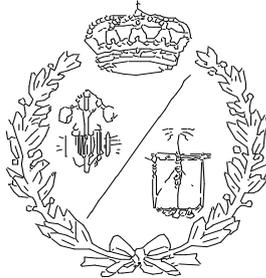


**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN**

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Proyecto Fin de Grado

**DISEÑO Y SIMULACIÓN DE ENCOFRADOS DE
ARRECIFES FABRICADOS MEDIANTE
IMPRESIÓN 3D DE PLÁSTICO.**

**DESIGN AND SIMULATION OF REEF
FORMWORKS MANUFACTURED BY PLASTIC 3D
PRINTING.**

Para acceder al Título de

GRADUADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

**Autor: Mario Lozano Corona
Febrero – 2023**

ÍNDICE GENERAL

DOCUMENTO I. Memoria.....	6
DOCUMENTO II. PLANOS	115
DOCUMENTO III. PLIEGO DE CONDICIONES.....	133
DOCUMENTO IV. PRESUPUESTO	140

RESUMEN

A lo largo del presente proyecto se lleva a cabo la creación de un encofrado o molde, realizado mediante impresión 3D en PLA. Éste cuenta con formas complejas para poder elaborar piezas de mortero, cuyo uso será, concretamente, la fabricación de arrecifes marinos artificiales.

Se lleva a cabo el diseño de la geometría del encofrado, de manera que ésta cumpla con todas las especificaciones o necesidades que pueda tener el molde durante su propio proceso de fabricación, la realización del moldeo del mortero y del desencofrado y dimensionar así cada una de las partes de una manera adecuada.

Además, se realiza un análisis de los esfuerzos que se ejercen sobre el encofrado para, posteriormente, llevar a cabo un análisis de tensiones a través del uso de un software de elementos finitos. De esta forma se comprueba que el diseño realizado resiste los posibles esfuerzos a los que esté sometido. También se realiza una optimización del modelo, estudiando varias posibilidades a través de análisis de tensiones, para evitar el sobredimensionamiento del diseño.

Este trabajo forma parte del proyecto EBASAR, proyecto en el cual se diseñan arrecifes artificiales de mortero utilizando encofrados fabricados con polímeros reciclados. Por tanto, la elaboración y el desarrollo de este TFG permite una primera aproximación a la geometría que se empleará en este proyecto. Además, toda la información que pueda obtenerse a lo largo de la realización del trabajo podrá ser de utilidad para futuros diseños o ensayos que puedan realizarse dentro del EBASAR.

Asimismo, se intenta demostrar que la tecnología de impresión 3D de encofrados de formas complejas es válida para este uso.

ABSTRACT

Throughout this project, the creation of a formwork or mold is carried out using 3D printing in PLA. This has complex shapes to be able to produce mortar pieces, the use of which will be, specifically, the manufacture of artificial marine reefs.

The design of the geometry of the formwork is carried out, so that it meets all the specifications or needs that the mold may have during its own manufacturing process, the molding of the mortar and the stripping of the formwork and thus sizing each of the parts in an appropriate manner.

In addition, an analysis of the stresses exerted on the formwork is carried out in order to subsequently carry out a stress analysis through the use of finite element software. In this way, it is verified that the design is resistant to the possible stresses to which it is subjected. An optimisation of the model is also carried out, studying various possibilities through stress analysis, in order to avoid oversizing the design.

This work is part of the EBASAR project, a project in which artificial mortar reefs are designed using formworks made from recycled polymers. Therefore, the elaboration and development of this TFG allows a first approximation to the geometry that will be used in this project. Furthermore, all the information that can be obtained during the course of the work may be useful for future designs or tests that may be carried out within the EBASAR.

Likewise, the aim is to demonstrate that 3D printing technology for formwork of complex shapes is valid for this use.

PALABRAS CLAVE

- Impresión 3D
- PLA
- FDM
- Encofrado
- Molde
- Arrecife
- Ansys

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN**

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Proyecto Fin de Grado

DOCUMENTO I. MEMORIA

**Autor: Mario Lozano Corona
Febrero – 2023**

ÍNDICE DE LA MEMORIA

1	INTRODUCCIÓN.....	17
2	OBJETIVOS.....	19
3	MARCO DEL PROYECTO.....	20
3.1	3D CIRCLE.....	20
3.2	EBASAR.....	21
4	ESTADO DEL ARTE.....	22
4.1	IMPRESIÓN 3D.....	22
4.1.1	¿Qué es la impresión 3D?.....	22
4.1.2	Ventajas e inconvenientes de la impresión 3D.....	24
4.1.3	MÉTODOS DE IMPRESIÓN 3D de plástico.....	25
4.1.4	Partes de una impresora FDM.....	27
4.1.5	Materiales utilizados.....	28
4.1.6	Impresoras de gran formato.....	31
4.1.7	Anisotropía en la impresión 3d.....	34
4.2	ENCOFRADOS.....	36
4.2.1	Generalidades.....	36
4.2.2	Encofrados fabricados mediante impresión 3d.....	39
4.3	SOFTWARE.....	45
4.3.1	ANSYS.....	45
4.3.2	Autodesk Inventor.....	46
4.3.3	ULTIMAKER CURA.....	46

5	REQUISITOS DE DISEÑO	47
5.1	Requisitos geométricos.....	47
5.2	Requisitos de material	49
5.3	Requisitos de fabricación	53
5.4	Requisitos de deformaciones.....	53
6	DISEÑO ORIGINAL	54
6.1	Geometría.....	54
6.1.1	Pared 1	55
6.1.2	Pared 2.....	65
6.1.3	Ensamblaje de las paredes.....	66
6.1.4	Diseño del resto de paredes	68
6.1.5	Diseño final.....	68
6.2	SIMULACIÓN NUMERICA.....	70
6.2.1	Introducción de la geometría.....	70
6.2.2	Material.....	71
6.2.3	Mallado	73
6.2.4	Aplicación de cargas y condiciones de contorno.....	74
6.2.5	Resultados.....	77
6.3	CONCLUSIÓN INICIAL	81
7	OPTIMIZACIÓN.....	82
7.1	OPTIMIZACIÓN DEL MODELO.....	82
7.1.1	Reducción del porcentaje de relleno.....	82

7.1.2	Reducción del espesor de las paredes.	83
7.2	RESULTADOS DE LA OPTIMIZACIÓN.....	85
7.3	ELECCIÓN DE LA OPCIÓN DEFINITIVA.....	86
8	PRUEBAS DE LABORATORIO.....	89
8.1	PRUEBAS DE DESENCOFRADO.....	89
8.1.1	Descripción del problema.....	89
8.1.2	Método empleado.....	90
8.1.3	Impresión del molde.....	90
8.1.4	Composición de las mezclas.....	93
8.1.5	Ensayos.....	93
8.1.6	Conclusiones.....	102
9	CONCLUSIONES.....	106
10	REFERENCIAS.....	108

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Impresora 3D (impresoras3d.com, 2022).....	22
Figura 2. Pieza fabricada mediante impresión 3D (impresoras3d.com., Perfecciona tus impresiones 3D, 2019).....	23
Figura 3. Comparativa de varios espesores de capa (Espinosa, 2019).....	23
Figura 4. Partes principales de una impresora 3D (Bitfab. , 2019).....	27
Figura 5. Piezas fabricadas de PLA y ABS. (Alicia, 2022).....	29
Figura 6. Características PLA y ABS (Alicia, 2022).....	30
Figura 7. Propiedades PLA y ABS (Alicia, 2022).....	30
Figura 8. Impresora 3D MODIX BIG-METER (Modix3D, s.f.).....	32
Figura 9. Impresora 3D MD-1000 Pro (3dmingda.com, s.f.).....	32
Figura 10. Pellets de PLA de color azul (3Dfils. , s.f.).....	33
Figura 11. Brazo robótico KUKA (Maria Jose R, 2022).....	34
Figura 12. Diferentes orientaciones de impresión (Hassan Gonabadi, Yao Chen, Arti Yadav, Steve Bull, 2021).....	35
Figura 13: Encofrados sobre los que está realizando el vertido del hormigón. a) Encofrado de madera. (Freepik., 2021), b) Encofrado de metal. (Equiposdetrabajoenaltura, 2019).....	37
Figura 14. Partes de un encofrado (El constructor civil, 2011).....	38
Figura 15. Imagen de la construcción del Auditorio de Tenerife (peri.es, s.f.).....	39
Figura 16: Ventanas prefabricadas construidas con moldes hechos mediante impresión 3D. (Redshift ES. , 2019).....	41
Figura 17. Escalera fabricada mediante moldeo, hecho con impresión 3D (Kraljevich F. , 2021).....	42

Figura 18. Columna fabricada mediante moldeo con molde realizada a través de la impresión 3D (Andrei Jipa, Lex Reiter, Robert J. Flatt, Benjamin Dillenburger, 2022).	42
Figura 19. Molde de la canoa (Jipa, 2017).	43
Figura 20 Esqueleto de la canoa (Jipa, 2017).	44
Figura 21. Canoa fabricada con hormigón (Jipa, 2017).	44
Figura 22. Arrecifes fabricados en el proyecto 3D PARE (Adrian I. Yoris-Nobile, Carlos J. Slebi-Acevedo, Esther Lizasoain-Arteaga, Irune Indacoechea-Vega, Elena Blanco-Fernandez, Daniel Castro-Fresno, Alejandro Alonso-Estebanez , Sara Alonso-Cañon , Carlos Real-Gutierrez , Fouad Boukhelf, Mohamed Boutouil , 2022).	47
Figura 23. Cubic Small Overhangs (Adrian I. Yoris-Nobile, Carlos J. Slebi-Acevedo, Esther Lizasoain-Arteaga, Irune Indacoechea-Vega, Elena Blanco-Fernandez, Daniel Castro-Fresno, Alejandro Alonso-Estebanez , Sara Alonso-Cañon , Carlos Real-Gutierrez , Fouad Boukhelf, Mohamed Boutouil , 2022).	48
Figura 24. Agujeros del arrecife Cubic Small Overhangs (Adrian I. Yoris-Nobile, Carlos J. Slebi-Acevedo, Esther Lizasoain-Arteaga, Irune Indacoechea-Vega, Elena Blanco-Fernandez, Daniel Castro-Fresno, Alejandro Alonso-Estebanez , Sara Alonso-Cañon , Carlos Real-Gutierrez , Fouad Boukhelf, Mohamed Boutouil , 2022).	48
Figura 25. Diferentes orientaciones en las que se han fabricado las probetas. a) Probetas de tracción. b) Probetas de cortadura (H. Gonabadi & A. Yadav & S. J. Bull, 2020).	50
Figura 26. Curvas tensión-deformación para diferentes orientaciones de capa del PLA impreso en 3D mediante el método FDM (H. Gonabadi & A. Yadav & S. J. Bull, 2020).	51
Figura 27. Curvas tensión de cortadura-deformación para diferentes orientaciones de capa del PLA impreso en 3D mediante el método FDM (H. Gonabadi & A. Yadav & S. J. Bull, 2020).	51
Figura 28. Curvas tensión-deformación para diferentes porcentajes de relleno del PLA impreso en 3D mediante el método FDM (H. Gonabadi & A. Yadav & S. J. Bull, 2020).	51
Figura 29. Propiedades de tracción del PLA impreso en 3D mediante el método FDM, en función de la orientación de capa (H. Gonabadi & A. Yadav & S. J. Bull, 2020).	52

Figura 30. Posibles maneras de dividir la geometría, a), b), c).....	55
Figura 31. Perfil inferior de la Pared 1.....	56
Figura 32. Zona de unión de la Pared 1.....	56
Figura 33. Base de la Pared 1, a) Vista zona interna, b) Vista zona posterior.....	57
Figura 34. Superficie interna de la Pared 1.....	58
Figura 35. Vista en planta de la Pared 1.....	58
Figura 36. Macho de la Pared 1.....	60
Figura 37. Machos para realizar los agujeros a 90°.....	61
Figura 38. Alzado de un macho para realizar los agujeros a 90°.....	61
Figura 39. Geometría interna de la Pared 1.....	62
Figura 40. Pletina de la parte inferior de la Pared 1.....	63
Figura 41. Pared 1 tras realizarse los taladros.....	63
Figura 42. Pared 1, a) Agarraderas, b) zonas para hacer palanca.....	65
Figura 43. Perfil inferior de la Pared 2.....	66
Figura 44. Perfiles de las paredes 1 y 2.....	66
Figura 45. Imagen de las paredes 1 y 2.....	67
Figura 46. Imagen de la parte interna de las paredes 1 y 2.....	68
Figura 47. Molde E.....	69
Figura 48. Útil para reforzar la zona de unión de las paredes, a) vista general, b) colocado sobre el molde.....	70
Figura 49. Superficie de contacto entre capas en las esquinas de la Pared 1, en el caso de imprimirse la pared en posición horizontal.....	71
Figura 50. Imagen de la malla utilizada.....	73

Figura 51. Presión de un fluido (Centro Estudios Cervantinos, 2019).	75
Figura 52. Diagrama de presiones del hormigón.....	76
Figura 53. Diagrama de presiones del mortero sobre el Molde E.....	77
Figura 54. Resultado de las tensiones.	78
Figura 55. Resultado de las deformaciones.	79
Figura 56. Tensiones de la parte interna del molde.....	80
Figura 57. Tensiones de la parte interna del molde más en detalle.....	80
Figura 58. a) Vista del Molde F, b) Vista del Molde G.	84
Figura 59. Imagen del modelo procesado en Ultimaker Cura.....	88
Figura 60: Imagen de la pared diseñada para el ensayo, a) Vista 1, b) Vista 2.	90
Figura 61: Proceso de impresión de una de las paredes.....	91
Figura 62: Pared del molde	92
Figura 63: Molde.....	92
Figura 64: Sujeción de las paredes del molde.....	94
Figura 65:Proceso de llenado del molde	94
Figura 66: Mortero completamente fraguado	95
Figura 67:Desmoldeo de la primera pared	96
Figura 68:Pieza obtenida	96
Figura 69: Adherencia del mortero y los machos	97
Figura 70: Acabado superficial de la pieza.....	98
Figura 71:Molde tras el primer desmoldeo.	98
Figura 72:Moldeo 2.	99

Figura 73: Pieza 2 desmoldada (1).	100
Figura 74: Pieza 2 desmoldada (2).	100
Figura 75: Primeros defectos sobre el molde	101
Figura 76: Pieza 3 desmoldada, a) Vista 1, b) Vista 2.	102
Figura 77: Imagen de las tres piezas fabricadas.	103
Figura 78: Aspecto final del molde	103
Figura 79: Macho del molde con restos de mortero	104

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1: Características de los materiales de los encofrados (Yepes, 2017).....	37
Tabla 2. Propiedades de tracción del PLA impreso en 3D mediante el método FDM, en función del porcentaje de relleno (H. Gonabadi & A. Yadav & S. J. Bull, 2020).....	52
Tabla 3. Propiedades de cortadura del PLA impreso en 3D mediante el método FDM, en función de la orientación de las capas (H. Gonabadi & A. Yadav & S. J. Bull, 2020).....	52
Tabla 4. Parámetros para la definición del material.....	72
Tabla 5. Parámetros para definir el material para las diferentes densidades de relleno.	83
Tabla 6. Propiedades de los modelos analizados	84
Tabla 7. Resultados de los análisis para los diferentes diseños y diferentes densidades de relleno.....	86
Tabla 8. Parámetros que influirán en la elección del modelo adecuado.	87
Tabla 9. Ensayos realizados.	90

LISTADO DE ECUACIONES

(1) Fórmula de la presión hidrostática	74
(2) Presión máxima ejercida sobre las paredes del molde	77

1 INTRODUCCIÓN

Los océanos son el gran regulador del clima y la mayor fuente de vida, ya que unas doscientas mil especies viven en ellos.

A pesar de la gran importancia que tienen en el planeta, los océanos se encuentran amenazados. El cambio climático, la contaminación, sobreexplotación pesquera y la destrucción del hábitat son algunos de los peligros a los que se enfrentan a diario (Anellides, 2020).

Por todo esto, resulta de vital importancia tratar de protegerlos en la medida de lo posible. Particularmente, los arrecifes son ecosistemas marinos compuestos de estructuras de carbonato cálcico en los que conviven una enorme variedad y cantidad de animales y plantas marinas (cubriendo solo el 0,2% del fondo marino, suponen el hábitat del 25% de las especies marinas conocidas) (UNEP - UN Environment Programme, s.f.).

Además de esto, se trata de depósitos naturales de carbono, los cuales gracias a su capacidad de absorción del CO₂ ayudan a paliar los efectos de los gases de efecto invernadero (Fernández Roldán, 2021).

Los arrecifes de coral pueden encontrarse en más de cien países, en zonas costeras del océano Pacífico y del Índico, y en el mar Caribe en su mayoría, situándose el más grande del planeta en frente de las costas del noroeste de Australia, el cual recibe el nombre de la Gran Barrera de Coral (extendiéndose a largo de 2.000 kilómetros).

El informe realizado por la Red Mundial de Vigilancia de los Arrecifes de Coral (GCRMN) sobre el estado de los arrecifes de coral del mundo, llevado a cabo en el año 2020, informa de que entre los años 2009 y 2020 se perdió el catorce por ciento del coral del mundo (11.700 kilómetros cuadrados); informe basado en datos obtenidos durante cuarenta años en un total de setenta y tres países (UN Environment programme, s.f.).

Con todos estos datos, dado a la gran importancia que tienen y que son considerados uno de los ecosistemas más vulnerables del planeta, es fundamental protegerlos.

Estas medidas de protección ya se están tratando de aplicar, como por el ejemplo, las realizadas por El Fondo Mundial para los Arrecifes de Coral cuyo enfoque se basa en "proteger-transformar-restaurar-recuperar" (United Nations Decade of Ocean Science for Sustainable Development, s.f.).

Por todos estos motivos, cada día se está tratando de tomar acciones que sirvan para protegerlos y facilitar su expansión. Este proyecto se puede considerar que entra dentro de la última de las acciones que nombran en el Fondo Mundial para los arrecifes de coral (recuperar), ya que, el objetivo es crear nuevas zonas que sirvan de hogar para la fauna y flora marina con estos arrecifes artificiales.

