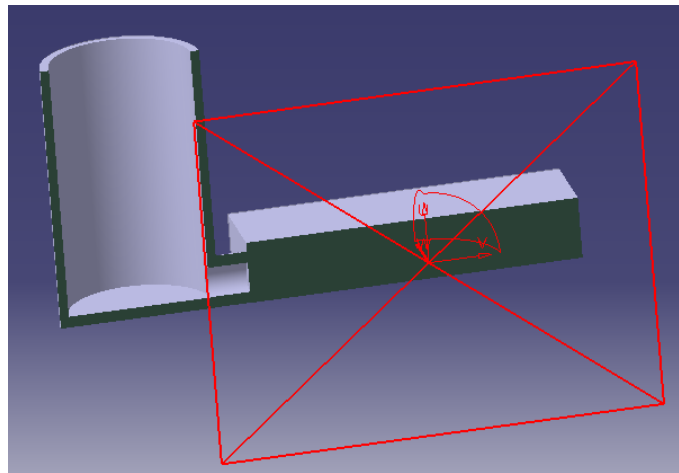


FIGURA 21. Modelo 3. Aspecto interior. Fuente: elaboración propia empleando Catia.

Con relación a la necesidad de reducir la cantidad de plástico que conforma nuestro modelo, se opta también por diseñar el asiento hueco, cuyo diámetro se adapta perfectamente a la base del bebedero.

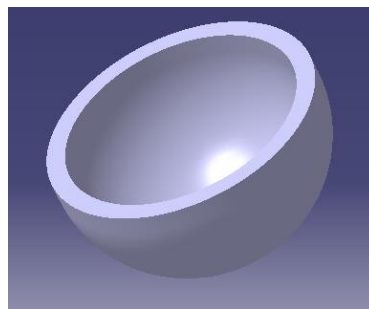


FIGURA 22. Asiento para el modelo 3. Fuente: elaboración propia empleando Catia.



Universidad de Valladolid

DISEÑO, FABRICACIÓN Y VALIDACIÓN DE MODELOS DESECHABLES
OBTENIDOS MEDIANTE IMPRESIÓN 3D PARA SU USO EN
PROCESOS DE MOLDEO EN ARENA.



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

CAPÍTULO IV: IMPRESIÓN EN 3D.



4.1 Introducción

La impresión 3D o fabricación aditiva se trata de la generación de objetos añadiendo capas del material que se esté empleando las cuales corresponden a secciones transversales sucesivas de un modelo 3D. Los materiales que suelen usarse más son metales y plásticos, aunque podría realizarse con casi cualquier tipo de material, desde hormigón hasta tejidos vivos.

Se utiliza en diferentes ámbitos como el prototipado, la optimización de piezas, la mejora de productos funcionales, la generación de implantes médicos personalizados para el paciente, la obtención de plantillas y herramientas, además de patrones para procesos de fundición de metal, como será nuestro caso. [8]

4.2 Software empleado

Durante la elaboración de este Trabajo de Fin de Grado se utilizará el software Cura, el cual fue diseñado para la impresión en 3D por medio de impresoras, permitiendo el ajuste de los diferentes parámetros que intervienen en la impresión.



FIGURA 23. Logotipo del software Cura. Fuente: Imágenes de Google.

La aplicación fue creada por David Braan en el año 2014 y posteriormente adoptada por la empresa Ultimaker. Actualmente es usada por más de un millón de usuarios, siendo el software de impresión en 3D más utilizado. [9]



Su funcionamiento consiste en la división en varias capas del archivo del modelo que ha sido previamente diseñado por el usuario y transformando estos datos en código G, el cual es enviado a la impresora 3D por medio de un dispositivo de almacenamiento o con algún otro tipo de conexión que vincule la impresora con el software. Existen dos modos de impresión, el recomendado y el personalizado.

A la hora de importar el diseño en Cura puede hacerse con archivos que posean extensiones como STL, OBJ, X3D, 3MF además de formatos de imagen como JPG, PNG, etc. En nuestro caso se utilizan archivos STL. Merece la pena destacar que es gratuito totalmente y compatible con varios sistemas operativos. Además, la impresión puede enviarse a varias impresoras a la vez e imprimir de manera simultánea. [10]

4.3 Impresora empleada

Ha de mencionarse que la impresión 3D de este trabajo de fin de grado se realiza con una impresora modelo Creatily Ender 3 Pro, la cual se observa en la *Figura 24*. Se trata de una impresora que destaca por su rendimiento y versatilidad, además de ser bastante económica.

Posee diferentes ventajas como poseer un canal de filamento estrecho, el cual facilita la utilización de materiales flexibles en las impresiones, la plataforma podría alcanzar en torno a 5 minutos una temperatura de 110 °C, dispone de mecanismos que reducen el riesgo de fugas defectuosas y de estancamiento, su tecnología es sofisticada y estable, etc. [11]



FIGURA 24. Impresora Creatily Ender Pro 3 disponible en el laboratorio. Fuente: elaboración propia.

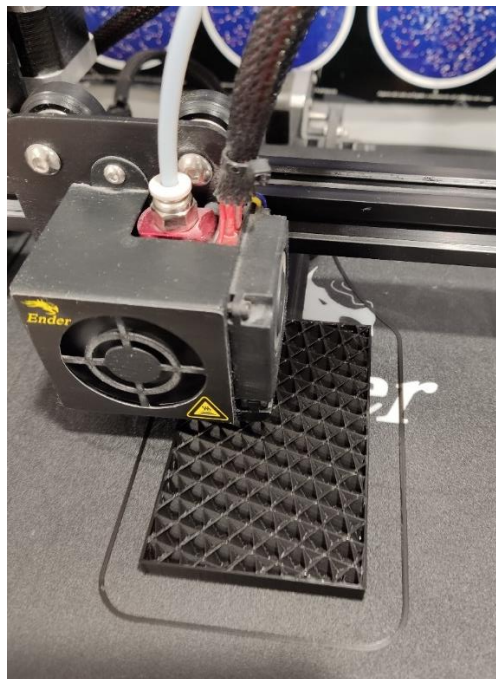


FIGURA 25. Detalle de la estructura cuadrículada. Fuente: elaboración propia.



Tal y como puede observarse en la *Figura 25*, la impresora genera la pieza diseñada previamente creando una estructura cuadrículada, variando la cantidad de plástico según escoja el usuario. A lo largo de este trabajo se emplea una densidad del 10% para disponer en nuestra pieza de la menor cantidad de plástico posible.

4.4 Material impreso

Para la impresión de las piezas a lo largo de todo el presente trabajo se utiliza filamento de ácido poliláctico (PLA) cuyo diámetro es 1,75 milímetros.

Se trata de un termoplástico el cual está fabricado mediante la fermentación de una fuente de carbohidratos como podría ser el almidón de maíz, la caña de azúcar o raíces de tapioca. Se le considera un fluido pseudoplástico cuya viscosidad disminuye con la tensión a la que se vea sometido.

Este tipo de material ganó popularidad en el mundo de la impresión en 3D gracias a sus orígenes a base de productos renovables y a su facilidad a la hora de utilizarlo en las impresiones.

Su punto de fusión es 180 °C, hecho que hace que no sea necesario que se emplee una banda de impresión calefactada ni la cámara cerrada. Sin embargo, al poseer una elevada viscosidad, el cabezal de impresión puede atascarse con mayor facilidad que con otros materiales.

Además, una vez impresa la pieza, esta puede ser lijada o tratada sin demasiada complejidad. [12]

4.5 Parámetros empleados en la impresión

A continuación, en la *Figura 26*, se muestran los parámetros programados en el software Cura para todas las impresiones que se realicen a lo largo del trabajo de fin de grado:

Section	Parameter	Value	Unit
Quality	Layer Height	0.2	mm
	Walls		
Walls	Wall Thickness	0.8	mm
	Wall Line Count	2	
	Horizontal Expansion	0.0	mm
Top/Bottom	Top/Bottom Thickness	0.8	mm
	Top Thickness	0.8	mm
	Top Layers	4	
	Bottom Thickness	0.8	mm
	Bottom Layers	4	
Infill	Infill Density	10.0	%
	Infill Pattern	Cubic	
	Material		
Material	Printing Temperature	200.0	°C
	Build Plate Temperature	60	°C
Speed			
Travel			
Cooling			
Support			
Build Plate Adhesion	Enable Prime Blob	<input type="checkbox"/>	
	Build Plate Adhesion Type	Skirt	
	Build Plate Adhesion Extruder	Extruder 1	

FIGURA 26. Detalle de los parámetros seleccionados por el usuario en la impresión. Fuente: Software Cura.

4.6 Primeros modelos y sus defectos

A lo largo del trabajo, el modelo diseñado que se pretende emplear para la obtención de la pieza final ha sido modificado por diferentes causas. Algunas de ellas relacionadas con problemas dimensionales de los conductos de alimentación, eliminación de material de cara a poder realizar un mejor proceso de colada en el taller, etc. Sin embargo, otros estaban relacionados con inconvenientes a la hora de realizar la impresión 3D en PLA.

El primer modelo que se diseñó, que inicialmente era hueco, tuvo que verse modificado debido a que la impresión 3D coloca una capa de PLA sobre una capa previa. Por tanto, si se diseña de manera hueca, es posible que la estructura de la pieza fallase y no pudiésemos obtener una buena impresión y por ello, fue modificado y se diseñó macizo.

Sin embargo, a pesar de que el modelo reproducía el aspecto que debería tener el modelo real, con elementos como el asiento o el sistema de salida de gases, el hecho de que la base del asiento y la base del paralelepípedo no tuviesen la misma cota inferior Z, provocaba que la totalidad de la pieza quedase en voladizo, con un único punto de apoyo de la pieza que se encontraba en la base del asiento.

Este diseño imposibilitaba la impresión del modelo ya que no es viable que la pieza se sustentase con ese único apoyo, por lo que sería un modelo no válido.

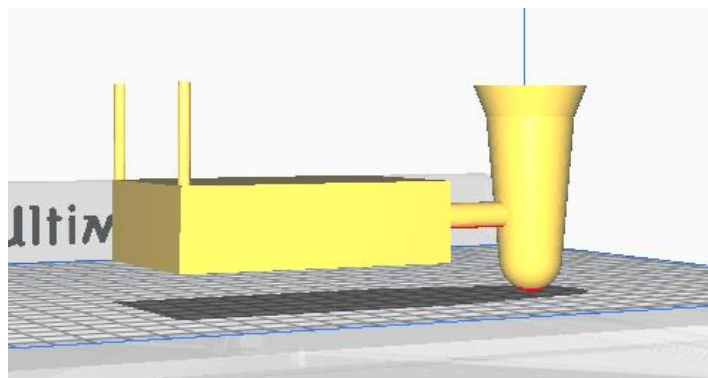


FIGURA 27. Modelo erróneo por problema de voladizo. Fuente: elaboración propia empleando Cura.

Tal y como se puede observar en la *Figura 28*, el punto de color celeste sería el único contacto de la pieza con la base donde imprimimos y el resto de la pieza que se encuentra en color rojo, estaría en voladizo.

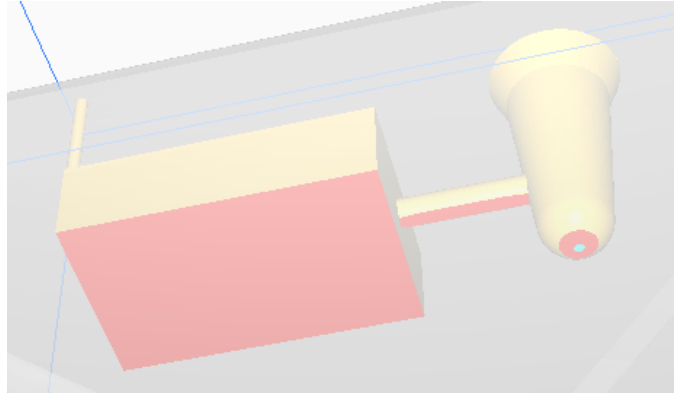


FIGURA 28. Contacto puntual del modelo. Problema por voladizo. Fuente: elaboración propia empleando Cura.

Fruto de estos problemas, se opta por diseñar un segundo modelo cuya cota Z inferior sea la misma en la totalidad de la pieza, evitando problemas de voladizos a la hora de realizar la impresión. Sin embargo, aparecen nuevos problemas ya que de este modo estaríamos eliminando el asiento del modelo.

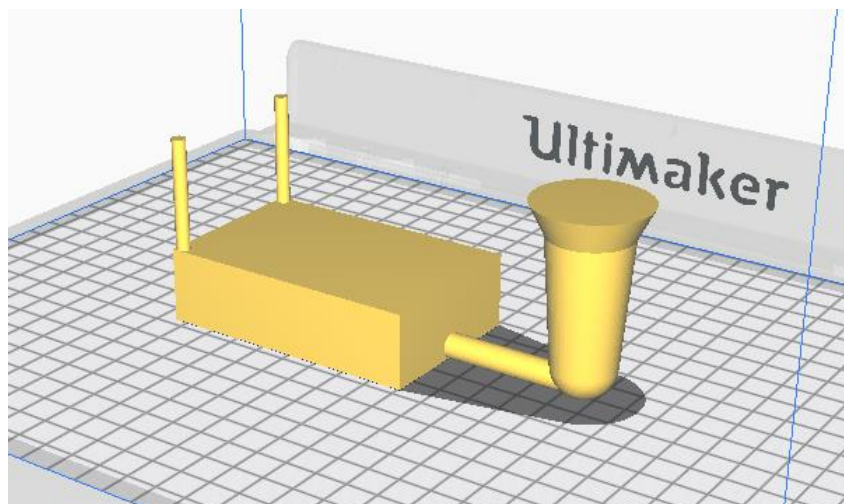


FIGURA 29. Contacto completo de la superficie inferior de la pieza. Fuente: elaboración propia empleando Cura.

Como puede observarse en la *Figura 30*, en esta ocasión la zona azul cian, es decir, la zona de contacto con la base donde se imprime, es completa.

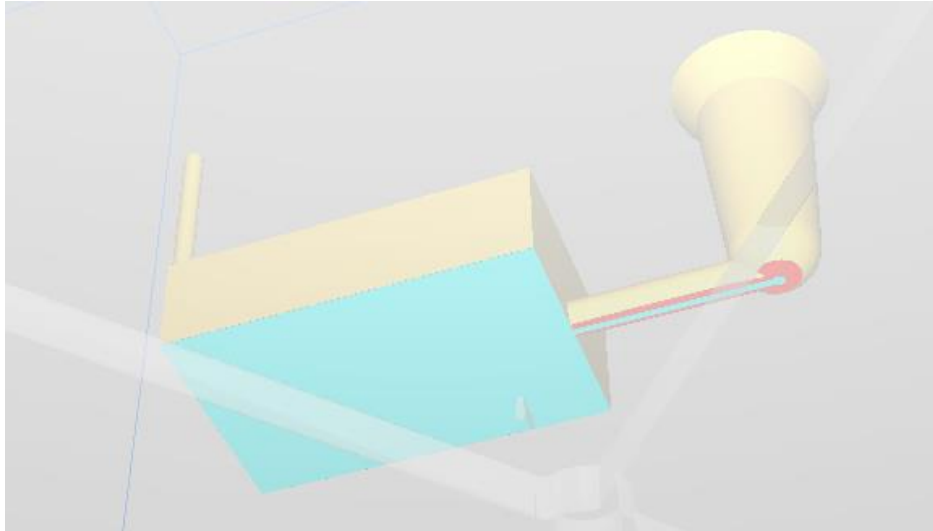


FIGURA 30. Detalle del contacto completo de la superficie inferior. Fuente: elaboración propia empleando Cura.

Finalmente, este segundo modelo tampoco fue impreso ya que sufrió modificaciones con el fin de solventar el problema de no disponer de un asiento en el modelo y otros problemas relacionados con las dimensiones del sistema de alimentación, que ha sido previamente explicado en el capítulo destinado al diseño de la pieza.

4.7 Modelo final impreso

Como decisión final, y tras algunas pruebas realizadas en el taller, se opta por imprimir el modelo 3, en el cual se ha tratado de eliminar la mayor cantidad de plástico posible, excepto en aquellas zonas que por motivos de impresión no era posible y, por tanto, es macizo, como es el caso de la parte del paralelepípedo.

El modelo 3 puede observarse en las *Figuras 31 y 32*.

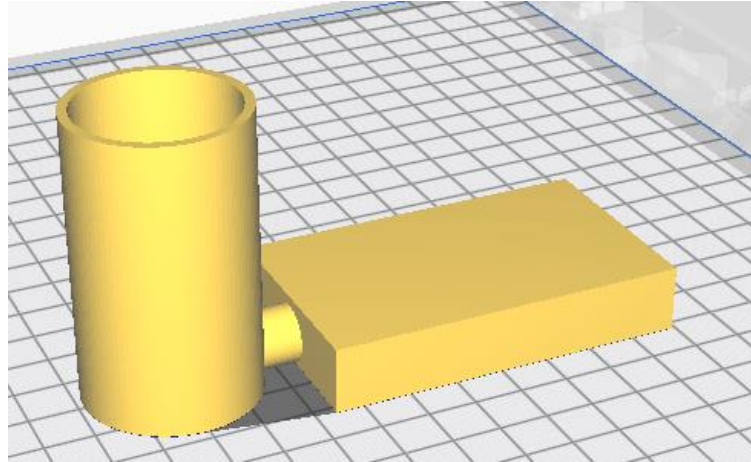


FIGURA 31. Modelo 3. Fuente: elaboración propia empleando Cura.

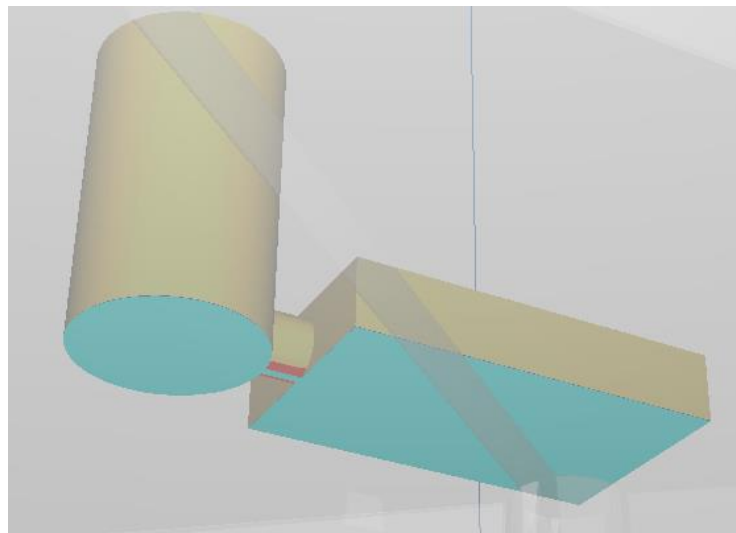


FIGURA 32. Modelo 3. Contacto completo de la superficie inferior. Fuente: elaboración propia empleando Cura.

Además, tratando de solventar el problema de no disponer asiento en el modelo, se opta por diseñar e imprimir un asiento independiente cuyo diámetro cuadre con la base del bebedero del modelo 3. En este caso, el asiento también se diseña hueco para disminuir la cantidad de PLA empleada.

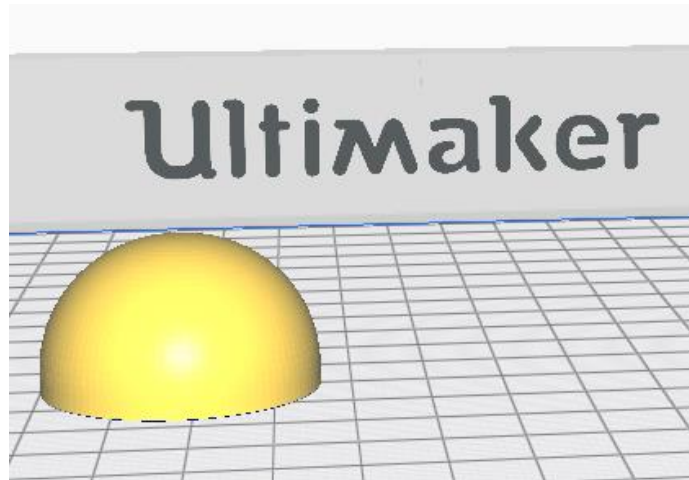


FIGURA 33. Asiento para el modelo 3. Fuente: elaboración propia empleando Cura.