A través de este proyecto, se utilizará la ingeniería para ayudar en ese objetivo común de protegerlos. Se fabricará un molde que sea capaz de replicar arrecifes artificiales de mortero, de manera sencilla. Debido a la propia tecnología de fabricación (moldeo), se considera que se logrará reducir dos aspectos muy importantes para aumentar la viabilidad de colocar arrecifes artificiales en entornos marinos degradados. Estos dos aspectos son el tiempo necesario para fabricarlos y el coste.

Una de las ventajas del uso del moldeo frente a otros tipos de fabricación es la velocidad necesaria para realizar los arrecifes, ya que ésta es menor. Además, se trata de un proceso fácilmente reproducible, siendo posible realizar tantos arrecifes simultáneamente como moldes se puedan tener (reduciendo así el coste total de cada arrecife, ya que al realizar un mayor número de ellos resulta más económico). Esto se debe a que se trata de un proceso sencillo y permite obtener el producto final en un único paso.

2 OBJETIVOS

El objetivo general del presente proyecto es la fabricación de un molde o encofrado polimérico mediante impresión 3D, que sirva para llevar a cabo la elaboración de arrecifes marinos artificiales de mortero.

Además de éste, hay una serie de objetivos más específicos:

- Diseño de un molde para la fabricación de arrecifes similares a los existentes en la actualidad y representación en el software CAD.
- Validación de los modelos en software de elementos finitos (Ansys).
- Determinación del espesor del molde que cumpla con los requisitos demandados.
- Determinación del porcentaje de relleno del molde que cumpla con los requisitos demandados
- Elección de la mejor alternativa mediante la evaluación conjunta de tiempos, costes y resistencias.

3 MARCO DEL PROYECTO

Este trabajo se encuentra enmarcado dentro de dos proyectos. El primero de ellos es el de “Fomento de la economía circular y tecnologías bajas en carbono a través de la fabricación aditiva” (3D CIRCLE) y el segundo, “Mejora de la biodiversidad en el área atlántica a través de arrecifes artificiales sostenibles” (EBASAR).

3.1 3D CIRCLE

Los objetivos generales del proyecto 3D CIRCLE son reducir el impacto ambiental y económico de los materiales utilizados dentro de la impresión 3D, desarrollando nuevos materiales de matriz plástica que incorporen residuos de origen reciclado tales como otros polímeros, fibras, polvo de acero, etc. (con el objetivo de reducir el consumo de recursos naturales y las emisiones de CO₂ derivadas del procesado de plásticos vírgenes) y que sean válidos para realizar impresiones 3D.

Además, se trabajará en el desarrollo de nuevos morteros geopoliméricos más sostenibles (con los que se tratará de sustituir en parte el uso del cemento Portland, el cual es responsable de entre un 4% y un 8% de las emisiones de CO₂ a la atmósfera), válidos también para la impresión 3D, así como un análisis de la reciclabilidad de todos estos materiales y una validación económica y ambiental.

También, se llevarán a la práctica todos estos conocimientos a través del desarrollo de encofrados complejos fabricados con plástico, con el objetivo de que sean los polímeros desarrollados, e impresión 3D de piezas de mortero con formas complejas, al igual que una comparativa entre estos dos métodos de fabricación, con el fin de determinar la tecnología más adecuada para la fabricación de piezas complejas de mortero.

Por consiguiente, con todos estos avances se considera que se puede llegar a reducir las emisiones de CO₂ de los nuevos polímeros respecto a los plásticos tradicionales en un 25% e incluso reducir un 65% las de los geopolímeros respecto a las del cemento Portland. Además de reducir las emisiones, también se lograría reducir los costes de producción asociado tanto a los plásticos como a los geopolímeros desarrollados en un 20%.

Igualmente, supondría un gran aumento del catálogo de materiales sostenibles en el campo de los plásticos y morteros.

3.2 EBASAR

El segundo proyecto en el que se enmarca es el EBASAR. Éste tiene como principal objetivo la comparación de tres técnicas de fabricación de arrecifes artificiales. La primera de estas técnicas es la producción del arrecife directamente a través del uso de una impresora 3D de mortero. La segunda es a través del moldeo del mortero en encofrados fabricados mediante impresión 3D y la última, mediante gaviones, teniendo en cuenta aspectos de impacto ambiental, costes de fabricación y biorreceptividad.

Para lograr el objetivo será necesario realizar un estudio multi e interdisciplinar en el que se tenga en cuenta tanto el aspecto constructivo como la biología marina.

Este proyecto continúa con el trabajo que se está realizando en el proyecto “3D PARE”, en el cual se fabricaron 36 arrecifes artificiales producidos mediante impresión 3D directa de mortero.

El objetivo de EBASAR es la búsqueda de técnicas de fabricación más baratas para fabricar arrecifes que la del 3D PARE, ya que se considera que así se impulsará su uso, con la consiguiente mejoría en la recuperación de ecosistemas marinos degradados, mejorando la biodiversidad. Además, se considera importante desarrollar hormigones más sostenibles, en los que se sustituyan los áridos tradicionales por áridos reciclados, como conchas marinas, cenizas, escorias y lodos de depuradora.

También, se buscarán maneras de desarrollar gaviones personalizados, de manera que sirvan como alternativa a los arrecifes y que resulte más económico.

Otros de los beneficios de este trabajo, dentro del mundo industrial, es la mejora en los productos prefabricados producidos por encofrados de formas complejas.

4 ESTADO DEL ARTE

4.1 IMPRESIÓN 3D

4.1.1 ¿Qué es la impresión 3D?

La impresión 3D, también conocida como fabricación aditiva, es un conjunto de procesos, que a partir de las impresoras 3D (Figura 1) y el archivo de un modelo digital crean piezas en tres dimensiones de un material que cumpla unas determinadas necesidades.



Figura 1. Impresora 3D (impresoras3d.com, 2022).

La creación de estas piezas se realiza mediante un proceso de adición, superponiendo diferentes capas transversales del material deseado a partir de un modelo digital, creado en un software 3D (CAD) (Soto, 2021). Estas capas se van depositando, paralelas entre sí de abajo hacia arriba (como se puede ver en la Figura 2), a través de la boquilla. El espesor de estas capas es variable (Figura 3), siendo uno de los parámetros que puede determinarse por el usuario para dotar a una pieza de unas características concretas. Cuanto menor sea el espesor de las capas, mejor será el acabado de la pieza, pero esto, supondrá también un aumento del tiempo necesario para realizar la impresión (Espinosa, 2019).

La impresora para realizar cada una de estas capas desplaza la boquilla por un plano paralelo a la base, en coordenadas X e Y, permitiendo la salida del material en las zonas donde está predefinido en el archivo que contiene el diseño.

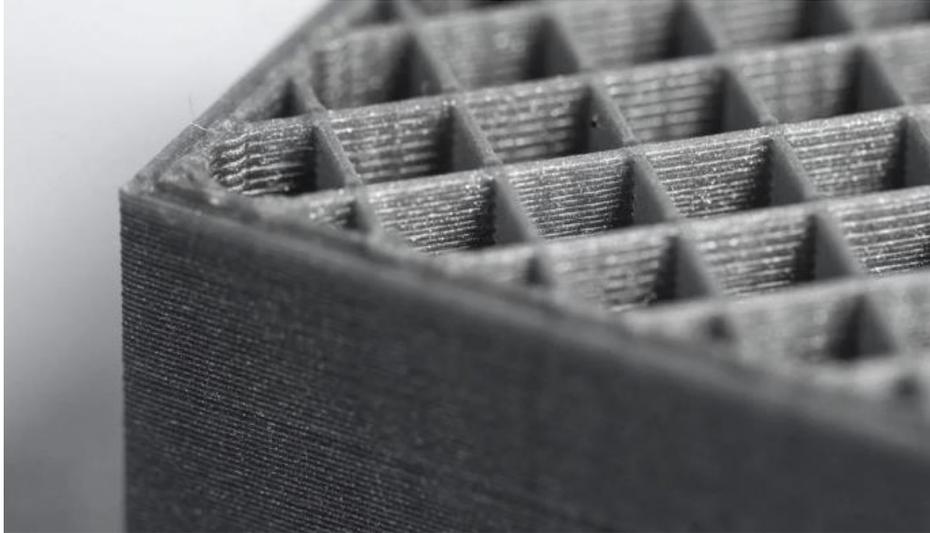


Figura 2. Pieza fabricada mediante impresión 3D (impresoras3d.com., Perfecciona tus impresiones 3D, 2019).



Figura 3. Comparativa de varios espesores de capa (Espinosa, 2019).

La impresión 3D puede realizarse en una amplia gama de materiales, así como en tamaños diferentes, desde pequeñas impresiones hasta otras de tamaños industriales, gracias a los avances tecnológicos de los últimos años.

4.1.2 Ventajas e inconvenientes de la impresión 3D

Ventajas

La variedad de sectores en los que se puede aplicar la impresión 3D es enorme y está en continuo proceso de ampliación. Las impresoras 3D pueden ser usadas en campos muy diferentes tales como la sanidad, la industria, la arquitectura, el arte o la educación.

El coste de las piezas fabricadas no es muy elevado.

Además, es una tecnología de fácil manejo. Dependiendo del modelo del equipo que se utilice y el uso que vayamos a dar a las piezas creadas puede variar, pero por lo general es de manejo sencillo, lo que permite que este proceso de fabricación sea utilizado por un número de personas elevado.

Igualmente tiene una capacidad de personalización muy grande, ya que a través del modelo virtual se puede fabricar prácticamente cualquier forma.

Del mismo modo, permite realizar variaciones y modificaciones o mejoras sobre las piezas de manera rápida y sin que suponga un gran sobrecoste, así como la rápida creación de diferentes prototipos. Este aspecto fortalece y hace mucho más competitivo este proceso de fabricación frente al resto.

Así pues, la variedad de materiales con los que se pueden realizar diferentes piezas es muy amplia y el desperdicio de material es bajo en comparación con otros métodos de fabricación. Asimismo, el tamaño de las impresoras es compacto, aunque hay que tener en cuenta que éste depende del tamaño de las piezas que es capaz de fabricar.

Inconvenientes

El primer inconveniente encontrado en este proceso de fabricación es el tiempo. Dependiendo del modelo de impresora que se utilice en cada caso, el tiempo para imprimir una pieza puede ser más largo en comparación con otros procesos. En este aspecto, tiene gran influencia la calidad y acabados que se deseen conseguir, al igual que su volumen. Por lo tanto, si se quiere fabricar una misma pieza en serie, no se recomienda este proceso de fabricación, ya que otros procesos de fabricación son más apropiados para estos casos.

Por otro lado, en caso de que la impresión 3D se realice en plástico, algo muy común, se genera un gran impacto en el medioambiente, y es necesario seguir una serie de normativas fijadas para evitar el uso de productos contaminantes. Por eso, es de gran importancia utilizar materiales de bajo impacto ambiental, para tratar que se convierta en un método lo más sostenible posible.

Otro de los inconvenientes de la fabricación aditiva es la necesidad de realizar un diseño previo de las piezas. Por ello, es necesario tener un software que permita realizar este diseño o contratar a otra persona o empresa que se encargue de realizarlo, lo que dificulta el proceso.

También, resulta otro problema la limitación del tamaño de las piezas que se puede fabricar, ya que en función de la impresora que se utilice, el volumen de impresión será uno concreto y la pieza debe ser menor que éste para poder realizarse la impresión.

4.1.3 MÉTODOS DE IMPRESIÓN 3D DE PLÁSTICO

Dentro de la impresión 3D se pueden distinguir diversas técnicas, diferenciadas en la forma en la que se producen las diferentes capas que forman las piezas. El uso de una determinada técnica u otra puede estudiarse en función del plazo que se disponga para realizarlo, el presupuesto o las características técnicas necesarias. Se puede utilizar para realizar la impresión 3D diversos materiales, como metal, hormigón, material biológico o plásticos.

Debido al propósito de este trabajo, a continuación, se definen los principales métodos de impresión de polímeros.

Estereolitografía (SLA)

Esta técnica utiliza resinas foto-poliméricas en estado líquido. Utiliza espejos y un láser ultravioleta para producir la solidificación de la resina por capas.

Además, se trata de un método con una alta calidad y precisión, pero que por el contrario necesita mayores tiempos que otros métodos y las propiedades mecánicas que se pueden conseguir son bajas (Servitec3D, 2022).

Procesamiento digital de luz (DLP)

Esta técnica es similar a la SLA. La diferencia se encuentra en que la SLA utiliza un láser ultravioleta y el DLP utiliza un proyector de luz digital, el cual realiza una única imagen por capa. Con este procedimiento se logran altas precisiones, pero queda comprometida la resistencia mecánica de las piezas.

Sinterización selectiva por láser (SLS)

A partir del uso de un láser que va incidiendo sobre el material (el cual se encuentra en forma de polvo), hace que éste se funda y posteriormente se solidifique, manteniendo sus partículas unidas entre sí.

Se trata de un método en el que no se desaprovecha nada de material, ya que el que no se utiliza se conserva en el lugar donde se realiza la impresión. Además, tanto la precisión como la velocidad lograda es superior a otros métodos (impresoras3d.com., Tipos de impresoras 3D., 2022).

Impresión por inyección

Se trata de un proceso similar al de las impresoras de tinta, pero en lugar de utilizar tinta, se inyecta una capa del polímero líquido y mediante el uso de una luz ultravioleta se consigue el endurecimiento.

Es uno de los métodos en el que es posible imprimir las piezas coloreadas de manera personalizada, con muy buena calidad superficial, aunque no se consiguen buenas propiedades mecánicas. Otro inconveniente es que el uso de materiales se encuentra limitado, ya que deben ser sensibles a la luz ultravioleta (Inboundcycle, 2021).

Modelado por deposición fundida (FDM)

Este método también recibe el nombre de fabricación de filamento fundido (FFF). Esta opción deposita el material fundido capa a capa sobre la base.

El material parte de una bobina en forma de hilo y atraviesa el extrusor, donde es calentado hasta que se funde y es extruido para facilitar la salida del propio material de la boquilla.

El FDM es rápido y es compatible con una gran gama de materiales, por lo que se ha tomado la decisión de utilizar este método para realizar la impresión del encofrado (ALL3DP, 2022).

4.1.4 Partes de una impresora FDM.

Una impresora 3D es, como ya se ha comentado con anterioridad, una máquina compuesta por numerosas piezas que, trabajando conjuntamente, realizan piezas por fabricación aditiva.

Las piezas más destacables de una impresora de tipo FDM son las siguientes (Figura 4):

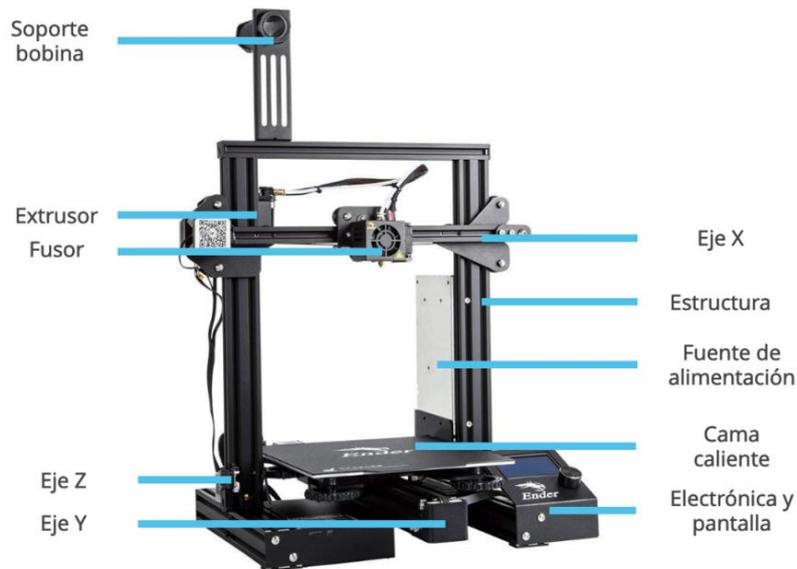


Figura 4. Partes principales de una impresora 3D (Bitfab. , 2019).

- **Estructura o chasis:** Es la parte sobre la que van sujetos el resto de los componentes y la que aporta la rigidez al conjunto. Se trata de un elemento de bastante importancia, ya que en caso de no ser lo suficientemente fuerte, se producirían movimientos indeseados, oscilaciones o desajustes que supondrían malas calidades y la limitación de la velocidad de impresión.
- **Fuente de alimentación**
- **Placa base/electrónica:** Es la centralita de la impresora y se encarga del control del resto de elementos.
- **Panel de control:** Es el elemento que permite que la impresora sea controlada por los usuarios, sin la necesidad de tener un ordenador conectado a ella. Además, permite introducir el modelo a imprimir con una tarjeta de memoria o dispositivo USB directamente.

-
- **Extrusor:** Es el elemento que se encarga del empuje y cambio de estado del material, controlando la cantidad de material que se imprime en cada momento. Dentro del extrusor se pueden diferenciar distintos componentes como las poleas dentadas, cuya función es la de transmitir la fuerza al filamento, es decir, empujar el material y el fusor, el cual se encarga de calentar el filamento para que éste se funda. El termistor es el encargado de regular la temperatura de extrusión, la cual es una de las propiedades que hay que determinar antes de comenzar a imprimir, pudiendo variar en diferentes proyectos.
 - **Boquilla:** Es el orificio de salida del material, siendo la que determina el diámetro de extrusión.
 - **Cama caliente:** Es la base sobre la cual se realiza la impresión, cuya característica principal es la capacidad de calentamiento que tiene hasta una determinada temperatura, que variará en función del material utilizado. Esto permitirá que la pieza se adhiera mejor a la base durante la impresión, evitando que se pueda mover, y que una vez finalice y enfríe se desprenda más fácilmente la pieza.
 - **Ejes:** Son los elementos que permiten los movimientos dentro de la máquina, generalmente en tres direcciones que pueden llamarse X, Y y Z; ortogonales e independientes entre sí. Los movimientos en ejes X e Y equivaldría a movimientos dentro de un mismo plano paralelo a la base, mientras que, en el eje Z, equivale al movimiento a lo largo de todos los planos paralelos a la base, es decir, variando la altura. La variación de posición se logra a través de motores paso a paso.

4.1.5 Materiales utilizados

Hoy en día la impresión 3D puede realizarse casi en cualquier tamaño y termoplástico. Además, a parte de este tipo de materiales, pueden utilizarse metales o aleaciones de plásticos con metales, también hormigones, fibra de carbono, alimentos y tejidos vivos (Todo3D, s.f.).

La elección de material dependerá de la compatibilidad que tengan con la impresora que se disponga, las condiciones de impresión que deban utilizarse y las necesidades que deban ser cubiertas con la pieza u objeto a fabricar.

Las propiedades de todos estos materiales pueden ser muy diferentes. Pueden ser materiales líquidos, sólidos, flexibles, transparentes, opacos, de colores, etc (Adeva, 2022).

Respecto a la impresión en 3D de materiales termoplásticos, cabe destacar el uso del PLA y el ABS, ya que son los dos materiales más utilizados. En la Figura 5 puede verse una misma pieza fabricada de estos dos materiales. Además de estos dos, otros muchos son: el plástico PETG, TPU, ASA, PET, FLEX, NYLON, EP, ABSEI, PP, HIPS, NYLFORCE, etc.

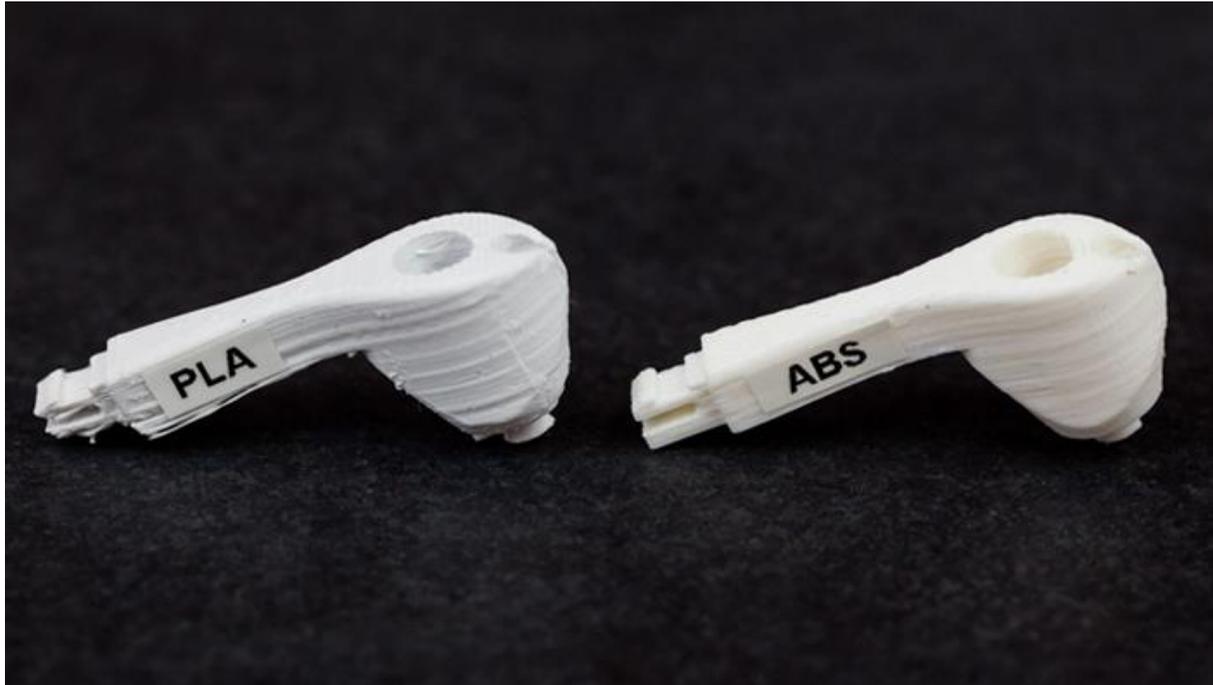


Figura 5. Piezas fabricadas de PLA y ABS. (Alicia, 2022).

El ácido poliláctico (PLA) es un polímero de origen natural, obtenido a partir de almidón de maíz, caña de azúcar, yuca o remolacha, considerándose un material biodegradable (RevistasBolivianas).

Por el contrario, el acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) es un material proveniente del petróleo, compuesto de monómeros, como son el acrilonitrilo, butadieno y el estireno.

El PLA es el más utilizado dentro de la fabricación 3D, ya que es el material con el que resulta más sencillo realizar la impresión, dado que su temperatura de transición vítrea es menor que la del ABS (la cual oscila entre los 60 y 100 grados frente a la del ABS que se encuentra entre los 100 y 200). Debido a esto, las temperaturas de impresión y de la cama (en el caso de la impresión con PLA) son más bajas, como puede apreciarse en la Figura 6 (Alicia, 2022).

La velocidad de impresión es prácticamente la misma en ambos, al igual que el precio.



Figura 6. Características PLA y ABS (Alicia, 2022).

Estudiando el comportamiento mecánico, se puede determinar que el ABS tiene mejores propiedades, ya que es más resistente, duradero y ligero que el PLA, además de tener mayor resistencia al calor. Por el contrario, el PLA es más fuerte y rígido, como puede apreciarse en la Figura 7.

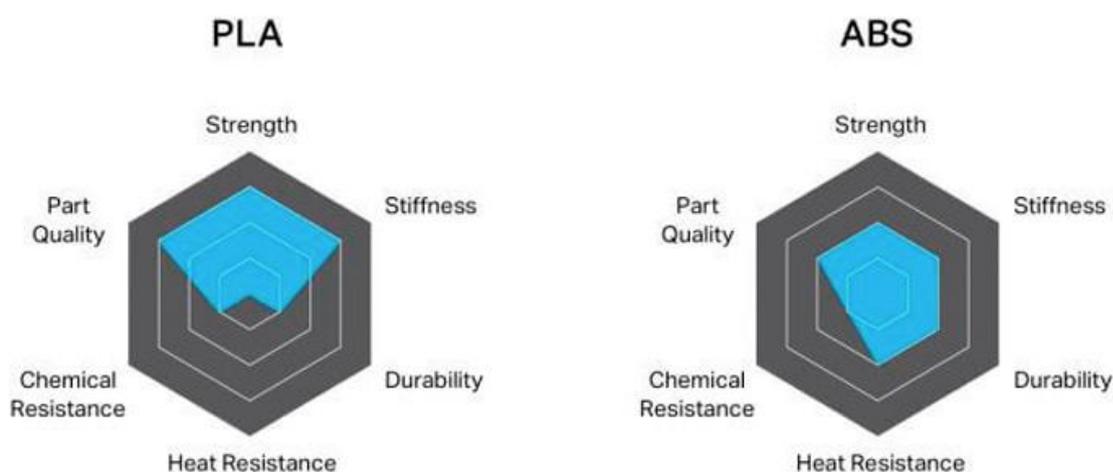


Figura 7. Propiedades PLA y ABS (Alicia, 2022).

Como bien explicó Luke Taylor, Marketing Manager de Polymaker, “El PLA es un material más débil pero la ventaja es que es muy fácil de trabajar, se imprime muy fácilmente”, motivo por el cual suele priorizarse el uso del PLA frente al ABS, además de por ser considerado biodegradable, renovable y obtenerse de fuentes naturales (Alicia, 2022).

Otros materiales que pueden resultar interesantes son el PETG y el TPU.

El PETG es un material muy versátil utilizado para la impresión 3D. Se trata de una variante del PET, menos frágil.

Es un material transparente y reciclable, con muy buenas propiedades mecánicas y fácil de imprimir, por lo que cada día es más utilizado. Es rígido y más resistente a la temperatura que el PLA, y es apto para ser utilizado para uso alimentario, ya que cuenta con la aprobación de la FDA (Administración de Alimentos y Medicamentos de los Estados Unidos) (Trapero, s.f.).

El TPU (Poliuretano termoplástico) es un plástico flexible. Las piezas fabricadas mediante fabricación aditiva con este material son duraderas, ya que el material es resistente a la abrasión y puede soportar impactos.

Las piezas fabricadas serán flexibles y bastante resistentes. El principal inconveniente de este material es que no es tan fácil de realizar la impresión cómo con el resto de los materiales mencionados (TRACTUS3D, s.f.).

4.1.6 Impresoras de gran formato

Las impresoras 3D de gran formato son aquellas que tienen tamaños de impresión mayores a las comunes. Por lo general, estas impresoras cuentan con la longitud de uno de sus ejes considerablemente superior a los otros dos, y suelen estar enfocadas para usos industriales.

El objetivo de este tipo de equipos no es otro que ser capaces de producir piezas de un tamaño mayor a las que se logran con una impresora cotidiana, sin necesidad de fabricar la pieza por partes, evitando así posibles problemas a las uniones de las diferentes partes.

Dentro de este campo, los procesos de impresión más utilizados son el modelado por deposición fundida (FDM), la estereolitografía (SLA) y el sinterizado selectivo por láser (SLS), ya que son los que mejor se adaptan a estos tamaños de impresión.

Las impresoras FDM de gran formato serán de las que se hable a continuación, ya que es la tecnología que se utilizará. Éstas son capaces de realizar la impresión a una mayor velocidad y con un tamaño de boquilla mayor.

Dentro de este campo industrial, se puede encontrar una gran variedad de modelos. En comparación con una impresora 3D de tamaño estándar, el precio es mucho mayor y ya que se trata de equipos con mayor complejidad y tecnología. Estas longitudes de impresión pueden alcanzar los 500 o incluso los 1000 milímetros (Formlabs, s.f.).

Actualmente, resulta bastante común encontrar en el mercado maquinas con volúmenes de impresión superiores a 1000x1000x1000 milímetros. Un ejemplo de impresora que cumpla esto sería la que puede apreciarse en la Figura 8, del fabricante MODIX, o la MD-1000 Pro del fabricante Mingda (Figura 9).



Figura 8. Impresora 3D MODIX BIG-METER (Modix3D, s.f.).

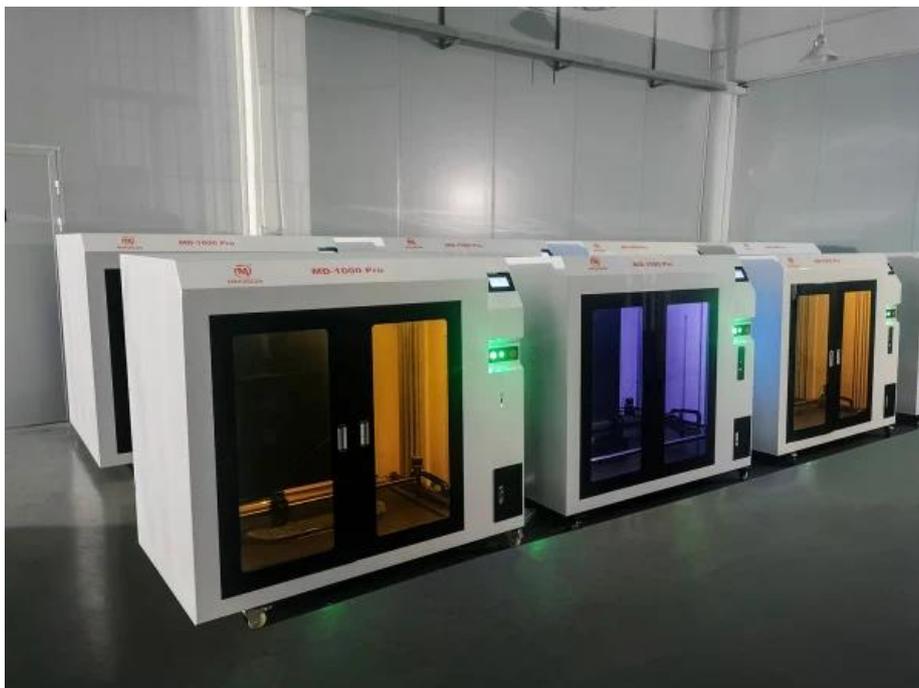


Figura 9. Impresora 3D MD-1000 Pro (3dmingda.com, s.f.).

Además, es posible utilizar la materia prima en formato de pellet (Figura 10), lo cual es también compatible con las impresoras de gran formato. Esta opción resulta más rápida, sencilla y económica que la tradicional de utilizar el material en forma de hilo. Estos pellets son granos de plástico virgen, con los que se logra una extrusión de varios kilos de material por hora, siendo éste un aspecto clave en la impresión 3D de gran formato. Otro punto a favor de la utilización de pellets es que las piezas fallidas se pueden reciclar de manera sencilla, ya que bastaría con triturarlas hasta hacer de ellas pequeños granos del material.



Figura 10. Pellets de PLA de color azul (3Dfils., s.f.).

Dentro de la impresión 3D, también hay la opción de utilizar brazos robóticos que depositen las diferentes capas para formar el objeto. Esta tecnología recibe el nombre de fabricación aditiva robótica y es compatible con la opción de modelado por deposición fundida.

Esta técnica se trata de la más flexible y eficaz para realizar impresiones de gran formato de manera rápida, ya que trabaja de forma idéntica a la de la soldadura con brazo robótico.

Este brazo es capaz de imprimir desde casi cualquier posición, lo que permite realizar piezas con gran complejidad. Además, cabe destacar como desventajas de este método que es necesario programar de manera adecuada el cabezal de la impresora y el brazo robótico, y que se trata de una opción mucho más costosa que mediante el uso de impresoras 3D convencionales (Eurobots News, 2021).

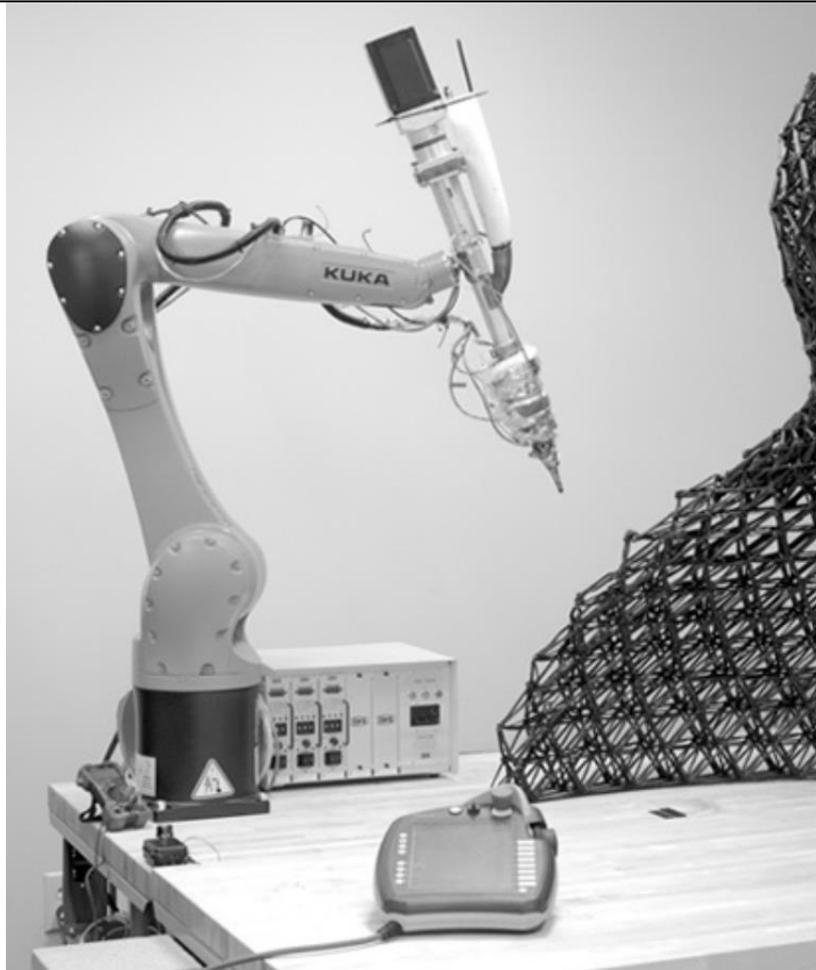


Figura 11. Brazo robótico KUKA (Maria Jose R, 2022).

En la Figura 11, puede verse un brazo robótico realizando la impresión 3D de un objeto. Se trata de un equipo de la marca KUKA, empresa alemana líder del mercado.

4.1.7 Anisotropía en la impresión 3D

Se conoce como material anisótropo o triclinico a aquellos en los que las propiedades mecánicas dependen de la orientación del objeto. Esto quiere decir que, si se estudia una propiedad mecánica en dirección X, el resultado obtenido diferirá del resultado del estudio de la misma propiedad en otra de las direcciones, Y o Z. En cambio, en un material isótropo, los resultados serán los mismos en las tres direcciones.

Un ejemplo de materiales naturales anisótropos es la madera o algún tipo de roca laminada (AUTOMOTRIZ., 2020).

Otro ejemplo claro son los objetos fabricados mediante impresión 3D, ya que las propiedades del objeto son diferentes en función de la posición en la que se fabrica la pieza, debido a cómo se encuentra la orientación de las diferentes capas que conforman el objeto. Este fenómeno es claro en las impresoras de modelado por deposición fundida, pero, no es así en el caso en el que se utiliza la tecnología de estereolitografía en su fabricación; en las cuales se da lugar a objetos isótropos.

Además, las piezas fabricadas mediante modelado por deposición fundida son anisótropas, debido a los principios de esta tecnología de impresión 3D, no a su material (ya que éste sí que es un material isótropo). Al realizar la pieza formando capas de material fundido se crea una unión de capas mecánica, las capas no se adhieren completamente entre sí. Esto provoca que la fuerza de unión del material de una misma capa sea mucho mayor a la fuerza de unión de las diferentes capas entre sí, por tanto, ya se encuentran propiedades mecánicas diferentes en función de esta orientación. Es decir, la anisotropía en estos casos no se debe al material en sí, si no al propio proceso de fabricación.