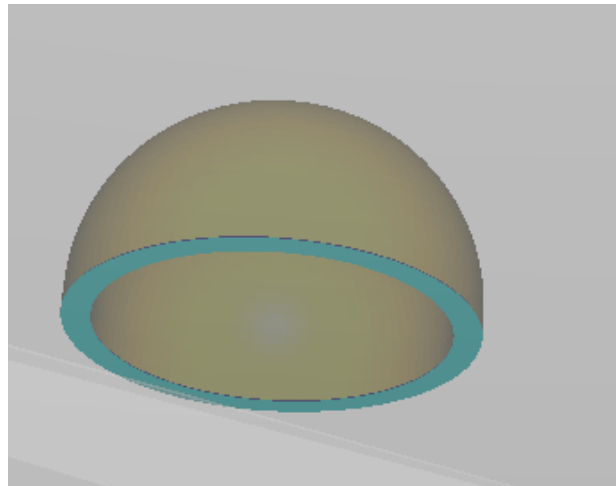


FIGURA 34. Asiento para el modelo 3. Contacto de la superficie inferior. Fuente: elaboración propia empleando Cura.

Una vez ya impresos tanto el modelo como el asiento, que posteriormente se colocarán en el molde junto a las arenas compactas, poseen el siguiente aspecto.

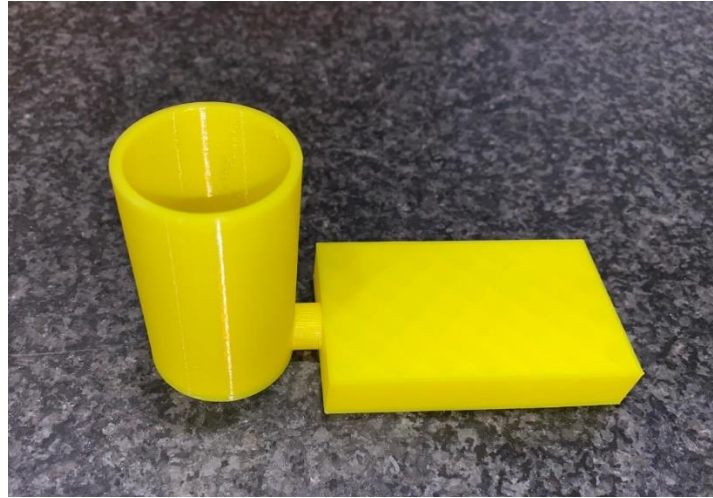


FIGURA 35. Modelo 3 impreso en PLA. Fuente: elaboración propia.



FIGURA 36. Modelo 3 impreso en PLA. Fuente: elaboración propia.



FIGURA 37. Modelo 3 impreso en PLA. Fuente: elaboración propia.



FIGURA 38. Asiento diseñado para el modelo 3. Diferentes perspectivas. Fuente: elaboración propia.

A continuación, en la *Figura 39*, se muestra una simulación de cómo quedarían colocados el modelo junto al asiento.

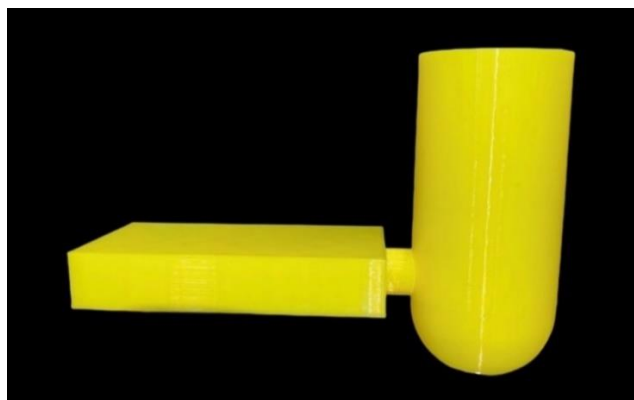


FIGURA 39. Simulación del modelo 3 junto a su asiento. Fuente: elaboración propia.



Universidad de Valladolid

DISEÑO, FABRICACIÓN Y VALIDACIÓN DE MODELOS DESECHABLES
OBTENIDOS MEDIANTE IMPRESIÓN 3D PARA SU USO EN
PROCESOS DE MOLDEO EN ARENA.



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

CAPÍTULO V: DESARROLLO PRÁCTICO EN EL TALLER DEL PROCESO DE MOLDEO EN ARENA.



5.1 Experiencia 1: Pruebas previas en el taller

5.1.1 Introducción

Con la finalidad de tener un primer contacto con el proceso de realizar la fundición con moldes de arena usando modelos impresos en plástico y ver cómo se comportaba dicho material, se realizaron unas primeras pruebas en el taller. A continuación, se detallan los materiales empleados y el proceso que se llevó a cabo.

5.1.2 Metal empleado

En dicha primera prueba se empleó una aleación de bronce con un 14% de estaño. Se trata de la primera aleación de gran relevancia obtenida por el hombre y da su nombre a la Edad de Bronce Antigua, la cual está datada entre el 3000 a.C. y el 2000 a.C., período en el cual empezó a emplearse en armas y utensilios, paso que logró poner fin a la Edad de Piedra.

A continuación, se exponen algunas de las propiedades más destacables del bronce:

- Punto de ebullición: 2230 °C – 2420 °C
- Punto de fusión: 830 °C – 1020 °C
- Densidad: 8,90 g/cm³
- Dureza Brinell: 70 – 200 HB

Además, se trata de un excelente conductor de la electricidad, es fácil de manipular, es resistente a la corrosión y suele acumular menos calor que otros metales. [13]

5.1.3 Arenas empleadas

Las arenas que se utilizaron poseen un nombre comercial denominado Petrobond, la cuales consisten en una mezcla de arena, aceite y agente petrobonding, además de catalizador P-1 en pequeña proporción. Posee granulometría controlada, carece de impurezas y es anhidra, es decir, sin agua. Esto genera que pueda utilizarse con arenas finas sin sufrir una disminución de la permeabilidad. [14]

Destaca por su facilidad a la hora de moldear, con una resistencia alta y que proporciona una buena reproducción de modelo con un gran acabado superficial, sin necesitar un trabajo de acabado posterior. [15]

5.1.4 Geometría que se pretende alcanzar

En la realización de esta prueba se emplea una geometría similar a un bebedero, tal y como puede verse en la *Figura 40*, que previamente ha sido diseñada en CATIA y posteriormente impresa en 3D.

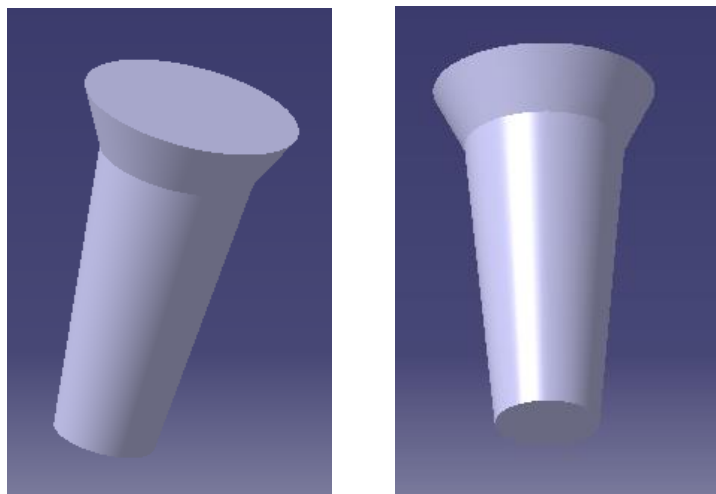


FIGURA 40. Geometría que se pretende obtener en la prueba. Diferentes perspectivas.
Fuente: elaboración propia.

5.1.5 Proceso realizado

En primer lugar, ante el desconocimiento de cómo iba a comportarse el modelo impreso en plástico al realizar el proceso de fundición por colada directa, se decidió que el bebedero impreso pasase de macizo a hueco, intentando reducir la cantidad de material plástico que iba a tener que ser fundido.

Dicho modelo, ya vaciado, se introdujo en los semi moldes junto a la arena compacta.



FIGURA 41. Molde preparado junto al detalle de la eliminación de material en el modelo.
Fuente: elaboración propia.

Se procedió a fundir el bronce en el horno de fragua del taller de Fabricación con la utilización de un crisol de grafito. El proceso duró alrededor de 25 minutos. Además de fundir el bronce, se atemperaron las herramientas que iban a ser empleadas para que posteriormente el cambio de temperaturas no fuese brusco cuando fuesen empleadas y se produjesen roturas.



FIGURA 42. Aleación de bronce preparada en el crisol para ser fundida. Fuente: elaboración propia.



FIGURA 43. Fundición del bronce. Fuente: elaboración propia.

Durante la espera del proceso de la fundición del bronce, se coloca una placa sobre nuestro modelo en la arena compacta, tratando de evitar que se

introduzcan impurezas que puedan generar imperfecciones en el modelo en bronce que pretendemos generar.



FIGURA 44. Placa que impide la entrada de impurezas al modelo. Fuente: elaboración propia.

A continuación, se realiza el proceso de colada directa sobre el molde de arena. Se muestra una secuencia de cinco imágenes del vertido del bronce en el molde de arena.