En la Figura 12, pueden verse diferentes orientaciones para realizar la impresión de una probeta de tracción. Las propiedades mecánicas de cada una de estas orientaciones serán diferentes.

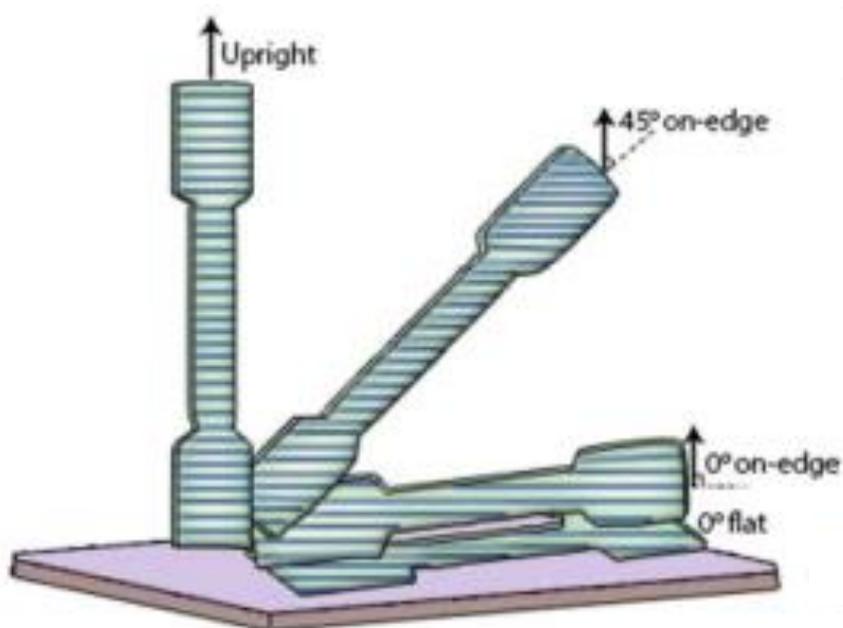


Figura 12. Diferentes orientaciones de impresión (Hassan Gonabadi, Yao Chen, Arti Yadav, Steve Bull, 2021).

Todo esto resulta muy importante, y debe ser considerado al fabricar piezas que vayan a soportar cargas, ya que la resistencia y buen funcionamiento puede verse comprometida en función de la orientación y posición en la que fabrica (Formlabs., s.f.).

Por ejemplo, el caso en el que se obtienen las mayores resistencias es cuando se fabrica la probeta a 0°, siendo la mejor la opción 0° on Edge. Conforme el ángulo aumenta, la resistencia va reduciéndose, pudiendo llegar incluso a disminuirse hasta un 10% del valor del 0° on Edge. Este caso menos resistente (en el que puede verse reducido hasta un 10%) es la probeta fabricada en posición upright, ya que la adherencia de las capas es muy baja (H. Gonabadi & A. Yadav & S. J. Bull, 2020).

4.2 ENCOFRADOS

4.2.1 Generalidades

Un encofrado es un elemento constructivo cuyo objetivo es el moldeo de hormigones y morteros. Su finalidad es la de contener estos materiales desde que se vierten (en estado fresco), Figura 13, hasta que fraguan por completo. Se trata de estructuras temporales, es decir, que se usan durante un determinado tiempo, variable en función de la mezcla que se utilice. Este tiempo suele ser de varios días. Una vez transcurrido ese tiempo, se realiza el desencofrado, obteniendo el material endurecido con la forma propia del encofrado. Es muy importante no retirar el encofrado hasta que la mezcla haya fraguado por completo, de lo contrario, el material perderá la forma del encofrado, siendo no válido y será necesario repetir todo el proceso.

Con este sistema de encofrados, en el sector de la construcción puede fabricarse prácticamente cualquier elemento de hormigón (losas, muros, vigas, columnas, etc.), además de otros elementos arquitectónicos (Kraljevich F. , 2020).



Figura 13: Encofrados sobre los que está realizando el vertido del hormigón. a) Encofrado de madera. (Freepik., 2021), b) Encofrado de metal. (Equiposdetrabajoenaltura, 2019)

Dentro del sector de la construcción, en los casos en los que estos encofrados son realizados en obra reciben el nombre de encofrados in situ. Si, por el contrario, esta misma acción se realiza en un taller, recibe el nombre de moldeo (UPV., 2017).

Son realizados en diferentes materiales como la madera (lo más común dentro del sector de la construcción), metal (Figura 13b) o plástico. En la Tabla 1 pueden verse algunos datos como el número de usos, las aplicaciones, la textura o el aspecto de la pieza realizada en función del material del encofrado.

Tabla 1: Características de los materiales de los encofrados (Yepes, 2017).

MATERIAL	USOS	TEXTURA	ASPECTO	APLICACIONES	
MADERA	DE 1 A 50*	VARIABLE	Medio	Encofrado in situ, superficies planas, regladas	
PLÁSTICO	Flexibles	DE 1A 20	LISA/RUGOSA	Bueno	Superficies complejas
	Rígidos	MÁS DE 50	LISA/RUGOSA	Muy bueno	Varios
METAL	DE 50 A 150	LISA, RUGOSA O CON RELIEVE	Muy bueno	Formas complejas, prefabricados	
HORMIGÓN	MÁS DE 100	LISA O POCO RUGOSA	Bueno	Prefabricados a cara vista	
				*depende de más parámetros	

El número de partes dependerá del tipo de encofrado que se realice y del tamaño que tenga, siendo algunas de estas partes los paneles, puntales, cimbras, tensores, largueros, etc. En la Figura 14 puede verse un ejemplo de encofrado de madera con sus partes nombradas. La función de estos elementos es la de sujetar las diferentes partes y evitar que las fuerzas que soportan puedan provocar el movimiento de alguna de sus partes.

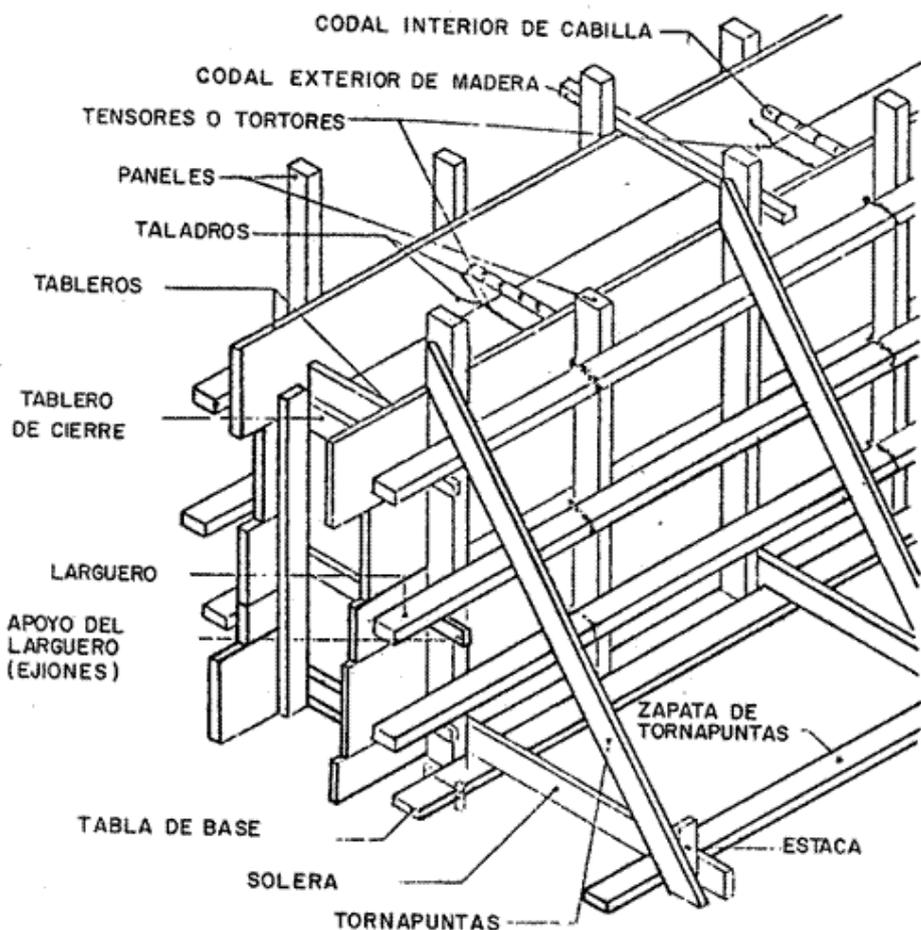


Figura 14. Partes de un encofrado (El constructor civil, 2011).

El dimensionamiento de un encofrado se realiza en base a las fuerzas que puedan ser soportadas por el conjunto del encofrado, como la que resulta de la presión que ejerce el hormigón, los pesos de los diferentes componentes o posibles fuerzas externas.

Los encofrados deben cumplir una serie de especificaciones. Éstos deben ser rígidos, resistentes y estancos, además de ser seguros y contar con un fácil montaje. Por otro lado, no deben experimentar asentamientos o grandes deformaciones. Normalmente los encofrados son elementos reutilizables, aunque pueden contener alguna pieza que quede dentro del hormigón una vez fragüe.

El encofrado debe ser económico y poder utilizarse el mayor número de veces posibles, debe resistir a la abrasión del material que contenga, y que este no se adhiera en exceso a las paredes. Para evitar esto pueden utilizarse desencofrantes. Además, debe ser químicamente inerte y que no interactúe o reaccione con el hormigón.

La realización de formas complejas con el uso de los encofrados se encuentra muy limitada. Se realizan formas de cierta complejidad, como el Auditorio de Tenerife, pero no hay total libertad para realizar cualquier forma. Además, se trata de encofrados personalizados y realizados a medida, por lo que es posible que su uso sea único, por lo que su coste es alto. La parte positiva es que se trata de utilizar en la medida de lo posible componentes estándar para realizarlo, por lo que estos sí que podrían volver a utilizarse.

En la Figura 15 se muestra una imagen tomada durante su construcción. Este edificio está compuesto por elementos esbeltos de hormigón, con forma curva, realizado con el uso de encofrados. La parte que recibe el nombre de “ala” (parte superior), es una cubierta con cien metros de voladizo.

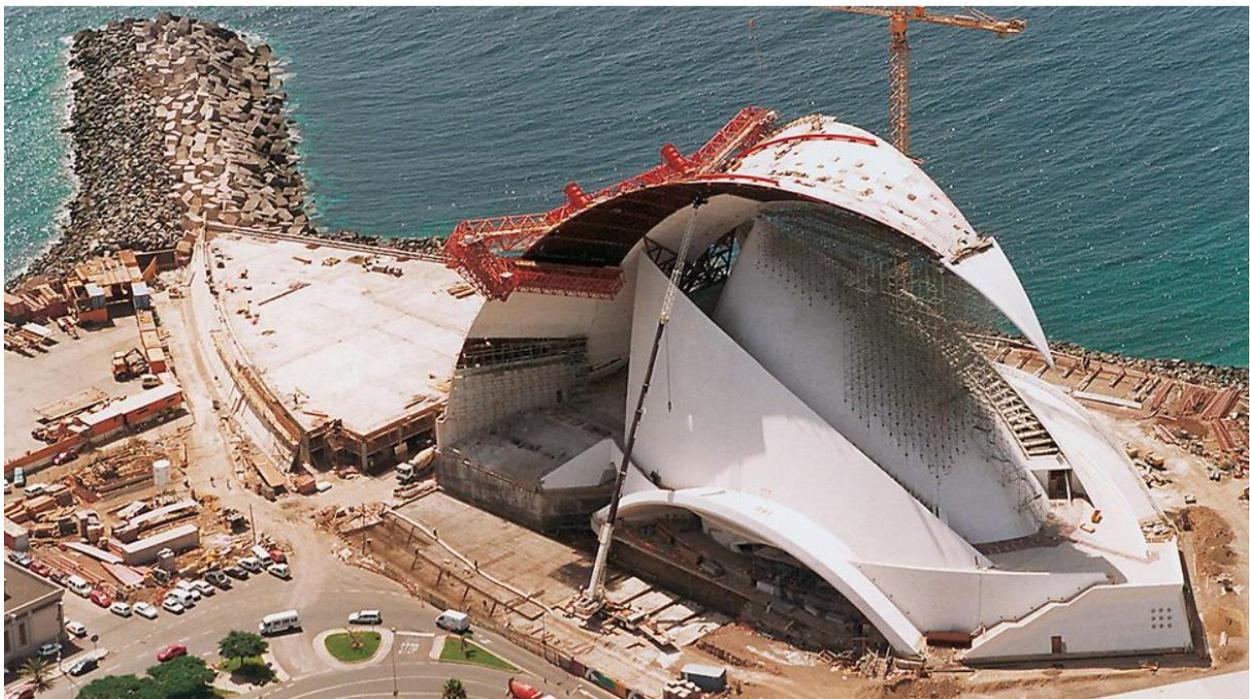


Figura 15. Imagen de la construcción del Auditorio de Tenerife (peri.es, s.f.).

4.2.2 Encofrados fabricados mediante impresión 3D

El uso de los encofrados tradicionales se ve limitado en el número de usos que pueden llegar a tener, así como la posibilidad de que estos tengan formas complejas, modernas o innovadoras. Por esto, desde hace algunos años, se está trabajando para introducir la tecnología de impresión 3D dentro de este ámbito.

Se está comenzando a desarrollar y utilizar moldes o encofrados fabricados con esta tecnología que sirvan para realizar prefabricados de hormigón, que cumplan las especificaciones técnicas necesarias en cada caso y que resulte más útil el uso de estos en lugar de los tradicionales.

El proceso para realizarlo es muy sencillo. Lo primero que debe hacerse es el diseño en un programa de modelado 3D. Después, se realiza la impresión del molde y, por último, se realiza el hormigonado. Además, es muy interesante la opción de realizar simulaciones y análisis del molde para así optimizar el diseño, lo cual permite reforzar las zonas que puedan verse más afectadas durante el proceso de moldeo, y así, conseguir aumentar la vida útil del molde.

Uno de los beneficios de este tipo de moldes es el uso de un menor número de componentes que un encofrado tradicional, así como la rentabilidad que se les puede sacar debido al aumento del número de usos (pudiendo llegar hasta los 150 o incluso 200), además de ser, por este mismo motivo, más sostenibles. También el diferente tamaño que pueden tener los elementos fabricados es una ventaja, ya que, como se ha explicado anteriormente, ya existen impresoras 3D con longitudes de impresión de más de un metro (además de ser posible la unión de diferentes encofrados), por lo que el límite de tamaño es muy grande (Kraljevich F. , 2020).

Por el contrario, uno de los inconvenientes es la necesidad de personal cualificado, para realizar los diseños y llevar a cabo la impresión.

Igualmente, las diferentes posibilidades de elementos que permite crear esta técnica son innumerables, prácticamente ilimitadas. Uno de los usos con mayor potencial es la de realizar encofrados para muros o fachadas con relieves o texturas integradas o fabricar bloques o piezas con este mismo tipo de texturas (CPI-Worldwide.com. , s.f.).

Una de las últimas innovaciones es la creación de un nuevo filamento por parte de las compañías BigRep y Forward AM, pensado para usarse en impresoras 3D de gran tamaño para la fabricación de encofrados de muy alta calidad de formas complejas.

Durante la presentación de este nuevo filamento el Dr. Sven Thate, director gerente de BigRep, comentó “Nuestros clientes ya están viendo enormes beneficios en términos de coste y velocidad gracias a nuestros equipos de gran capacidad y los nuevos encofrados para hormigón fabricados con este polímero especial. Nuestras soluciones están abriendo las puertas de muchas nuevas posibilidades” (Shamloo H. , 2021).

Un ejemplo del uso de esta tecnología puede verse en la remodelación de la fachada de la antigua fábrica azucarera Domino de Brooklyn, proyecto llevado a cabo en 2018 donde se rehabilitó el antiguo edificio de 200 años en viviendas y tiendas (Redshift ES. , 2019).

Los moldes impresos en 3D fueron utilizados para crear los paneles prefabricados que permitían instalar grandes ventanales. En total se realizaron 993 elementos de esta forma tan particular, la cual puede verse en la Figura 16.



Figura 16: Ventanas prefabricadas construidas con moldes hechos mediante impresión 3D. (Redshift ES. , 2019)

Sin el uso de esta tecnología no hubiera sido posible colocar estos ventanales, por lo que hubiera sido necesario modificar el proyecto.

Hay muchos otros proyectos de construcción en los que está implementando este método. Otro por ejemplo es la creación de una escalera prefabricada (Figura 17) con este sistema. Las peculiaridades de esta escalera son la forma curva que tiene, así como el disminuido espesor de los peldaños, con la consiguiente reducción de peso de la estructura. Dichos peldaños serían fabricados con hormigón de ultra alta resistencia (UHPC).

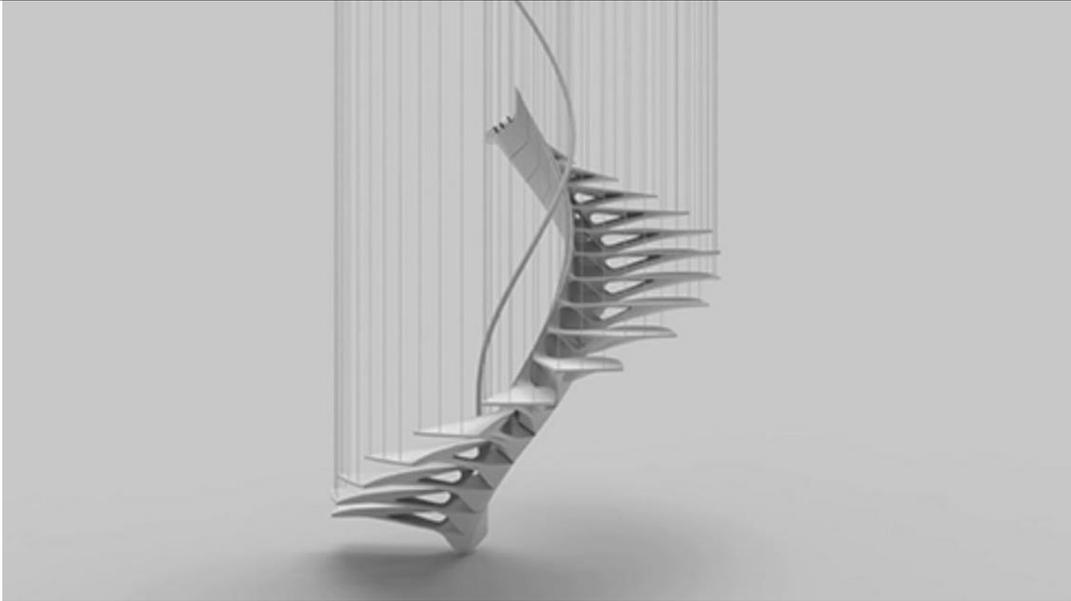


Figura 17. Escalera fabricada mediante moldeo, hecho con impresión 3D (Kraljevich F. , 2021).

Fuera del sector de la construcción, también se está utilizando este método, construyendo esculturas o elementos decorativos con moldes hechos a través de la fabricación aditiva.

Un ejemplo de esto son elementos de tipo columna con formas complejas, como los de la Figura 18, donde puede apreciarse de izquierda a derecha: el molde, una imagen del proceso de moldeo y el resultado final obtenido una vez retirado el molde.

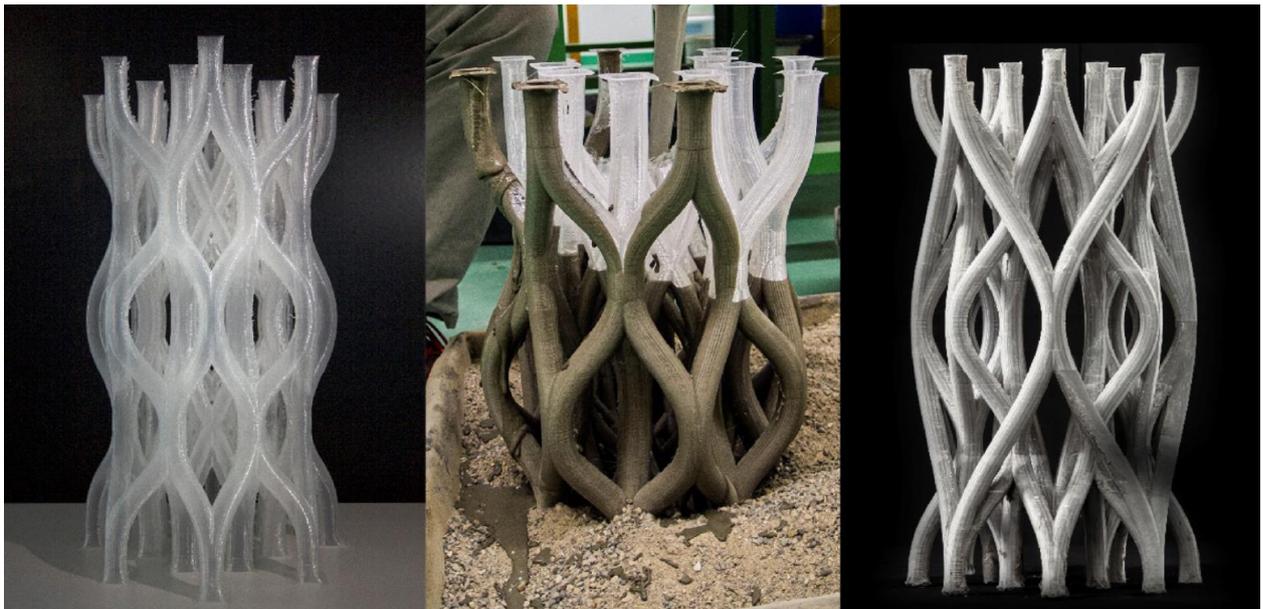


Figura 18. Columna fabricada mediante moldeo con molde realizada a través de la impresión 3D (Andrei Jipa, Lex Reiter, Robert J. Flatt, Benjamin Dillenburger, 2022).

Otro de los elementos creados ha sido una canoa de hormigón de cuatro metros de largo y 114 kilogramos de peso. En la Figura 19 puede apreciarse el molde utilizado para crear su estructura, es decir el esqueleto de la canoa (fabricado con hormigón reforzado), estructura que fue recubierta de una fina piel de hormigón de 2 o 3 milímetros de espesor, la cual fue la superficie externa de la canoa. En la Figura 20 puede apreciarse el esqueleto y en la Figura 21 la canoa una vez finalizada (Jipa, 2017).



Figura 19. Molde de la canoa (Jipa, 2017).

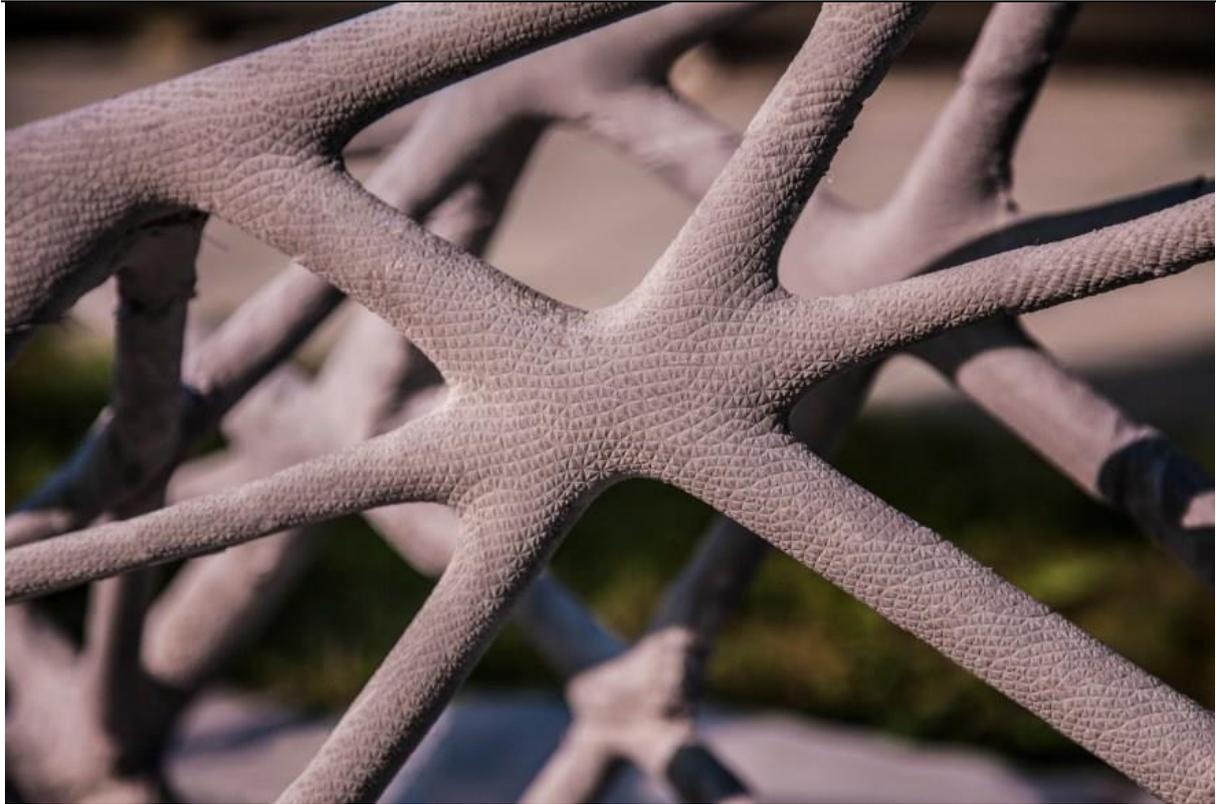


Figura 20 Esqueleto de la canoa (Jipa, 2017).



Figura 21. Canoa fabricada con hormigón (Jipa, 2017).

Cabe destacar que esta canoa fue probada y cumplió el objetivo que tenía, que era que pudiera navegar. Además, logró el primer premio en el apartado diseño innovador de la décimo sexta edición de la regata de canoas de Hormigón celebrada en Alemania.

4.3 SOFTWARE

4.3.1 ANSYS

Ansyes es un software de simulación CAE (Computer Aided Engineering) con más de 50 años de experiencia, siendo el software líder del mercado. Permite realizar el diseño, análisis y simulación de piezas dentro del sector de la ingeniería, utilizando el método de elementos finitos (FEM) (nysplm.com, s.f.).

A través de este software se resuelven situaciones complejas a las que estén sometidos los elementos ensayados, para así prever los resultados y poder hacer el diseño final sin tener que hacer ensayos, que conllevarían mayores costes y tiempo, además de reducir riesgos. Con el uso de este software se predice cómo funcionará el diseño realizado, y cuál será su comportamiento bajo situaciones de carga límites (ESSS, 2022).

El método de los elementos finitos es un método numérico, a través del cual se realiza la discretización de la pieza que se vaya a analizar, es decir, dividirla en elementos de pequeño tamaño. Estos elementos se unen por nodos y su conjunto recibe el nombre de malla. Se realizará el análisis de cada elemento por separado, tarea mucho más sencilla que realizarlo de todo el conjunto, resolviendo ecuaciones matemáticas, para las condiciones de contorno y cargas dadas.

El uso de este método permite analizar perfiles irregulares, una gran variedad de materiales y diferentes condiciones de contorno y carga. Además, una de sus mayores ventajas es que permite realizar cambios de manera muy sencilla. Por el contrario, los principales inconvenientes es que aporta un resultado aproximado, debido a la discretización realizada y a las simplificaciones.

El procedimiento general para trabajar con un análisis de este tipo consta de tres etapas. La primera de éstas es la conocida como preprocesado, en la cual se realiza el diseño de la geometría y se crea la malla, las condiciones de contorno y las cargas. La segunda de las etapas es la solución, dentro de la cual el programa realiza los cálculos para obtener un resultado. Y la tercera es el postprocesado, parte en la cual se muestran los resultados obtenidos.

Ansys permite realizar análisis estructurales mecánicos, dinámicos, sobre electromagnetismo, turbo sistemas, fluidos, termodinámicos, vibraciones, componentes electrónicos, entre otros muchos.

4.3.2 AUTODESK INVENTOR

Inventor es un software profesional de modelado 3D desarrollado por Autodesk, que permite realizar diseños, documentación, visualización y simulación de piezas o ensamblajes. Se trata de un software CAD, Computer Aided Design, que lleva en el mercado desde el año 1999.

Además del diseño de cualquier pieza en 3D, incorpora la posibilidad de crear chapas, diseñar estructuras o moldes de inyección o realizar e incorporar a los modelos diseños tubos y tuberías, cables y arneses (Marta, 2022).

4.3.3 ULTIMAKER CURA

Ultimaker cura es una aplicación que sirve de motor de segmentación para la impresión 3D. Se trata del software de impresión 3D más utilizado, con más de un millón de usuarios.

CURA proporciona una interfaz gráfica en la cual puede verse el modelo que se va a imprimir, el cual es necesario importar en formato STL, OBJ, X3D, 3MF, BMP, GIF, JPG, PNG. Es posible realizar un ajuste de los diferentes parámetros de impresión y producir el gcode, archivo necesario para poder realizar la impresión.

Se pueden encontrar dos tipos de uso, un modo recomendado en el que hay pocos parámetros de impresión que se puedan variar y un modo en el que se pueden modificar cerca de 300 parámetros (UltiMaker Cura, s.f.).

5 REQUISITOS DE DISEÑO

5.1 REQUISITOS GEOMÉTRICOS

En un principio, se partió decidiendo qué tipo de arrecife crear, sin tener en cuenta sus dimensiones, y qué tipo de encofrado o molde sería el más apropiado en función del tipo de arrecife escogido.

Finalmente, se consideró que era muy buena opción tratar de replicar uno de los arrecifes que se fabricaron en el proyecto 3DPare. Una vez tomada esta decisión, se comenzó decidiendo cuál de ellos usar como base. En el proyecto 3D PARE, se trabajó con cuatro arrecifes diferentes (Figura 22): “Cubic Small Overhangs”, “Cubic Big Overhangs”, “Random Small Overhangs” y “Random Big overhangs”. Estos cuatro diseños se diferenciaban en dos aspectos principalmente. El primero de ellos era la base de la geometría a partir de la cual se habían creado (la cual podía ser un prisma o un cilindro) y el tamaño de las irregularidades de su superficie.

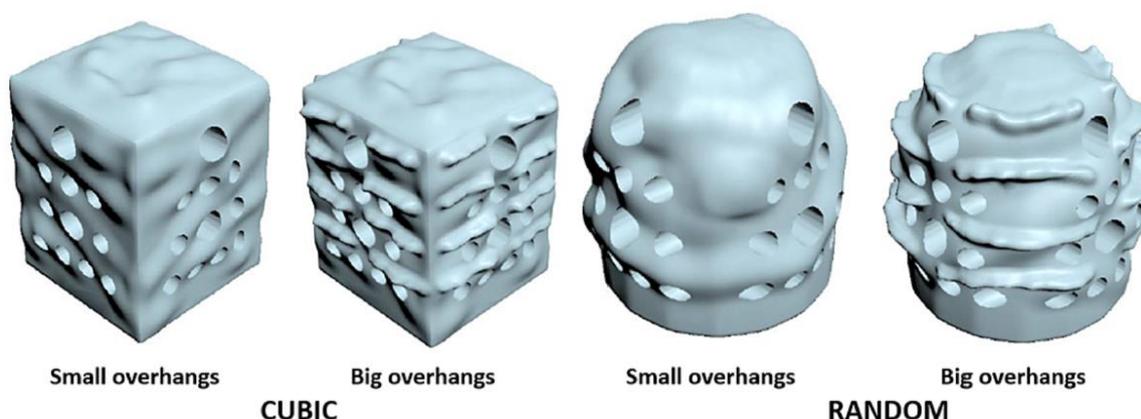


Figura 22. Arrecifes fabricados en el proyecto 3D PARE (Adrian I. Yoris-Nobile, Carlos J. Slebi-Acevedo, Esther Lizasoain-Arteaga, Irune Indacochea-Vega, Elena Blanco-Fernandez, Daniel Castro-Fresno, Alejandro Alonso-Estebanez, Sara Alonso-Cañon, Carlos Real-Gutierrez, Fouad Boukhelf, Mohamed Boutouil, 2022).

Finalmente, se optó por tratar de replicar el que recibe el nombre de “Cubic Small Overhangs” (Figura 23), debido a que se trata de uno con menos irregularidades y que partía de una base prismática. Se consideró que para realizar un primer diseño de encofrado se trataba de un buen ejemplo.

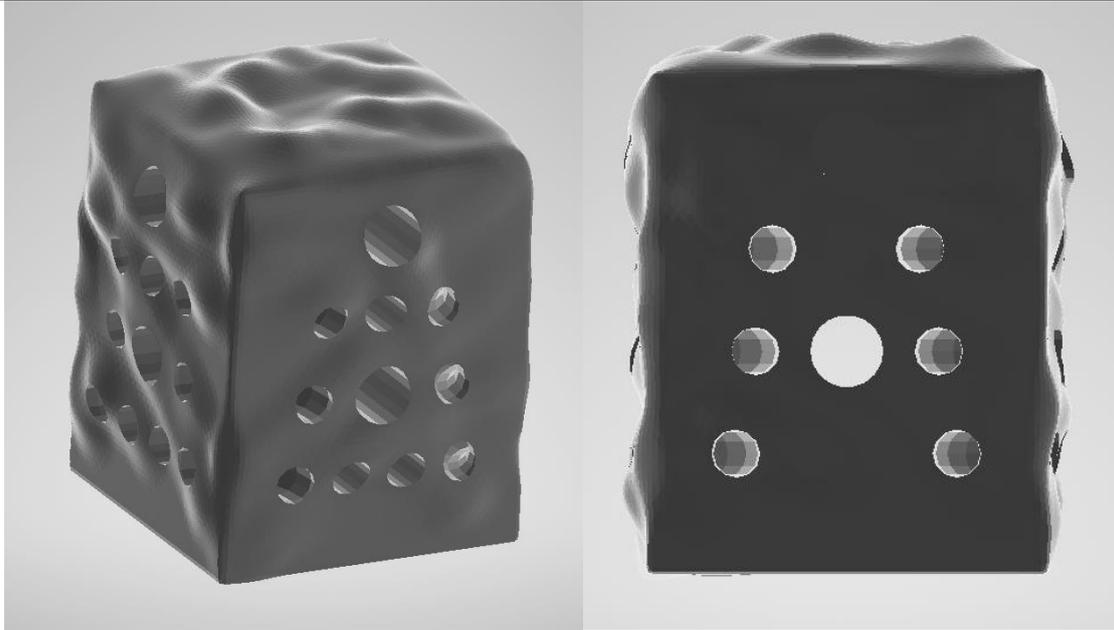


Figura 23. Cubic Small Overhangs (Adrian I. Yoris-Nobile, Carlos J. Slebi-Acevedo, Esther Lizasoain-Arteaga, Irune Indacochea-Vega, Elena Blanco-Fernandez, Daniel Castro-Fresno, Alejandro Alonso-Estebanez, Sara Alonso-Cañon, Carlos Real-Gutierrez, Fouad Boukhelf, Mohamed Boutouil, 2022).

Este arrecife escogido, como puede apreciarse en la Figura 23, parte de una forma prismática de 650 por 650 milímetros de base y 890 de altura, con una serie de modificaciones.

Lo más característico puede ser los agujeros con los que cuenta, siendo un total de 11 de dos diámetros diferentes (de 120 y aproximadamente 80 milímetros) en cada una de sus caras laterales, repartidos en cuatro filas.