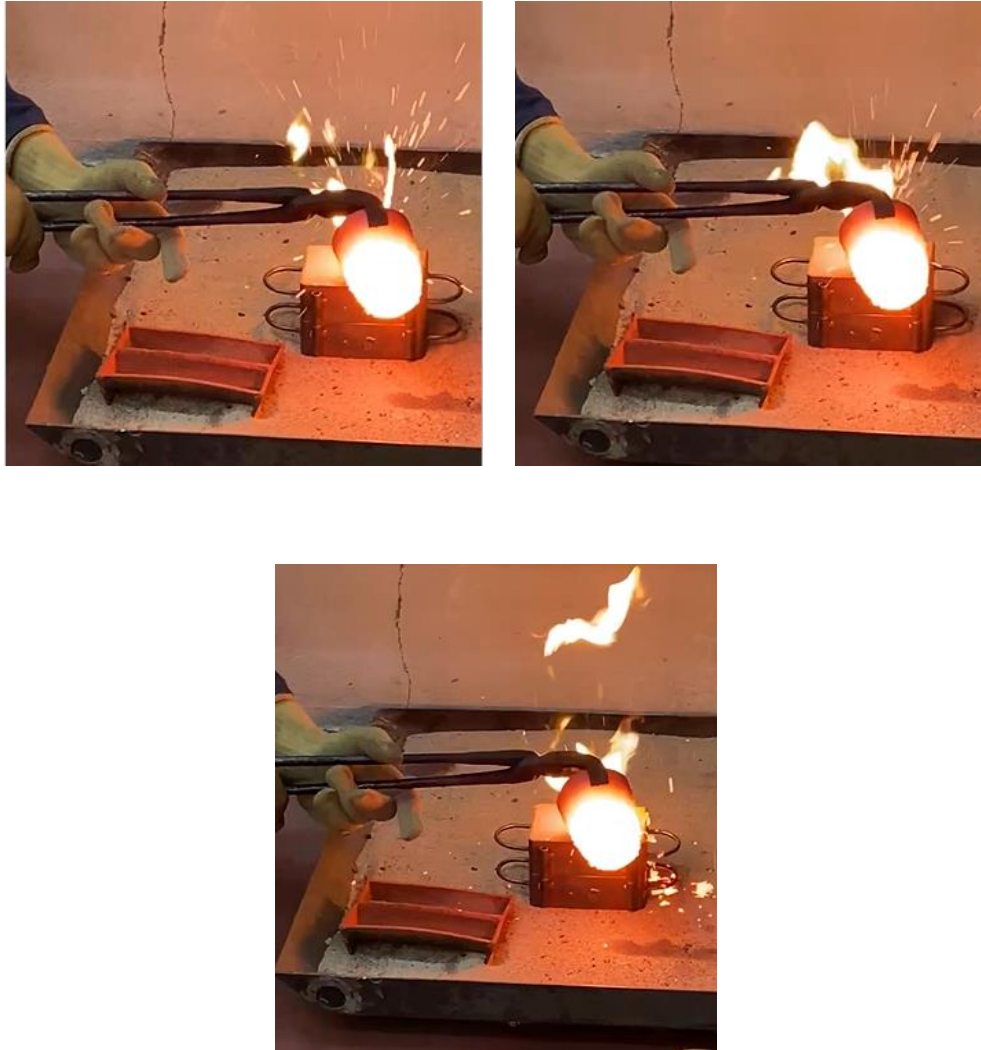


FIGURA 45. Secuencia de imágenes del proceso de colada sobre el modelo. Fuente: elaboración propia.

Como se puede observar en dicha secuencia de la *Figura 45*, debido a la combustión que se genera al echar el bronce sobre el plástico impreso, se produjeron salpicaduras de fluido a muy alta temperatura y posteriormente se quemó el plástico, generando altas llamas.

Tuvo que verse interrumpido el vertido ante la peligrosidad de lo anteriormente citado, y a continuación, cuando dichas llamas disminuyeron, se trató de rellenar el modelo completamente. Es decir, la colada directa se realizó en dos etapas diferenciadas, lo cual podría generar un cambio de las características del material, siendo una situación que no es la que se busca.



FIGURA 46. Modelo quemado tras la colada realizada. Fuente: elaboración propia.

Una vez enfriado, se realiza el desmoldeo del modelo, pudiendo apreciar que la pieza en bronce obtenida reproduce en bastante buena medida el modelo que habíamos impreso, adquiriendo un buen acabado superficial y reproduciendo detalles como la circunferencia que aparecía en la base del bebedero, fruto de la impresión 3D.



FIGURA 47. Pieza en bronce obtenida. Fuente: elaboración propia.



FIGURA 48. Comparación del modelo impreso en PLA y la pieza final en bronce. Fuente: elaboración propia.



FIGURA 49. Comparación de los detalles reproducidos en la pieza final que provenían del modelo en PLA. Fuente: elaboración propia.



5.1.6 Conclusiones

Tras la realización de esta prueba, se llega a la conclusión de que se trata de un proceso que posee una alta peligrosidad y que no cumple con las medidas de seguridad que deberíamos llevar a cabo para tratar preservar la integridad del operario del taller, hecho por el cual se ha de buscar una solución diferente que no comprometa dicha seguridad.

5.2 Experiencia 2: Utilización de un soplete para fundir el modelo impreso en PLA.

5.2.1 Introducción

A raíz de los problemas que surgieron en las pruebas previamente mencionadas, se trata de encontrar una solución diferente que permita que no se produzcan salpicaduras de material a altas temperaturas que puedan ser peligrosas.

A lo largo de esta segunda experiencia, se emplea el tercer modelo que fue diseñado junto a su asiento. Por tanto, ha de prepararse el molde junto a las arenas, de nuevo Petrobond, del mismo modo que se realizó en las pruebas previas.

5.2.2 Proceso realizado

En primer lugar, se compactan las arenas junto al asiento, como podemos observar en la *Figura 50*.

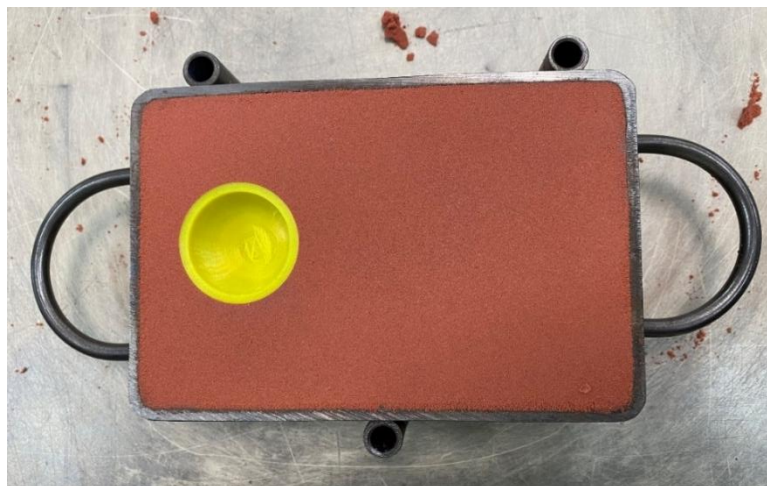


FIGURA 50. Molde preparado con el asiento del modelo. Fuente: elaboración propia.

A continuación, se opta por pegar con una pequeña cantidad de pegamento el resto del modelo al asiento, con el fin de que no se desplace cuando se compacte el resto de las arenas y se produzcan errores a la hora de obtener la pieza final. Por tanto, se observaría de la siguiente manera:

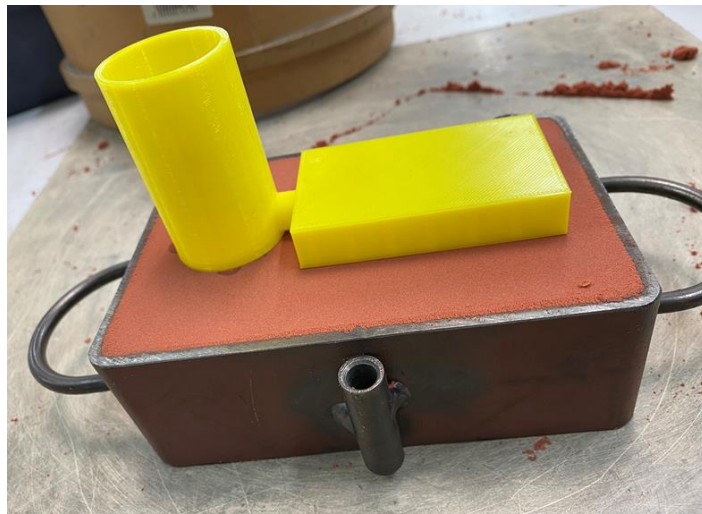


FIGURA 51. Colocación del modelo sobre el asiento pegado con pegamento. Fuente: elaboración propia.

Posteriormente, se completa el molde obteniendo lo siguiente:



FIGURA 52. Molde completo preparado. Fuente: elaboración propia.

La idea que se pretende llevar a cabo es la eliminación del PLA para después verter el metal líquido sin que haya contacto con el plástico que pueda producir una combustión poco deseable.

El semi molde sobre el que se trabajará con el soplete es el que contiene el modelo impreso.



FIGURA 53. Semi molde superior junto al modelo. Fuente: elaboración propia.

Además, hemos de mencionar que en el semi molde restante, donde ha quedado impresa la forma del asiento del modelo, se observan ligeras imperfecciones alrededor del borde de dicho asiento, fruto de la adhesión del pegamento empleado para fijar el asiento y el modelo.

Dichas imperfecciones pueden ser observadas en la siguiente imagen:

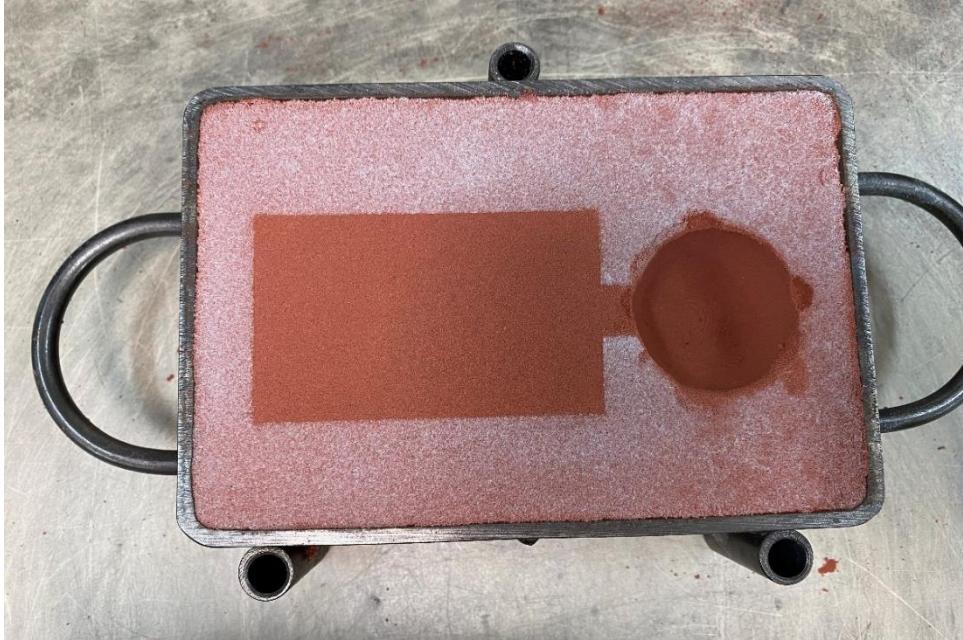


FIGURA 54. Imperfecciones debidas a la adhesión del pegamento en las arenas. Fuente: elaboración propia.