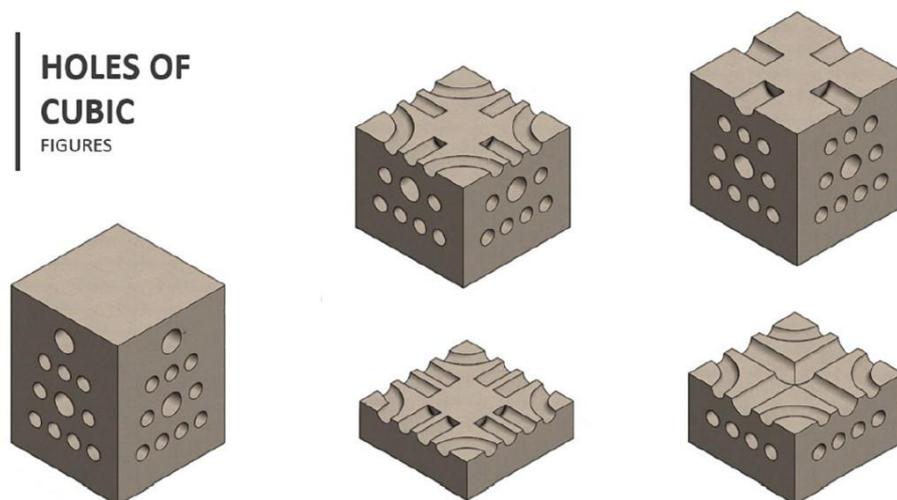


Figura 24. Agujeros del arrecife Cubic Small Overhangs (Adrian I. Yoris-Nobile, Carlos J. Slebi-Acevedo, Esther Lizasoain-Arteaga, Irune Indacochea-Vega, Elena Blanco-Fernandez, Daniel Castro-Fresno, Alejandro Alonso-Estebanez, Sara Alonso-Cañon, Carlos Real-Gutierrez, Fouad Boukhelf, Mohamed Boutouil, 2022).

Sobre la fila inferior hay un total de cuatro agujeros de diámetro pequeño, mientras que en la segunda fila hay tres; siendo el del centro de diámetro mayor, además de ser pasante en las cuatro caras. La tercera de las filas contiene tres agujeros de diámetro pequeño y la cuarta uno únicamente de diámetro grande. Es importante destacar que los agujeros de menor diámetro que se encuentran en los extremos de cada fila están conectados con los de la cara de al lado, formando 90°. Todas estas características de los diferentes agujeros que tiene el arrecife pueden apreciarse en la Figura 24.

Otro de los aspectos particulares de este arrecife es la irregularidad de sus caras, las cuales cuentan con superficies curvas suavizadas.

Se consideró por tanto que el tamaño oportuno para el arrecife del que se está realizando el diseño sería 900 milímetros de altura y 650 de ancho en sus otras dos direcciones, y que se trataría de realizar los agujeros de la manera más similar posible a los del “Cubic Small Overhangs”.

5.2 REQUISITOS DE MATERIAL

El material con el que se decidió llevar a cabo este proyecto, es decir, con el que se realizaría la impresión del encofrado, fue el PLA.

El material seleccionado fue el PLA debido a que se trata del material con el que resulta más sencillo realizar las impresiones en el caso de la tecnología de modelado por deposición fundida, y tratarse de un material que proviene de origen natural y es posible su reciclaje. Además, en cuanto a características mecánicas resulta un material compatible con el uso al que se le quiere aplicar, ya que es fuerte y rígido.

Las características mecánicas del PLA que serán utilizadas durante todo el análisis han sido obtenidas del artículo “The effect of processing parameters on the mechanical characteristics of PLA produced by a 3D FFF printer”, en el cual se estudia cómo afecta la orientación de las capas y la densidad de relleno a las propiedades mecánicas del PLA (H. Gonabadi & A. Yadav & S. J. Bull, 2020).

De este artículo se han obtenido las curvas tensión deformación para diferentes orientaciones de capa del PLA impreso en 3D mediante el método FDM (Figura 26), así como otras

propiedades de tracción en función de la orientación de las capas (Figura 29) y de la densidad de relleno (Tabla 2). También, curvas tensión-deformación para diferentes densidades de relleno (Figura 28) y curvas de esfuerzo cortante-deformación para diferentes orientaciones de capas (Figura 27), así como propiedades de cizallamiento del PLA (Tabla 3).

Las diferentes orientaciones en las que se han fabricado las probetas que se han realizado en este artículo (en las que varía la orientación de las capas que las forman) pueden verse a continuación, en la Figura 25 a, puede verse las diferentes probetas de tracción fabricadas, y en la Figura 25 b, las probetas de cortadura. Los diferentes porcentajes de relleno que se han estudiado son 100%, 75%, 50% y 25%.

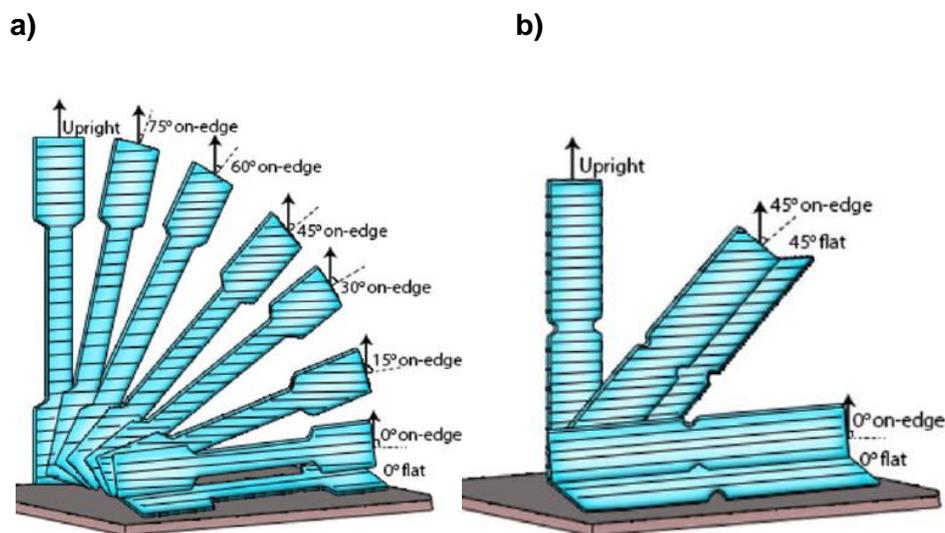


Figura 25. Diferentes orientaciones en las que se han fabricado las probetas. a) Probetas de tracción. b) Probetas de cortadura (H. Gonabadi & A. Yadav & S. J. Bull, 2020).

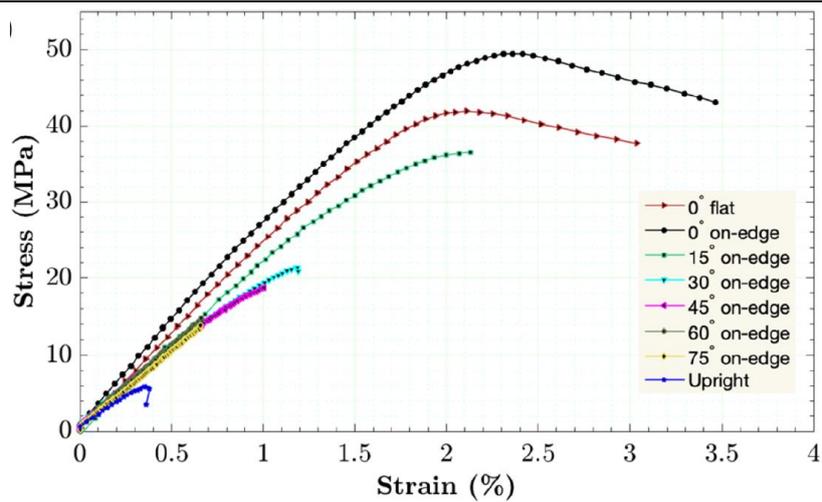


Figura 26. Curvas tensión-deformación para diferentes orientaciones de capa del PLA impreso en 3D mediante el método FDM (H. Gonabadi & A. Yadav & S. J. Bull, 2020).

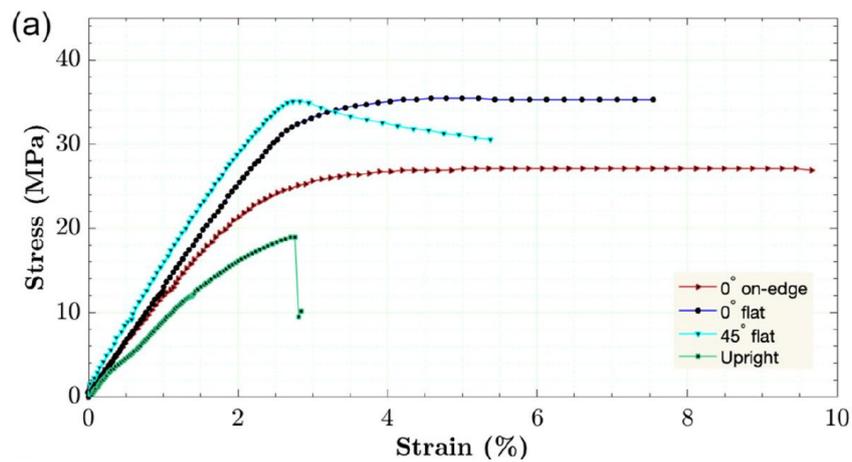


Figura 27. Curvas tensión de cortadura-deformación para diferentes orientaciones de capa del PLA impreso en 3D mediante el método FDM (H. Gonabadi & A. Yadav & S. J. Bull, 2020).

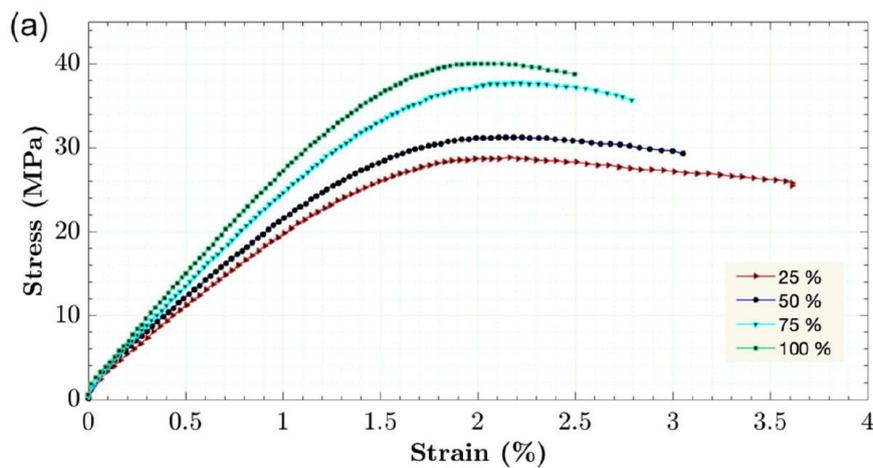


Figura 28. Curvas tensión-deformación para diferentes porcentajes de relleno del PLA impreso en 3D mediante el método FDM (H. Gonabadi & A. Yadav & S. J. Bull, 2020).

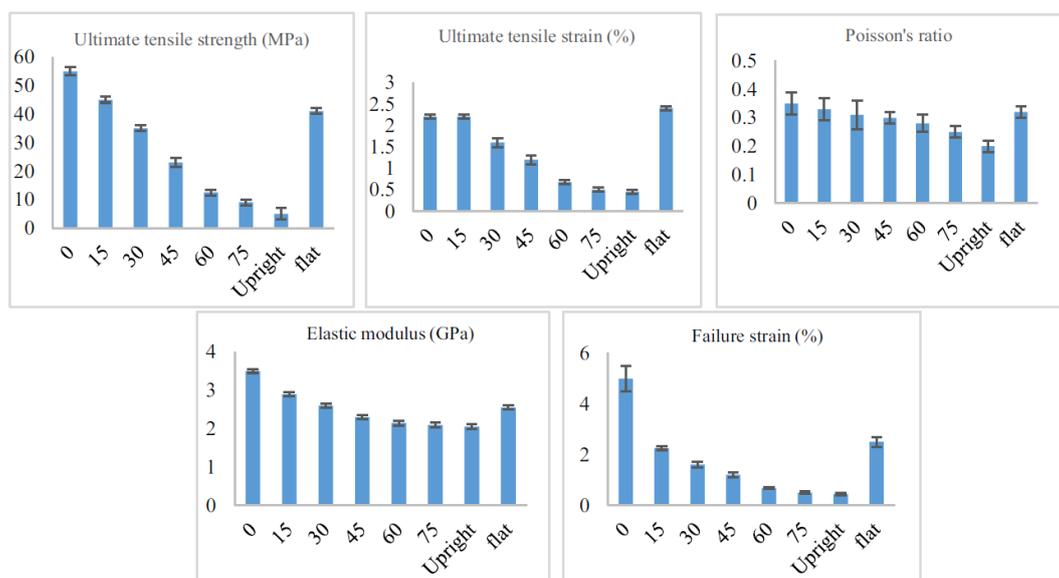


Figura 29. Propiedades de tracción del PLA impreso en 3D mediante el método FDM, en función de la orientación de capa (H. Gonabadi & A. Yadav & S. J. Bull, 2020).

Tabla 2. Propiedades de tracción del PLA impreso en 3D mediante el método FDM, en función del porcentaje de relleno (H. Gonabadi & A. Yadav & S. J. Bull, 2020).

INFILL PATTERN	ULTIMATE TENSILE STRENGTH (MPA)	DIFFERENCE TO FILAMENT	ULTIMATE TENSILE STRAIN(%)	POISSON'S RATIO	ELASTIC MODULUS (GPA)	FAILURE STRAIN (%)
25%	29±1	-43	2,15±0,04	0,31±0,04	2,05±0,05	3,4±0,2
50%	30±2	-41	2,15±0,04	0,32±0,02	2,15±0,05	2,75±0,25
75%	36±0,5	-29	2,5±0,05	0,32±0,02	2,5±0,05	2,85±0,15
100%	38±3	-25	2,6±0,05	0,33±0,01	2,75±0,05	2,25±0,025

Tabla 3. Propiedades de cortadura del PLA impreso en 3D mediante el método FDM, en función de la orientación de las capas (H. Gonabadi & A. Yadav & S. J. Bull, 2020).

SPECIMEN	SHEAR STRENGTH (MPA)	YIELD STRENGTH (MPA)	SHEAR MODULUS (GPA)	FAILURE SHEAR STRAIN(%)
0° ON EDGE	27±0,6	23±0,6	1,21±0,03	9,6±0,3
0° FLAT	35±0,5	30±0,5	1,27±0,05	7,5±0,2
45° FLAT	36±0,3	33±0,3	1,55±0,08	5,5±0,4
UPRIGHT	18±0,5	17,5±0,5	0,95±0,06	2,1±0,3

Mas adelante, en el apartado de la simulación, se especifica qué datos, entre todos los que se mostraron en las anteriores imágenes y tablas, necesitan utilizarse para este trabajo.

5.3 REQUISITOS DE FABRICACIÓN

Uno de los aspectos más importantes en el diseño de cualquier tipo de molde o encofrado es el desencofrado. Será sobre este parámetro sobre el que habrá que prestar mayor atención durante todo el diseño.

Por este motivo, se concluyó que la única opción para realizar este molde es mediante el diseño de cuatro paredes independientes, porque es la única opción en la que se podrían retirar los machos de las cuatro paredes.

Además, el desencofrado hace que sea necesario dar un ángulo de salida o calado a todas las partes que son diseñadas para crear cavidades en las piezas, ya que, de lo contrario, resultaría imposible la separación de pieza y molde.

Respecto al posicionamiento de la pieza, se pensó que la forma óptima de realizar el encofrado es en la posición natural del arrecife, para poder dejar el fondo plano de la pieza para apoyar, así como para facilitar la fabricación de las cuatro paredes.

Otro aspecto muy a tener en cuenta dentro del diseño de moldes es el aseguramiento del relleno del volumen total de la cavidad, pero en este caso debido a las características del encofrado no resulta un problema, ya que no hay zonas de difícil acceso para el mortero.

5.4 REQUISITOS DE DEFORMACIONES

En cuanto a los requisitos de deformaciones, éste no es uno de los aspectos más importantes o limitadores del proyecto.

Como lo que se va a fabricar son arrecifes de mortero cuya función no es otra que la de ser colocados en hábitats marinos, la precisión dimensional no es un parámetro que deba ser cumplido con estricta exactitud. Es decir, las dimensiones finales de los arrecifes no son de vital importancia, ya que no va a perjudicar en nada la vida útil o la funcionalidad que tengan.

Por todo esto se considerará una desviación máxima admisible respecto a las medidas del arrecife predefinidas (que eran 650 por 650 de base, y 900 milímetros de altura) de 4 milímetros. Esta posible variación será consecuencia de la presión que ejerza el mortero fresco sobre las paredes del molde y la deformación que éste sufra.

6 DISEÑO ORIGINAL

6.1 GEOMETRÍA

Como se ha comentado anteriormente, se decidió que el molde estuviera formado por cuatro partes independientes, es decir, por cuatro paredes. Esto supone que el tiempo necesario para realizar la impresión de cada una de las partes que compondrán el encofrado será menor que si se realiza de un número de partes menor, ya que, en el caso de tener disponibles varias impresoras 3D, se pueden realizar las impresiones de varias partes simultáneamente, por lo que se podría contar con el encofrado completo en un número de horas menor.

Además, el volumen de impresión de las impresoras necesario para fabricarlas sería menor, de manera que el número de equipos capaces de llevar a cabo este proceso aumentaría. Asimismo, en caso de que sea necesario reponer una de las paredes por cualquier motivo, podría obtenerse en menor tiempo y suponiendo un coste menor.

Otro beneficio de usar cuatro paredes sería la posibilidad de realizar varias de ellas idénticas, para facilitar la fabricación, la disposición de repuestos y el montaje. En este caso, se realizaron las paredes iguales dos a dos, con la única diferencia de que una tenía un perfil macho y la pared que se coloca en frente, el perfil hembra, para poder ensamblar ambas y reforzar la estructura general.

Además, era conocida ya la forma que se le dará el arrecife. Éste tendrá una forma prismática, partiendo de una base cuadrada de 650 milímetros de lado y una altura de 900.

El punto de partida del diseño de la geometría fue la decisión de cómo dividir de manera óptima el molde. Se plantearon diferentes opciones, todas ellas dividiendo de arriba hacia abajo, ya que era la única opción válida.

Se plantearon varias disposiciones diferentes mediante una vista sencilla en planta, mostradas en la Figura 30. Tras estudiar las posibles ventajas e inconvenientes de cada una de las opciones, se concluyó que la mejor manera era la opción que se puede apreciar en la Figura 30 c, es decir, realizando dos paredes que contuvieran las esquinas y otras dos, sin esquinas y con menor longitud.

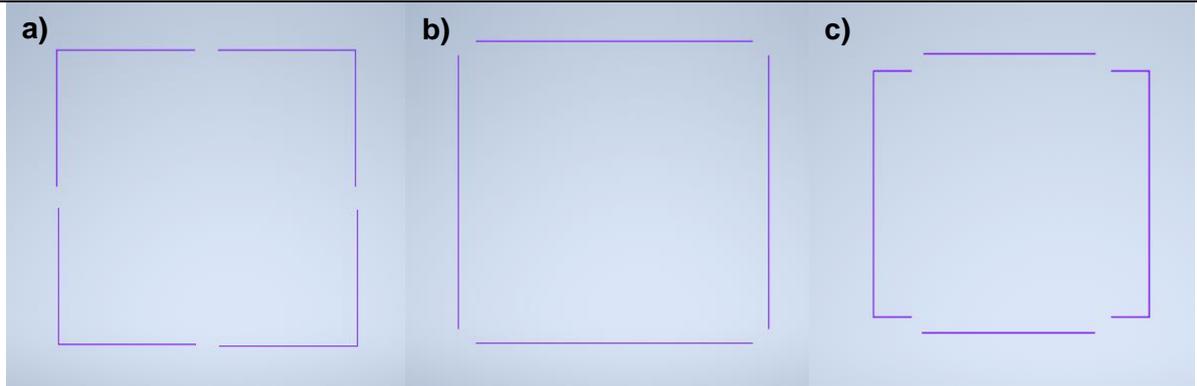


Figura 30. Posibles maneras de dividir la geometría, a), b), c).

Las ventajas de esta opción son que de esta manera se evita tener que realizar curvas en dos de ellas, y que en la propia zona donde están en contacto resultaría sencillo realizar la unión.

Una vez se tomó esta decisión, se procedió a realizar el diseño de la geometría de cada una de las paredes. Primero, se comenzaría con el de una de las paredes (una de las que contiene las esquinas concretamente), la cual recibió el nombre de “Pared 1”.

6.1.1 PARED 1

Para diseñar la pared, se partió realizando el boceto del perfil inferior. El perfil puede apreciarse en la Figura 31, y destaca la forma de conexión de las paredes.

En la Figura 32, puede verse más en detalle cómo es la zona de unión de esta pared 1 con la contigua. Resaltado en color naranja pueden verse las zonas donde estas paredes están en contacto. Igualmente, se aprovechó la zona donde termina la pared para realizar una pletina que sirva de zona de unión de ambas partes del molde, ya sea a través de unos pernos o algún otro elemento auxiliar, como sargentos o prensillas.

Además, es importante resaltar el espesor de pared que se le dio (60 milímetros). Este valor fue estimado, sin tener la total certeza de que fuera el espesor ideal, ya que era el primer diseño.

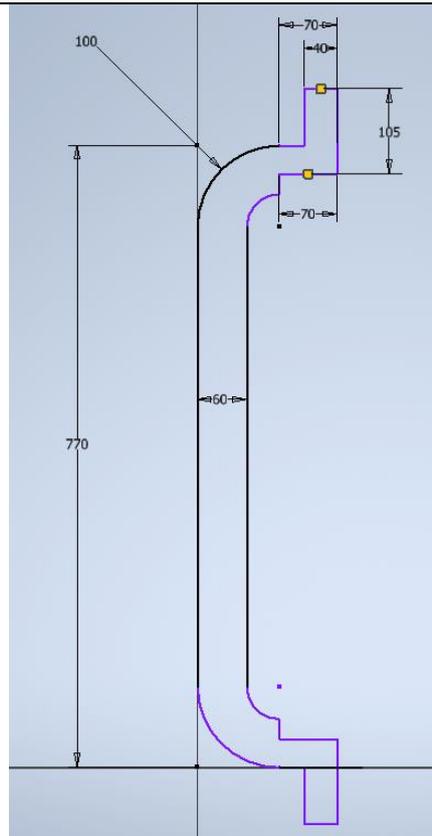


Figura 31. Perfil inferior de la Pared 1.

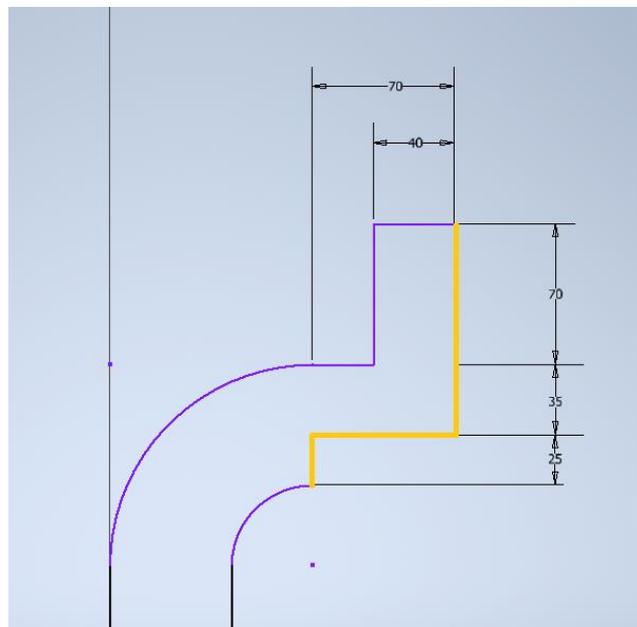


Figura 32. Zona de unión de la Pared 1.

Así mismo, se consideró importante evitar las esquinas afiladas durante el proceso de diseño, ya que éstas producen debilidad en la pieza y facilitan las roturas, y son otro motivo para

complicar el desencofrado. Por esto, se dio un cierto radio a todas las aristas internas, así como un redondeo grande a las cuatro esquinas internas del encofrado.

Con los puntos anteriormente descritos se estimó una primera aproximación de las paredes del molde. En la Figura 33 puede apreciarse, para esta primera aproximación, la base del molde. A partir de este, se desarrollaron sucesivas modificaciones con el objetivo de todas las necesidades consideradas.

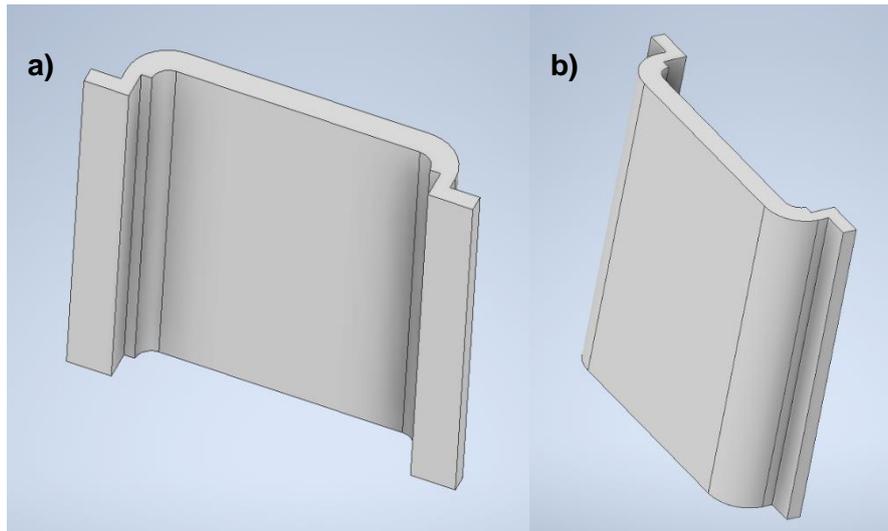


Figura 33. Base de la Pared 1, a) Vista zona interna, b) Vista zona posterior.

La siguiente fase del diseño consistió en tratar de incorporar algún elemento para replicar las superficies irregulares del Cubic Small Overhangs. Para ello, se realizó el diseño de una serie de protuberancias sobre la superficie interior del molde (Figura 34), de manera que éstas reproduzcan la superficie irregular buscada. Además de ser utilizadas para realizar la superficie no regular, el uso de estas protuberancias sirve para justificar aún más el uso de la tecnología de impresión 3D en este tipo de casos, ya que se trata de un tipo de fabricación que permite realizar piezas con geometrías complicadas e irregulares de manera muy sencilla, que, por el contrario, realizarlas con otros métodos resultaría muy complicado. Por ejemplo, tratar de realizar una pieza de estas características con un encofrado tradicional resultaría imposible, ya que no sería posible replicar las irregularidades escogidas. En la Figura 35, puede verse una vista en planta de la pieza en la que se pueden apreciar las irregularidades de la superficie encofrante.

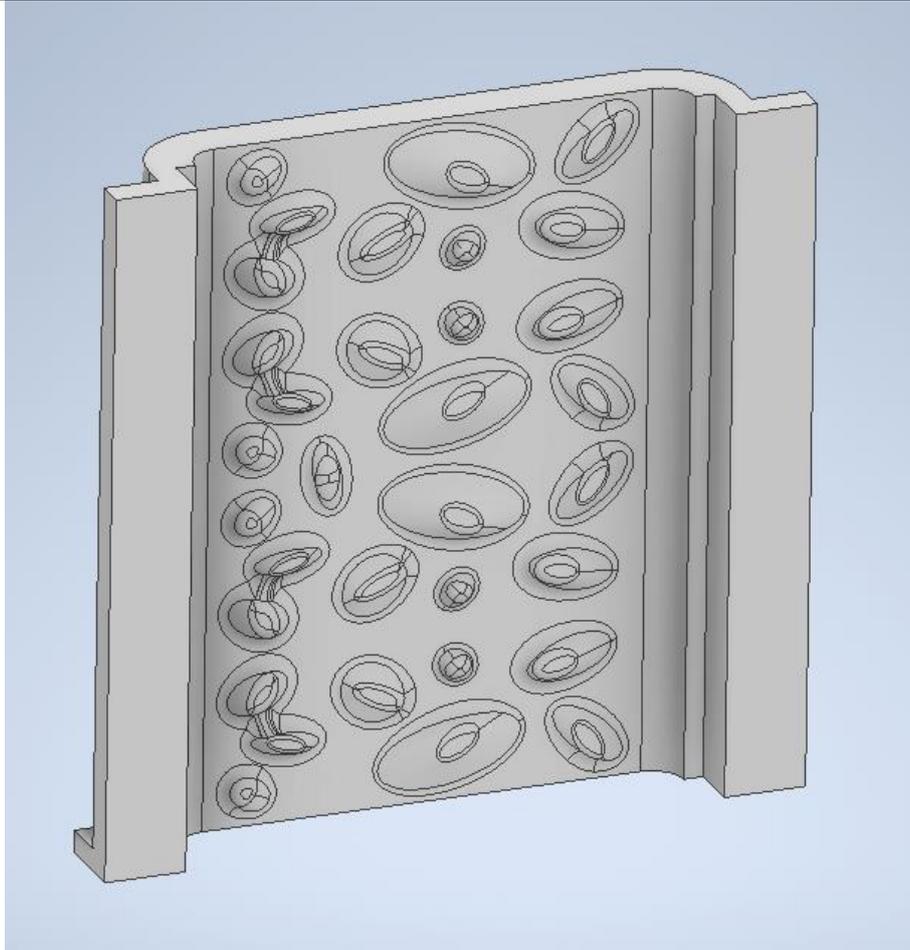


Figura 34. Superficie interna de la Pared 1.

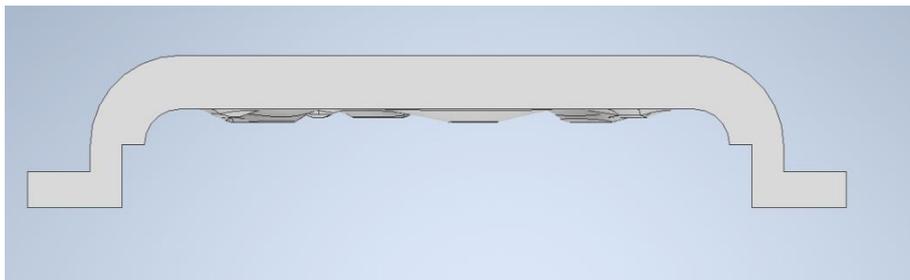


Figura 35. Vista en planta de la Pared 1.

Las protuberancias realizadas en la superficie interna del molde se crearon de una manera aleatoria, ya que se pretende dar a la pieza de mortero que se fabrique una forma que se pueda asemejar a las del propio entorno submarino, sin formas geométricas perfectas. Se intentó replicar una superficie natural y cuya apariencia sea la del propio desgaste producido por las corrientes marinas.

Al tratarse de superficies suavizadas no supondrán un problema a la hora de realizar el desencofrado. Por este mismo motivo, se decidió no dar un espesor muy grande a las protuberancias, ya que cuanto mayor fuese este espesor, más complicado resultaría.

A continuación, se diseñaron los machos que servirían para crear los agujeros en las piezas. Se realizaron un total de once (ya que éste es el número de agujeros a crear) de diferentes tamaños y formas.

El primero de los tipos de macho que se diseñó fue el que tiene un diámetro 120 milímetros. En esta pared 1, se incorporaron un total de dos de este tipo. Además, ambos se diseñaron de manera que conectasen con los dos de la pared de enfrente, por lo que se les dio una longitud de 325 mm. El objetivo de conectar los machos con los de la pared de enfrente es para replicar los agujeros pasantes que se encontraban en el diseño del arrecife del proyecto 3DPARE, y, además, para que al unirlos se logre dar algo más de fuerza al molde completo, ya que con esta unión habrá más zonas de contacto entre las paredes.

Estos dos machos parten de un diámetro de 120 mm (como se ha comentado), el cual va reduciéndose, ya que se diseñaron con forma de tronco de cono, porque para poder llevar a cabo el desencofrado de la pieza éstos deben tener un ángulo de calado. Dicho ángulo de calado está en torno a dos grados. Cuanto mayor calado se les dé a los machos que se diseñen, más facilidad habrá para realizar la separación.

Cabe resaltar el método mediante el cual se realizará la unión de los machos de paredes opuestas. Esta técnica de unión es un machihembrado, por lo tanto, en esta pared 1 encontraremos la parte que se introducirá en el otro macho, cuya geometría será también un tronco de cono por el mismo motivo que el macho. En la Figura 36, puede verse una imagen de uno de estos machos, donde se aprecia también la geometría que permite asegurar la unión.

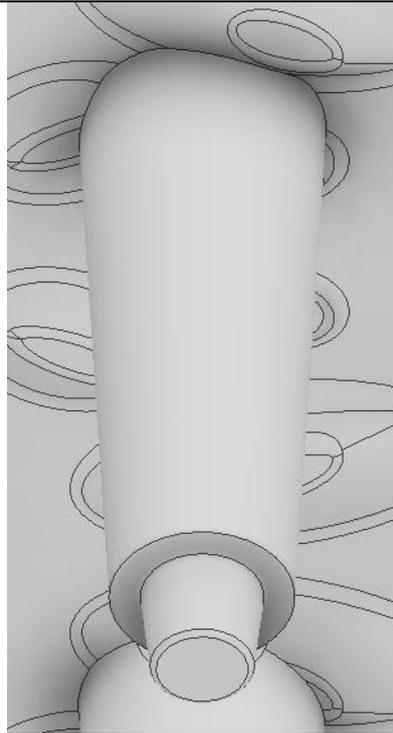


Figura 36. Macho de la Pared 1.

Para realizar el diseño de los machos de diámetro 80 milímetros que eran ciegos, bastó con realizar un tronco de cono de 150 milímetros de longitud. Fue necesario realizar un total de tres machos de este tipo.

Por último, el tercer tipo de macho tiene 80 milímetros de diámetro y se encuentra conectado a 90 grados con los de la cara contigua. Se pueden encontrar seis por cada cara. Esto añadió cierta complejidad al diseño en comparación con el de los otros dos tipos.

El diseño de esta geometría partió de un tronco de cono (al igual que las anteriores), pero para realizar el contacto con los machos ubicados en forma perpendicular, se realizó un plano de unión a 45 grados (en la Figura 37 pueden verse tres machos de este tipo). Para facilitar la salida del macho a la hora de realizar el desencofrado, se diseñó de manera que la superficie que realice el contacto no sobresaliera de la base menor del tronco de cono (como puede apreciarse en la Figura 38, donde puede verse representada en color amarillo la superficie de contacto y en rojo el perímetro de la base menor del tronco de cono).

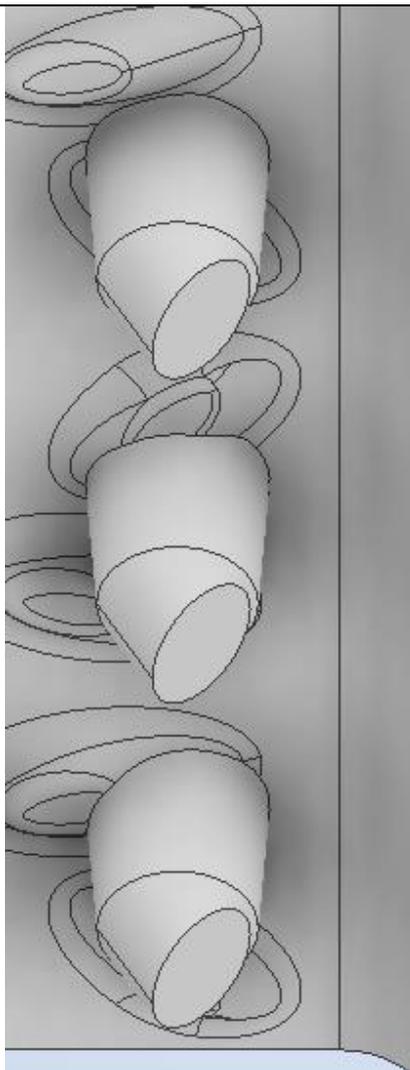


Figura 37. Machos para realizar los agujeros a 90°.