A continuación, se muestran unas imágenes del proceso de fundición del modelo por medio de un soplete:







*FIGURA 55. Secuencia de la fundición del modelo impreso en PLA empleando un soplete.
Fuente: elaboración propia.*

A pesar de que el plástico se ha fundido y, por tanto, ya solo disponemos de las arenas con la forma del modelo impresa en ellas, hemos de puntualizar varios aspectos importantes. En primer lugar, al haber trabajado con un soplete cuya temperatura es muy elevada y el cual ha sido colocado muy cerca de los semi moldes, las arenas se han quemado por lo que no podrás ser reutilizadas en un futuro. Además, pueden observarse fallos en los bordes de las arenas compactas, fruto de que, al derretirse el plástico, este ha arrastrado porciones de las arenas, provocando fallos en ellas que generarían defectos en la superficie y los bordes de la pieza que se pretende obtener como resultado final.

En las siguiente imágenes podemos ver los defectos previamente mencionados tras las fundición del plástico con el soplete.



FIGURA 56. Defecto en las arenas quemadas. Fuente: elaboración propia.

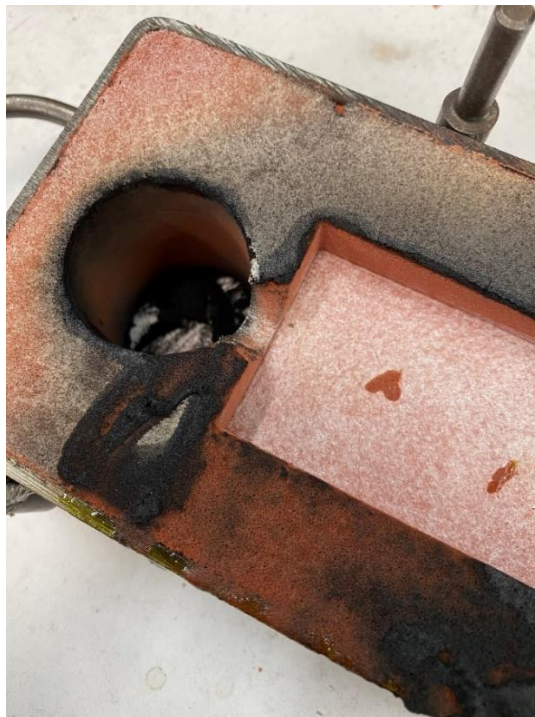


FIGURA 57. Defecto en las arenas quemadas. Fuente: elaboración propia.

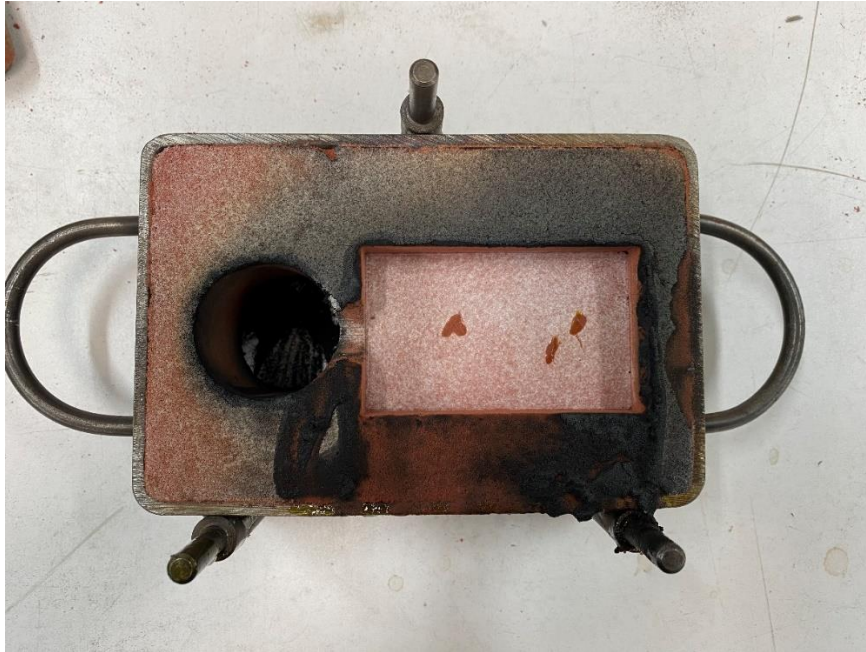


FIGURA 58. Defecto en las arenas quemadas. Fuente: elaboración propia.

5.2.3 Conclusiones

Por tanto, ha de concluirse que la segunda experiencia empleando un soplete, no es una solución viable y, por tanto, no se realizará la posterior fundición, debido a que, si se obtuviese una pieza final de cualquier metal, poseería fallos y un mal acabado superficial, por lo que ha de buscarse otra solución diferente.



5.3 Experiencia 3: Utilización de un horno para fundir el modelo impreso en PLA y obtención de la pieza final.

5.3.1 Introducción

Debido a los problemas generados en las arenas empleando el soplete para tratar de fundir el modelo de PLA, se busca una alternativa que consista en emplear una temperatura menor durante un período de tiempo mayor, de tal modo que el proceso no sea tan agresivo. Para ello, se emplea un horno.

5.3.2 Primera parte de la experiencia: eliminación del PLA.

5.3.2.1 Horno empleado

Para el proceso de eliminación del PLA que está contenido en las arenas compactas se emplea un horno de cámara de calentamiento rápido cuya marca es Carbolite Furnaces que se encuentra en el laboratorio del departamento de Ciencia de Materiales.

Este tipo de hornos suele estar disponible en diferentes volúmenes y se caracteriza por alcanzar temperaturas alrededor de los 1000 °C. Destaca el rápido calentamiento y posterior enfriamiento de la cámara de estos hornos, gracias al aislamiento de baja masa térmica en combinación con las resistencias desnudas.

Además, posee una puerta que se eleva en paralelo a la cámara de trabajo, hecho el cual protege al usuario que esté utilizando este horno. [16]



FIGURA 59. Horno Carbolite Furnaces. Fuente: elaboración propia.

5.3.2.2 Proceso realizado

En esta tercera experiencia en el taller, la preparación del molde junto al modelo, el asiento y las arenas es exactamente igual que en la experiencia anterior.



FIGURA 60. Molde preparado antes de ser introducido al horno. Fuente: elaboración propia.

Como se ha citado previamente, se pretende eliminar el PLA que conforma el modelo 3, de tal modo que quede reproducida la forma del este en las arenas compactas pero que dichas arenas no se vean afectadas en zonas que puedan generar errores en la pieza que posteriormente se va a obtener.

Por tanto, se introduce el semi molde superior, que es el que contiene el modelo impreso en PLA, en un horno el cual se programará para que el proceso alcance temperaturas alrededor de los 400 °C. Además, debajo del semi molde se colocará una bandeja que recoja todo el plástico que se derretirá.



FIGURA 61. Temperatura del proceso que se realiza en el horno. Fuente: elaboración propia.

Por tanto, tras el horneado, el plástico es eliminado del semi molde obteniendo tan solo las arenas compactas que contienen la forma de la pieza que queremos obtener posteriormente cuando se realice la fundición. Tal y como se puede comprobar en la *Figura 64*, las arenas están dañadas ya que tras el proceso se han quemado y, por tanto, no pueden ser recuperadas para que sean empleadas en otros procesos de moldeo. Sin embargo, los bordes que delimitan la pieza no están tan dañados como ocurrió en el caso de la eliminación del PLA empleando un soplete. Como consecuencia, se considera apto para realizar la fundición.



FIGURA 62. Proceso de eliminación del PLA en el horno. Fuente: elaboración propia.



FIGURA 63. Resultado tras el proceso de horneado. Fuente: elaboración propia.



FIGURA 64. Resultado de las arenas compactas tras el proceso de horneado. Fuente: elaboración propia.

5.3.3 Segunda parte de la experiencia: obtención de la pieza final.

5.3.3.1 Metal empleado

Para la obtención de dicha pieza se emplea la misma aleación de bronce que se utilizó en la prueba previa que se realizó en este trabajo y que se explicó previamente en el *Apartado 5.1.2* de este documento.

5.3.3.2 Proceso realizado

El proceso de fundición que se realiza para obtener como resultado la pieza que se diseñó previamente en CATIA-V5 es muy similar al que se realizó en las

pruebas previas, con la única diferencia de que, en este caso, el PLA en el que se ha impreso el modelo ha sido eliminado previamente para evitar las salpicaduras peligrosas que se ocasionaron en dicha prueba.

Por tanto, se calienta la aleación de bronce en un crisol para lograr el estado líquido de la misma y proceder, posteriormente, a la colada de esta en el molde de nuestra pieza.



FIGURA 65. Crisol que contiene la aleación de bronce. Fuente: elaboración propia.

En esta ocasión, al no entrar en contacto con el modelo sólido de PLA y no tener que derretirlo, la colada se produjo sin ningún inconveniente, de tal modo que se rellenó la cavidad del molde en una única etapa sin ningún problema. Ha de

destacarse que se realizaron unos pequeños conductos en las arenas para la salida de gases.



FIGURA 66. Cavity del molde rellena de la aleación de bronce. Fuente: elaboración propia.



FIGURA 67. Desmoldeo de la pieza. Fuente: elaboración propia.

Una vez ya se ha enfriado y solidificado la pieza, se procede al desmoldeo de la mismo, obteniendo una pieza que reproduce bastante bien la pieza que se diseñó en un comienzo pero que, sin embargo, posee algún defecto en su superficie y cuyas dimensiones han podido variar respecto de lo diseñado debido a la posterior contracción del material cuando este se enfría.



FIGURA 68. Pieza final obtenida. Fuente: elaboración propia.

5.3.3.3 Conclusiones

A diferencia de las experiencias anteriores, el proceso ha podido llevarse a cabo de una manera segura y obteniendo una pieza final que reproduce la forma de aquello que se diseñó. Sin embargo, tal y como se ha comentado, existen fallos en la superficie de esta y posibles variaciones dimensionales que se analizarán posteriormente en este documento.



Universidad de Valladolid

DISEÑO, FABRICACIÓN Y VALIDACIÓN DE MODELOS DESECHABLES
OBTENIDOS MEDIANTE IMPRESIÓN 3D PARA SU USO EN
PROCESOS DE MOLDEO EN ARENA.



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

CAPÍTULO VI: CÁLCULOS Y MEDICIONES.



6.1 Dimensiones del modelo 3 junto a su asiento, diseñados utilizando CATIA-V5

Tanto el modelo 3 como el asiento, que fueron diseñados empleando el software CATIA-V5, poseen las siguiente dimensiones:

Tabla 9. Dimensiones del modelo 3 y su asiento, diseñados en CATIA-V5. Fuente: elaboración propia.

Paralelepípedo	
Largo (mm)	75
Ancho (mm)	45
Alto (mm)	14
Canal de alimentación	
Longitud total (mm)	7
Diámetro exterior (mm)	12
Bebedero	
Altura total (mm)	60
Diámetro exterior (mm)	36
Diámetro interior (mm)	31
Asiento	
Altura total (mm)	20
Diámetro exterior (mm)	36
Diámetro interior (mm)	31

6.2 Dimensiones del modelo 3 junto a su asiento, impresos en PLA

Tras la impresión de ambas piezas que configuran el modelo al completo, se procede a tomar mediciones de las dimensiones de este empleando un pie de rey digital, resultando lo siguiente:



Tabla 10. Dimensiones del modelo 3 tomadas con un pie de rey digital. Fuente: elaboración propia.

Paralelepípedo	
Largo (mm)	75,06
Ancho (mm)	45,19
Alto (mm)	14,31
Canal de alimentación	
Longitud total (mm)	8,01
Diámetro exterior (mm)	12,03
Bebedero	
Altura total (mm)	59,94
Diámetro exterior (mm)	36,11
Diámetro interior (mm)	31,13
Asiento	
Altura total (mm)	20,03
Diámetro exterior (mm)	36,12
Diámetro interior (mm)	30,98

6.3 Dimensiones de la pieza final obtenida en bronce

En relación con la pieza final, solo se tendrán en cuenta las dimensiones del paralelepípedo ya que esta la parte que se pretende obtener. El material que conforma el bebedero, asiento y demás partes del modelo, debería separarse de la pieza final y podría volver a ser fundido para reutilizarse en futuros procesos de fundición.

Dichas dimensiones, tomadas con un pie de rey digital, se recogen en la *Tabla 11*:

Tabla 11. Dimensiones de la pieza en bronce. Fuente: elaboración propia.

Paralelepípedo	
Largo (mm)	75,17
Ancho (mm)	44,66
Alto (mm)	13,92



6.4 Derivaciones dimensionales

A continuación, se pretenden analizar las derivaciones dimensionales, en valor absoluto, que existen entre el modelo diseñado en CATIA-V5, el modelo impreso en PLA y la pieza de bronce obtenida como resultado final. Al igual que en el anterior apartado, se tendrán únicamente en cuenta las dimensiones del paralelepípedo. Aparecerán sombreadas en color verde aquellas derivaciones que implican una derivación positiva, y en color rojo, las derivaciones que resulten ser negativas.

En primer lugar, en la *Tabla 12*, se analizan las derivaciones dimensionales del modelo impreso en PLA respecto del que fue diseñado con el software CATIA-V5.

Tabla 12. Derivaciones dimensionales del modelo de PLA respecto del teórico.

Fuente: elaboración propia.

Paralelepípedo	Derivación del modelo de PLA respecto del teórico
Largo (mm)	0,06 ± 0,02
Ancho (mm)	0,19 ± 0,02
Alto (mm)	0,31 ± 0,02

Como se puede observar, todas las dimensiones del paralelepípedo aumentan ligeramente en la pieza impresa. Podría deberse a la precisión de la impresora a la hora de depositar las sucesivas capas de plástico unas encima de otras.

En segundo lugar, hemos de analizar la pieza final obtenida respecto lo diseñado en CATIA-V5. Los datos se recogen en la *Tabla 13*.

Tabla 13. Derivaciones dimensionales de la pieza de bronce respecto del modelo teórico. Fuente: elaboración propia.

Paralelepípedo	Derivación de la pieza en bronce respecto del modelo teórico
Largo (mm)	0,17 ± 0,02
Ancho (mm)	0,34 ± 0,02
Alto (mm)	0,08 ± 0,02



Tal y como puede comprobarse, tanto el alto como el ancho disminuyen ligeramente respecto del diseño inicial. Podría deberse a la contracción del material, en este caso bronce, en la etapa de enfriamiento y solidificación que sufre tras el proceso de fundición. Sin embargo, la dimensión que corresponde con el largo de la pieza aumenta ligeramente.

A pesar de que lo lógico sería que ocurriese lo mismo que con las dimensiones previamente citadas, es posible que haya desviaciones fruto de los defectos que sufrieron las arenas en la eliminación del plástico empleando un horno en el laboratorio.

Por último, en la *Tabla 14*, se analiza la pieza final en comparación con el modelo impreso en PLA.

Tabla 14. Derivaciones dimensionales de la pieza en bronce respecto del modelo de PLA. Fuente: elaboración propia.

Paralelepípedo	Derivación de la pieza en bronce respecto del modelo de PLA
Largo (mm)	$0,11 \pm 0,02$
Ancho (mm)	$0,53 \pm 0,02$
Alto (mm)	$0,39 \pm 0,02$

Como es lógico, las desviaciones en este análisis son fruto de lo previamente citado, la imprecisión a la hora de la impresión y posteriormente, a los defectos originados en las arenas y a la contracción del metal.



Universidad de Valladolid

DISEÑO, FABRICACIÓN Y VALIDACIÓN DE MODELOS DESECHABLES
OBTENIDOS MEDIANTE IMPRESIÓN 3D PARA SU USO EN
PROCESOS DE MOLDEO EN ARENA.



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

CAPÍTULO VII: COSTES ECONÓMICOS.



7.1 Introducción

A lo largo de este capítulo se pretende realizar un estudio sobre los costes teóricos que conlleva la realización de este trabajo de fin de grado y, por tanto, determinar si podría ser viable o no.

Han de considerarse los costes tanto de los materiales que se han empleado para llevar a cabo el trabajo como la aportación humana necesaria.

Por tanto, los **costes totales** estarán compuestos tanto por los costes directos como por los indirectos. En primer lugar, los **costes directos** se relacionan con aquellos costes que se pueden asignar directamente al cálculo del precio final del producto o servicio que se pretende ofrecer. Merece la pena destacar que los costes de mano de obra y el material amortizable pertenecen a este tipo de costes. Además, los **costes indirectos** son aquellos que intervienen en el proceso de obtención del producto final pero no en el producto final directamente. Suelen corresponderse con costes administrativos o de explotación.

7.2 Materiales empleados

- Materiales físicos:
 - Ordenador portátil ASUS TP401-BZ001T.
 - Impresora 3D modelo Creatily Ender 3 Pro.
 - Horno cámara de calentamiento rápido Carbolite Furnaces.
 - Filamento de PLA.
 - Aleación de bronce 14%.
 - Soplete.
 - Pie de rey digital.
 - Molde.
 - Arenas (Petrobond).
 - Crisol.



- Software:
 - Licencia de CATIA-V5.
 - Licencia de Cura.
 - Microsoft Office 365.

7.3 Costes directos

Se recoge a continuación en la *Tabla 15* el promedio de días trabajados a lo largo de un año por un usuario teniendo en cuenta aquellos días que corresponden con fines de semana, festivos nacionales, etc.

Tabla 15. Estimación de días útiles trabajados. Fuente: elaboración propia.

Días totales de un año	365
Días que corresponden con fines de semana	104
Días festivos	14
Días laborables de vacaciones	22
Días destinados a asuntos personales	6
Días totales útiles de trabajo	219

Teniendo en cuenta que las jornadas laborales se componen de 8 horas diarias, el total de horas trabajadas a lo largo de un año ascenderían a **1752 h/año**.

A continuación, se calculan los costes que supone tener un trabajador que pueda realizar el trabajo:

Tabla 16. Gasto anual que supone contratar un trabajador. Fuente: elaboración propia.

Sueldo bruto	30000,00 €/año
Prestaciones a la seguridad social (30%)	9000,00 €/año
Formación en riesgos laborales y EPI	150,00 €/año
Total	39150,00 €/año

Por lo que el coste de mano de obra por hora sería **22,35 €/hora**.



Debe analizarse, por tanto, el tiempo total que ha llevado la realización del trabajo de fin de grado, datos los cuales se recogen a continuación,

Tabla 17. Horas empleadas en la elaboración del TFG. Fuente: elaboración propia.

Actividad	Horas empleadas
Planificación del TFG	20
Documentación	40
Diseño de los modelos en CATIA-V5	70
Empleo de Cura e impresión de los modelos	50
Actividades en el taller para la obtención de las piezas	40
Toma de medidas de las piezas	10
Elaboración de la memoria del TFG	120
Total de horas empleadas	350

El **coste total** que corresponde con el **personal** se calcula multiplicando el total de horas empleadas por el coste de mano de obra por hora previamente calculado, ascendiendo por tanto a **7822,50 €**.

Además, deben ser estimados los **costes de los materiales amortizables**, es decir, aquellos que podrán ser reutilizados al margen de nuestro trabajo. Los cálculos se realizan en función de los años que dichos equipos puedan ser utilizados además de las horas que sean empleados a lo largo de este trabajo.

Se realiza del siguiente modo:

$$\text{Coste total} = \frac{\text{Precio de compra}}{\text{Años uso} \cdot \text{Días trabajo al año} \cdot \text{Horas diarias de trabajo}} \cdot \text{Horas de uso}$$

(Ecuación 9)



Tabla 18. Costes directos amortizables. Fuente: elaboración propia.

Concepto	Precio de compra (€)	Años de uso	Horas de uso	Coste total (€)
Ordenador portátil ASUS TP401-BZ001T	500,00	5	310	17,70
Impresora 3D modelo Creatily Ender 3 Pro	192,00	5	50	1,10
Horno cámara de calentamiento rápido Carbolite Furnaces	800,00	12	40	1,53
Aleación de bronce 14%	25,00	1	40	0,60
Soplete	15,00	1	40	0,04
Pie de rey digital	40,00	8	10	0,03
Molde	50,00	15	40	0,08
Arenas (Petrobond)	18,00	5	40	0,08
Crisol	30,00	15	10	0,01
Licencia de CATIA-V5	100,00	1	70	4,00
Licencia de Cura	0,00	1	50	0,00
Microsoft Office 365	70,00	1	120	4,80
Total				29,97

Además, hemos de tener en cuenta el **coste de los materiales no amortizables**, aquellos que no podrán ser reutilizados tras este trabajo.

Tabla 19. Costes directos no amortizables. Fuente: elaboración propia.

Servicio	Coste total (€)
Filamento de PLA	5,00
Servicios de impresión y encuadernación	50,00
Otros servicios	25,00
Total	70,00

Por tanto, los **costes directos totales** se calculan como la suma del coste de mano de obra, del material amortizable y del no amortizable.



Tabla 20. Costes directos totales. Fuente: elaboración propia.

Costes directos totales	Coste total (€)
Mano de obra	7822,50
Material amortizable	29,97
Material no amortizable	70,00
Total	7922,47

7.4 Costes indirectos

Como **costes indirectos** hemos de tener en cuenta aquellos que no podemos atribuir a ningún elemento en concreto pero que son imprescindibles para poder llevar a cabo el trabajo.

Tabla 21. Costes indirectos totales. Fuente: elaboración propia.

Costes indirectos totales	Coste total (€)
Costes administrativos	150,00
Costes de explotación	450,00
Total	600,00

7.5 Costes totales

Finalmente, los **costes totales** se calculan sumando el total de costes directos y el de indirectos, añadiendo además el impuesto de valor añadido.

Tabla 22. Costes totales del TFG. Fuente: elaboración propia.

Costes totales	Coste total (€)
Costes directos totales	7922,47
Costes indirectos totales	600,00
Total sin IVA	8522,47
Total con IVA (21%)	10312,19



Universidad de Valladolid

DISEÑO, FABRICACIÓN Y VALIDACIÓN DE MODELOS DESECHABLES
OBTENIDOS MEDIANTE IMPRESIÓN 3D PARA SU USO EN
PROCESOS DE MOLDEO EN ARENA.



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

CAPÍTULO VIII: CONCLUSIONES.



8.1 Conclusiones

Al comienzo de este trabajo de fin de grado se buscaba mejorar el proceso de fundición empleando moldes de arena que hasta ahora se ha solido realizar. El objetivo era la utilización de modelos desechables impresos en 3D, los cuales se fundiesen al realizar la colada directa del metal que se emplease, y así obtener la pieza final que se desease sin tener que extraer el modelo pudiendo ocasionar defectos en las arenas que luego se viesan reproducidos en la pieza final.

Desafortunadamente, no fue factible la obtención de la pieza de ese modo ya que la peligrosidad era muy elevada debido a las salpicaduras de plástico que se producen cuando el metal entra en contacto con el plástico sólido, por lo que se podía comprometer la integridad física del usuario que realizase las labores de taller.

Se concluyó, por tanto, que debía encontrarse una alternativa más segura, eliminando el PLA antes de realizar la colada. Para ello, se empleó un soplete, pero las arenas compactas se vieron dañadas y tampoco fue viable. Por último, tras derretir el plástico empleando un horno, pudo obtenerse la pieza final en bronce.

El trabajo realizado demuestra que pueden incorporarse técnicas de diseño e impresión 3D a los métodos empleados tradicionalmente, de tal modo que los modelos pueden ser generados y almacenados en un servidor en el cual se puede acceder y disponer de dichos modelos de manera instantánea. En caso de tener que realizarse el proceso de fundición, únicamente se debería imprimir el modelo, evitando tener que disponer de un almacén físico de modelos, lugar donde estos podrían deteriorarse con el paso del tiempo.

Además, otra clara ventaja de tener los modelos digitalizados es la facilidad que se tiene a la hora de realizar posibles variaciones en dicho modelo. De este modo, el proceso se vería reducido en tiempo ya que, tras las modificaciones realizadas por la Oficina Técnica, se pasaría a la etapa de impresión, sin tener



que pasar por Fabricación para que ajustasen y retocasen el modelo antes de realizar la fundición.

Sin embargo, el proceso realizado posee limitaciones. A pesar de que dicho proceso es innovador, e incluye un proceso de diseño e impresión empleando herramientas muy útiles, permitiéndote diseñar de manera rápida y eficaz el modelo de la pieza que se vaya a querer obtener, el modelo que obtenemos en PLA es desechable y, por tanto, solo se podría usar una vez. Por tanto, deberíamos imprimir diferentes copias en caso de querer obtener varias piezas finales. Además, el plástico empleado no puede recuperarse tras ser derretido en el horno.

Merece la pena destacar que aquel semi molde que es introducido en el horno para que el plástico se derrita, al estar sometido a altas temperaturas durante un período largo de tiempo, las arenas compactas, en nuestro caso Petrobond, se queman y, por tanto, no pueden ser recuperadas para emplearlas en otros procesos de moldeo futuros, hecho que no ocurre en los procesos tradicionales.

En relación con las variaciones dimensionales que sufre la pieza final respecto de diseño inicial, es algo que ocurre también en los procesos convencionales, debido en gran medida a la contracción del metal en su etapa de enfriamiento y solidificación. También es cierto que en nuestro caso disponemos ya de ligeras variaciones dimensionales en el modelo impreso en PLA, por lo que indudablemente, también se ve afectada la pieza final. Sin embargo, todas las variaciones dimensionales medidas están dentro del orden de magnitud de la precisión dimensional que se espera en este tipo de proceso de fabricación.

Por último, los defectos en el acabado superficial de la pieza, los cuales se generan también en dichos procesos convencionales, fruto de diferentes factores como defectos originados en las arenas, llenados de la cavidad del molde incompletos, etc. En nuestra pieza también existen errores, seguramente generados sobre las arenas cuando el plástico ha sido derretido.



El proceso es innovador y abarca diferentes campos de diseño y desarrollo de la pieza, pero posee varias limitaciones que dificultan que el proceso tradicional sea sustituido.

8.2 Líneas futuras

Con relación a las líneas futuras que se podrían llevar en este trabajo, una de las más importantes sería encontrar un método de eliminación del plástico que conforma nuestro modelo que no implicase que las arenas se estropeasen, sin embargo, es algo complicado.

Otra línea de trabajo sería el empleo tanto de diferentes plásticos en la impresión de la pieza como la obtención de la pieza final en diferentes materiales, como podría ser aluminio o latón, para poder comparar las diferentes propiedades de las piezas.

Por último, podrían diseñarse piezas cuya geometría fuese más compleja para ver cómo se comporta y qué variaciones dimensionales sufre tras cada fase del trabajo.



Universidad de Valladolid

DISEÑO, FABRICACIÓN Y VALIDACIÓN DE MODELOS DESECHABLES
OBTENIDOS MEDIANTE IMPRESIÓN 3D PARA SU USO EN
PROCESOS DE MOLDEO EN ARENA.



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

CAPÍTULO IX: BIBLIOGRAFÍA.



9.1 Bibliografía

- [1] Groover, M.P. (2007). *Fundamentos de manufactura moderna*. 3ª edición. Lehigh University: McGrawHill.
- [2] Kalpakjian, S y Schmid. S.R. (2006). *Manufactura, ingeniería y tecnología*. 5ª edición. Pearson Education, Inc.
- [3] González Felipe, B. (2020). *Aplicación de la impresión 3D en la fabricación de un molde para fundición en arena. Parte 2*. Trabajo de Fin de Grado. Madrid, ICAI.
- [4] Barona, G., Guilcamaigua, J., Albarracín, M. y Velasteguí E. (2018). *Arenas de moldeo aglomeradas con resinas: orgánicas sintéticas, inorgánicas y orgánicas naturales biopolímeros, aplicadas en la industria automotriz*. Revista electrónica Ciencia Digital, 3(3), 587-616. Consulta online realizada el 6 de febrero de 2022. Disponible en: <http://cienciadigital.org/revistacienciadigital2/index.php/CienciaDigital/articulo/view/178/>
- [5] Schey, J. A (2002). *Procesos de manufactura*. 3ª edición. University of Waterloo, Ontario: McGrawHill.
- [6] Siemens. *Diseño asistido por ordenador (CAD)*. Consulta online realizada el 28 de diciembre de 2021. Disponible en: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/es/our-story/glossary/computer-aided-design-cad/12507>
- [7] 3Dnatives, Alicia M. *CATIA, el software que trasciende la tecnología de diseño CAD*. Consulta online realizada el 3 de enero de 2022. Disponible en: <https://www.3dnatives.com/es/catia-software-tecnologia-cad-080720202/>



[8] Autodesk. *Impresión 3D*. Consulta online realizada el 26 de diciembre de 2021. Disponible en: <https://www.autodesk.es/solutions/3d-printing>

[9] Impresora 3D online. *Programa Ultimaker Cura 3D – Tutorial 2021*. Consulta online realizada el 3 de enero de 2022. Disponible en: <https://impresora-3d.online/cura-software-para-impresoras-3d-tutorial/>

[10] 3Dnatives, Alicia M. *Las características de Cura, el laminador más extendido en el mercado de la impresión 3D*. Consulta online realizada el 3 de enero de 2022. Disponible en: <https://www.3dnatives.com/es/cura-laminador-para-impresion-3d-250320202/>

[11] Macrotec. *Impresora 3D Creality Ender 3*. Consulta online realizada el 7 de enero de 2022. Disponible en: <https://www.macrotec.com.uy/impresora-3d-creality-ender-3>

[12] 3Dnatives, Lucía C. *Guía completa: el filamento PLA en la impresión 3D*. Consulta online realizada el 7 de enero de 2022. Disponible en: <https://www.3dnatives.com/es/guia-filamento-pla-en-la-impresion-3d-190820192/#!>

[13] Concepto. *Edad del Bronce*. Consulta online realizada el 25 de abril de 2022. Disponible en: <https://concepto.de/edad-del-bronce/>

[14] African pegmatite. *Polvo de carbon contra Petrobond. Los beneficios de usar en el proceso de fundicion en arena*. Consulta online realizada el 17 de enero de 2022. Disponible en: <https://mineralmilling.com/es/polvo-de-carbon-vs-petrobond-en-el-proceso-de-fundicion-de-arena>



[15] BERG, artículos para fundición. *Petrobond (Arena oleosa preparada)*. Consulta online realizada el 17 de enero de 2022. Disponible en: <https://bergsi.com/petrobond/>

[16] Carbolite Gero, hornos de cámara de calentamiento rápido – RWF. Consulta online realizada el 26 de marzo de 2022. Disponible en: <https://www.carbolite-gero.es/es/productos/hornos-de-camara/hornos-de-laboratorio/rwf/function-features/>



ANEXOS

ANEXO 1: Cálculo de la masa de bronce necesaria en el proceso de fundición.

A continuación, se realizan los cálculos para obtener la cantidad de masa de material que se necesita fundir para la posterior obtención de las piezas, según el modelo 3 diseñado.

Para ello, se calcula el volumen total del modelo en función de las dimensiones que fueron empleadas en CATIA a la hora de ser diseñado. Además, ha de considerarse la densidad del material que va a utilizarse, en este caso $8,9 \text{ g/cm}^3$ al tratarse de bronce.

Por tanto:

Dimensiones bebedero

Radio exterior (cm) =	1,8
Altura total (cm) =	6

Dimensiones canal alimentación

Radio exterior (cm) =	0,6
Longitud total (cm) =	0,7

Dimensiones paralelepípedo

Largo (cm) =	4,5
Ancho (cm) =	7,5
Alto (cm) =	1,4

Dimensiones asiento

Radio (cm) =	1,8
Altura cilindro (cm) =	0,2

Volumen bebedero (cm^3) =	61,07
Volumen canal alimentación (cm^3) =	0,79
Volumen paralelepípedo (cm^3) =	47,25
Volumen asiento (cm^3) =	14,25



Universidad de Valladolid

DISEÑO, FABRICACIÓN Y VALIDACIÓN DE MODELOS DESECHABLES
OBTENIDOS MEDIANTE IMPRESIÓN 3D PARA SU USO EN
PROCESOS DE MOLDEO EN ARENA.



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

Volumen total (cm³) = 123,36

Masa de bronce (g) = 1097,94



Universidad de Valladolid

DISEÑO, FABRICACIÓN Y VALIDACIÓN DE MODELOS DESECHABLES
OBTENIDOS MEDIANTE IMPRESIÓN 3D PARA SU USO EN
PROCESOS DE MOLDEO EN ARENA.



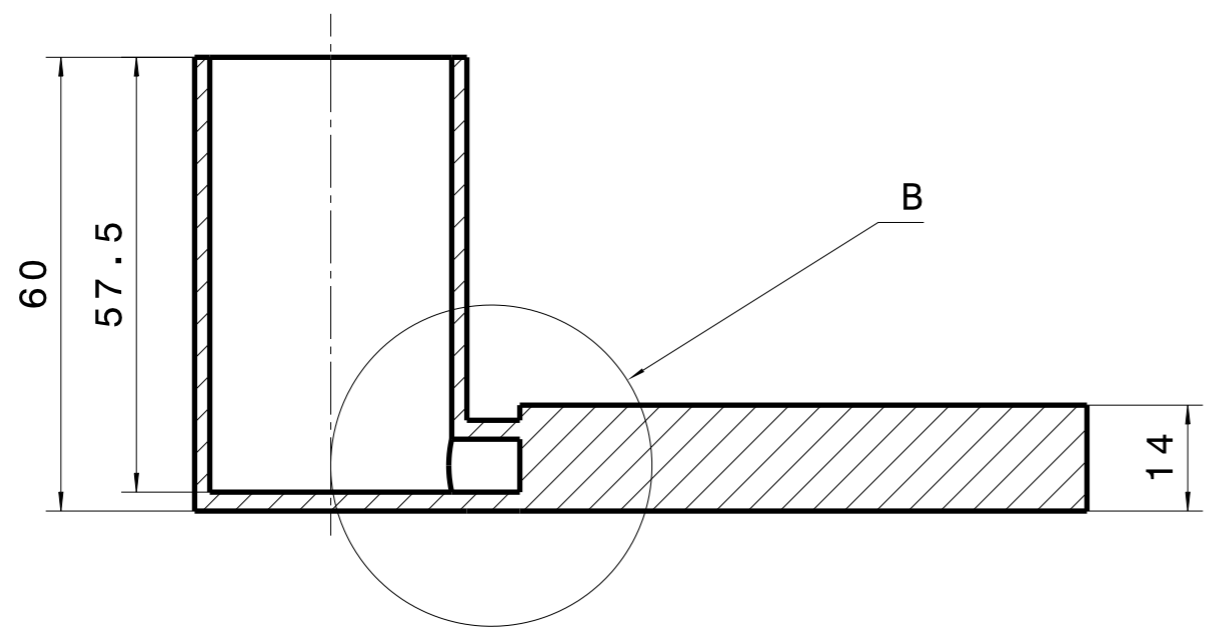
ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

ANEXO 2: Planos del modelo 3 y de su asiento.

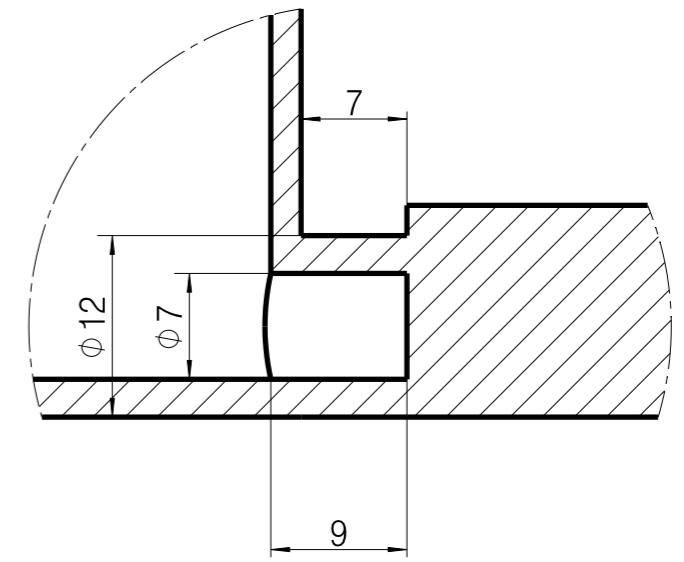
A continuación, se adjuntan los planos de las piezas que conforman tanto el modelo 3 como su asiento, los cuales han sido empleados para la obtención de la pieza de bronce final.

H G F E D C B A

4



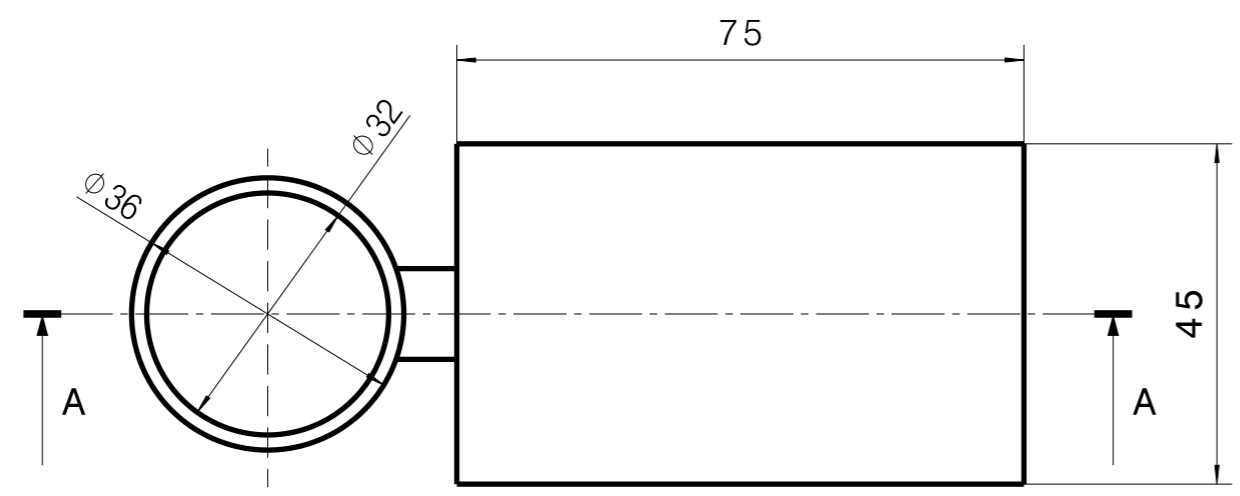
Sección A-A
Escala 1:1



Detalle B
Escala 2:1

3

2



1

Marca	Num. piezas	Denominación	Norma	Material y medidas
DESCRIPTION		Universidad de Valladolid		
Firma		Denominación Modelo 3		
Apellidos y Nombre.		SCALE 1:1	DATE 29/03/2022	Asignatura <i>Trabajo Fin Grado</i>
Barrio Martín, Marta		Grupo	SHEET 1/2	SIZE A3

H G F E D C B A

4

3

2

1

D

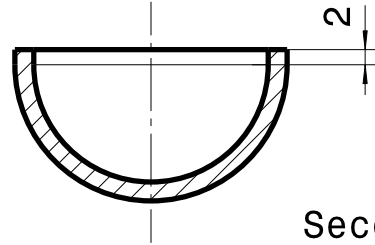
C

B

A

4

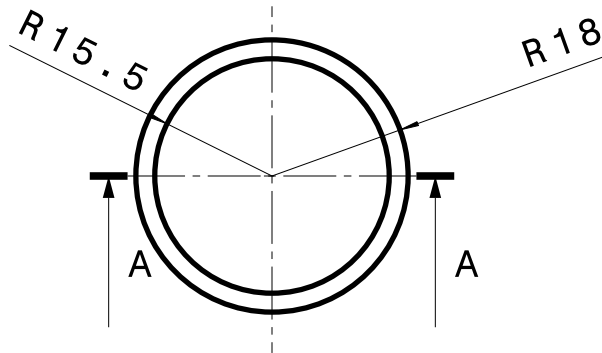
4



Sección A-A

3

3



2

2

1

1

Marca	Num. piezas	Denominación	Norma	Material y medidas
DESCRIPTION		Universidad de Valladolid		
Firma		Denominación Asiento del modelo 3		
SCALE 1:1	DATE 29/03/2022	Asignatura <i>Trabajo Fin Grado</i>	Grupo	SHEET 2/2
Apellidos y Nombre. Barrio Martín, Marta		Titulación <i>Ingeniería Mecánica</i>		SIZE A4

D

C

B

A