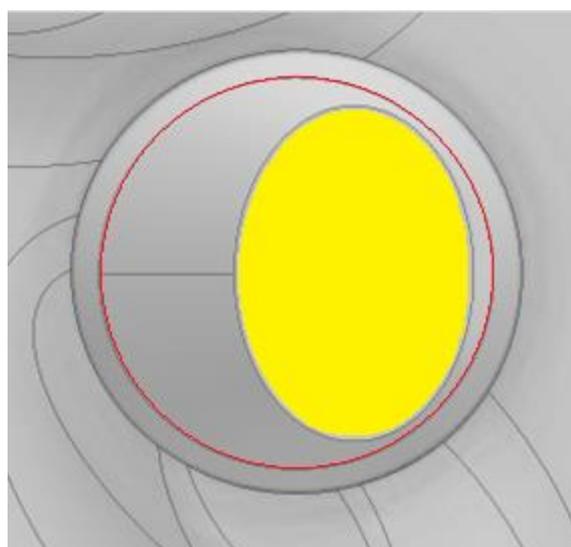


Figura 38. Alzado de un macho para realizar los agujeros a 90°.

La inserción de los machos de la pared 1 fue el punto final del diseño de la cara interior del molde, ver Figura 39.

El siguiente paso consistió en el diseño de la cara externa.

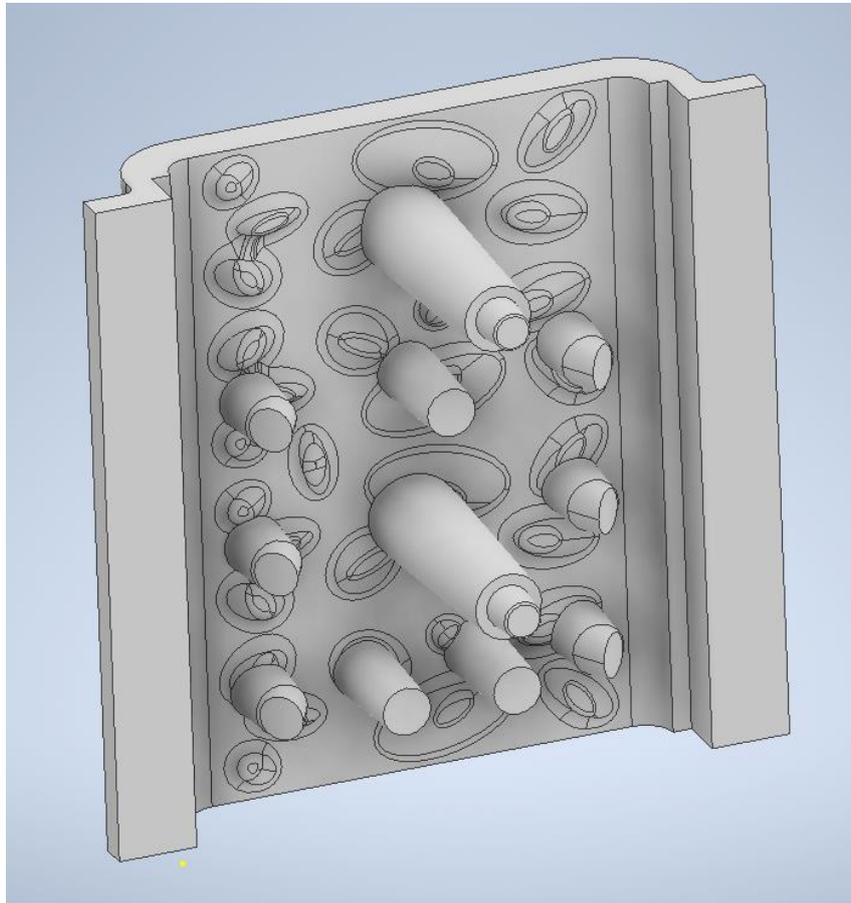


Figura 39. Geometría interna de la Pared 1

Se añadieron dos pletinas en la base del molde (Figura 40), cuyo objetivo es la aportación de una mayor resistencia al conjunto en la zona inferior y para un posible soporte al suelo en caso de considerarse necesario. Se realizaron todos los agujeros de la pared. Se hizo uno en cada una de las pletinas que se acaban de crear y 5 en cada extremo del molde para poder fijar las diferentes paredes entre sí cuando se vaya a realizar el encofrado. En la Figura 41, puede verse cuál fue el resultado de la pared tras este paso.

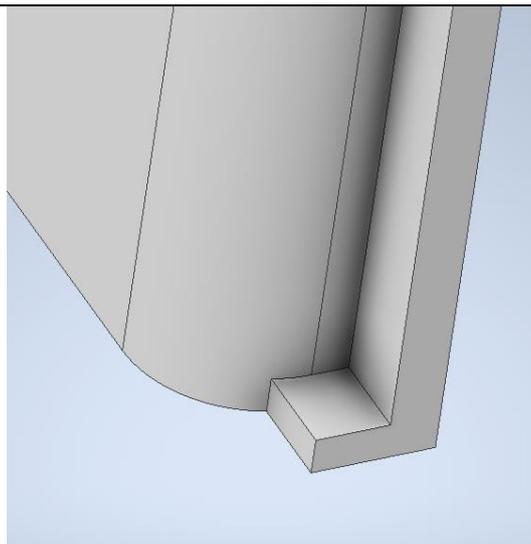


Figura 40. Pletina de la parte inferior de la Pared 1.

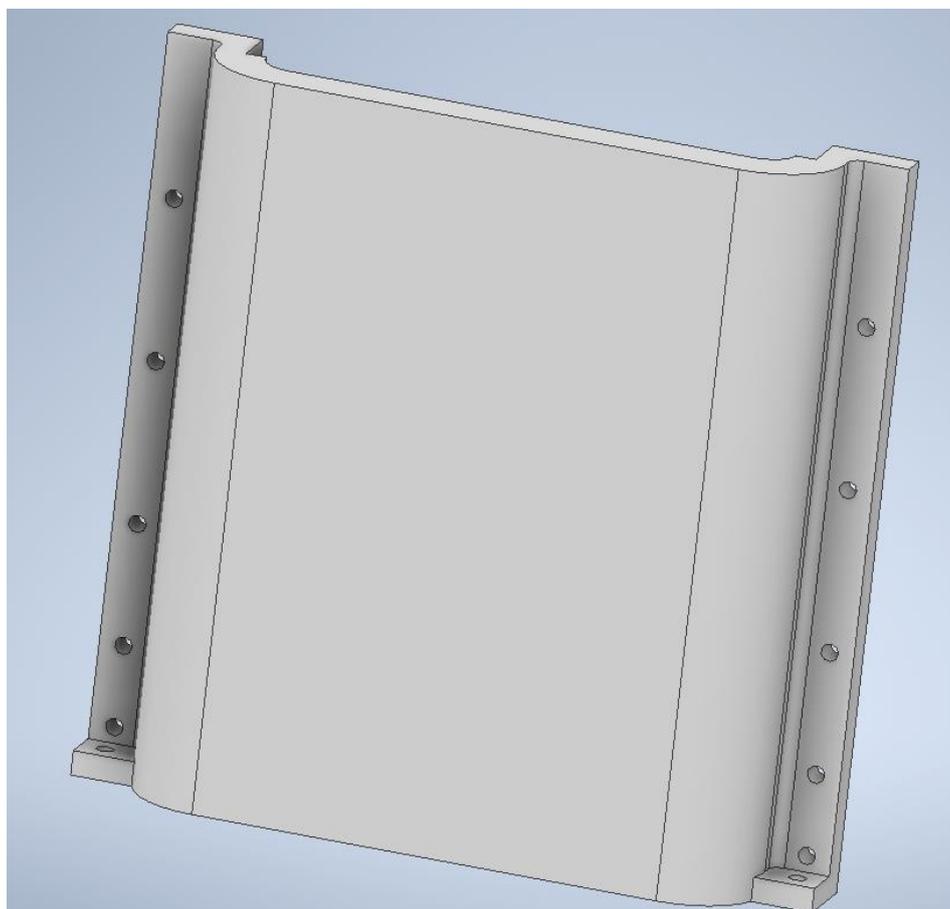


Figura 41. Pared 1 tras realizarse los taladros.

Los agujeros realizados tienen un diámetro de 21,5 milímetros, para colocar pernos de métrica 20. La separación de los que se han realizado para sujetar las paredes varia,

reduciéndose conforme disminuye la altura, ya que, cuanto menor sea ésta, mayor es la presión que soporta el molde.

También, es necesario considerar cómo se aplicará la fuerza para separar las paredes de la pieza durante el desencofrado.

La adherencia que tendrían el mortero y el molde de PLA fabricado es desconocida. Durante el diseño, este desconocimiento fue considerado como un problema si el mortero era difícil de separar del molde aquí diseñado, puesto que supondría tener que realizar grandes esfuerzos para poder llevar a cabo el desmoldeo, siendo posible en este caso que el molde sufriera graves daños.

Por este motivo se decidió realizar un ensayo para conocer lo complicado que resultaría el desencofrado. Por ello, se realizó un ensayo experimental para salir de dudas en cuanto a este comportamiento. Dicho ensayo se describe de forma detallada en el Apartado 8. Tras estas pruebas, se observó una sencilla separación de la pieza y el molde. A pesar de esto, y para evitar problemas en caso de que en algún moldeo esto no sea así se decidió incorporar al diseño elementos que ayudasen al desencofrado.

Se consideró la adición de un par de agarraderas en cada una de las paredes para así tener un lugar donde sujetar y poder tirar. Asimismo, se consideró muy importante preparar unas zonas para poder realizar palanca con una o varias barras de uña o herramienta similar, por lo que en la zona de unión de cada pared con la contigua se ha diseñado una serie de acanaladuras a diferentes alturas para poder llevarlo a cabo. En la Figura 42 a, pueden apreciarse las dos agarraderas diseñadas, y en la Figura 42 b, pueden verse las zonas preparadas para poder hacer palanca.

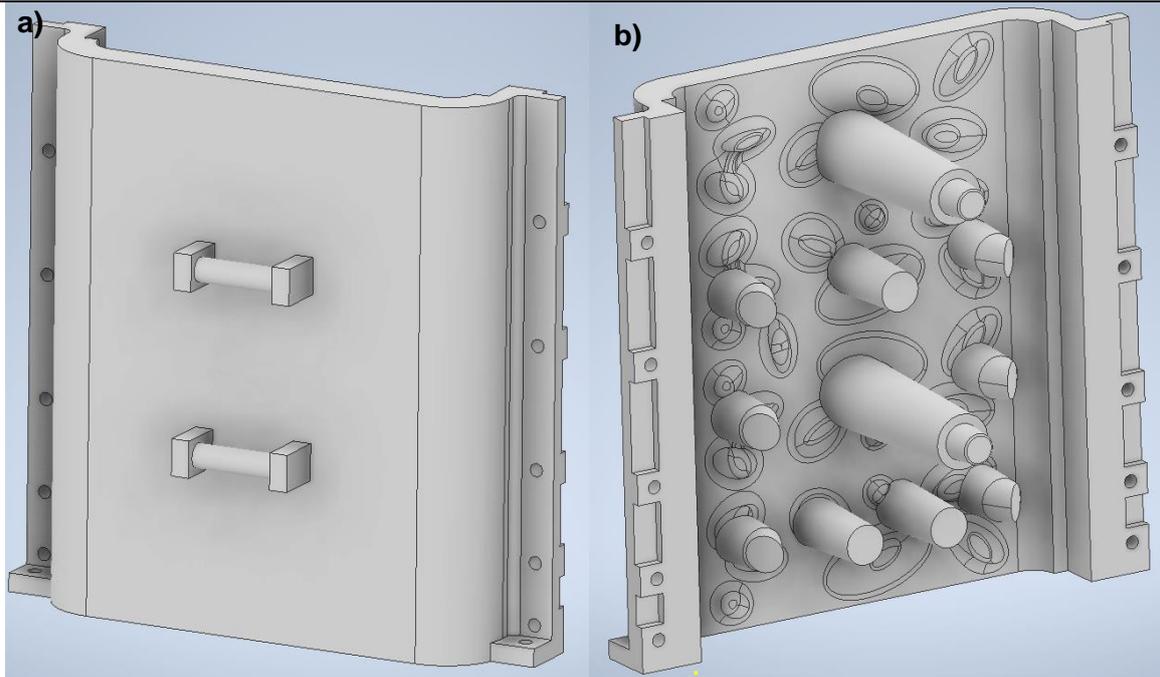


Figura 42. Pared 1, a) Agarraderas, b) zonas para hacer palanca.

Con todo esto, se considera concluido el diseño preliminar de la primera de las paredes. Todas las cotas del diseño de esta parte (pared1), pueden encontrarse dentro del Documento II. Planos.

6.1.2 PARED 2

A continuación, se realizó el diseño de la segunda de las paredes. Ésta será la que se encuentra en contacto con la que se acaba de diseñar, la cual recibió el nombre de Pared 2.

El diseño de esta pared se hizo de la misma manera que la anterior. El perfil de la base de la pared puede observarse en la Figura 43.



Figura 43. Perfil inferior de la Pared 2.

6.1.3 ENSAMBLAJE DE LAS PAREDES

En la Figura 44, pueden apreciarse los dos perfiles de estas paredes, uno junto al otro. Dicha imagen sirve también para comprender la manera en la que éstas están en contacto. El método de unión de las dos primeras paredes es a través de cinco pernos, cuyos orificios pueden verse en la Figura 45, junto con el resultado de la unión de ambas paredes.

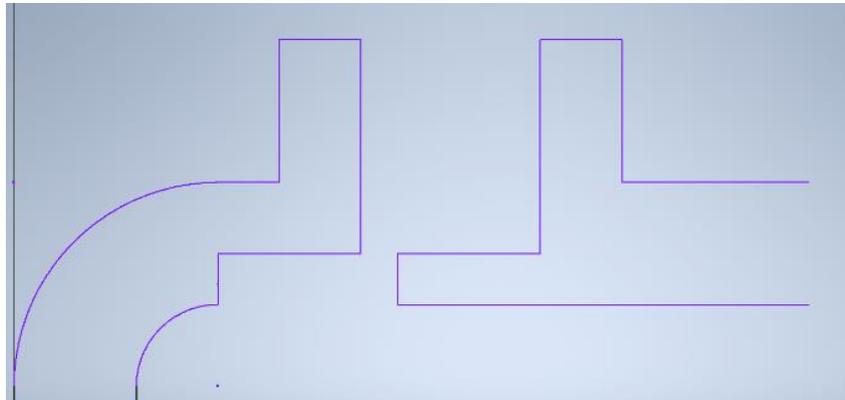


Figura 44. Perfiles de las paredes 1 y 2.

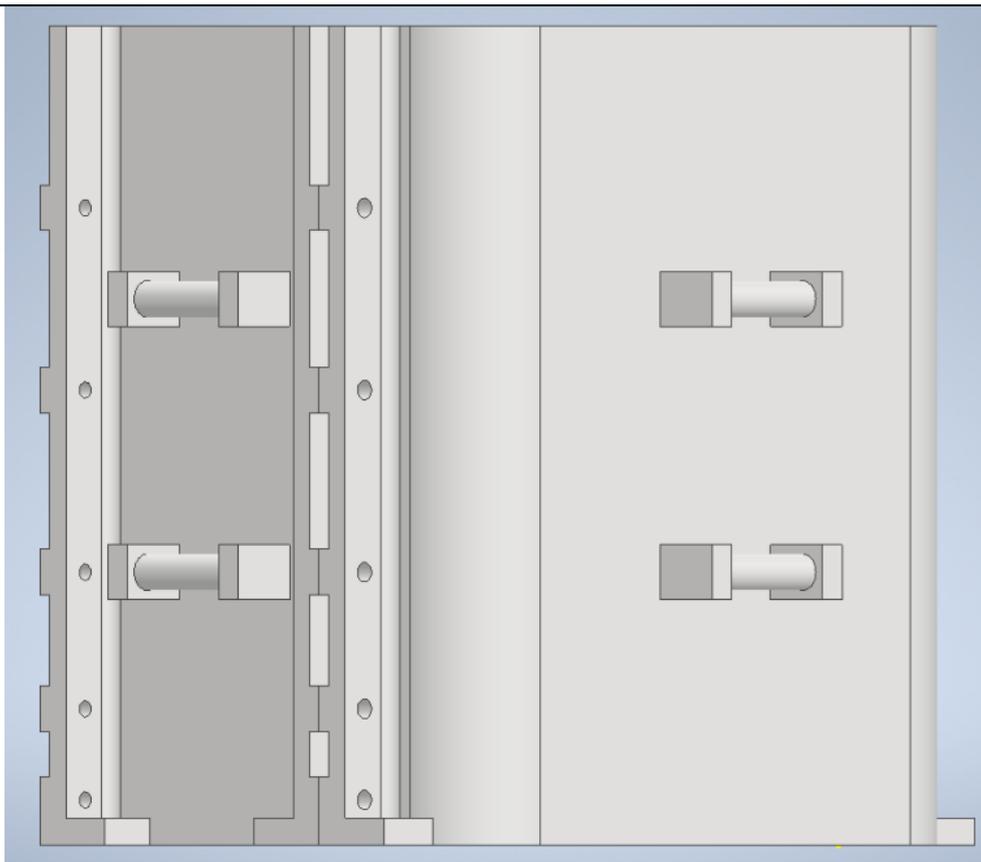


Figura 45. Imagen de las paredes 1 y 2.

Una vez finalizadas estas paredes, es posible ver cómo conectan los machos que servirán para realizar las cavidades que forman 90° dentro de la pieza. En esta Figura 46, se ve el resultado del diseño de la parte interna de estas dos primeras paredes.

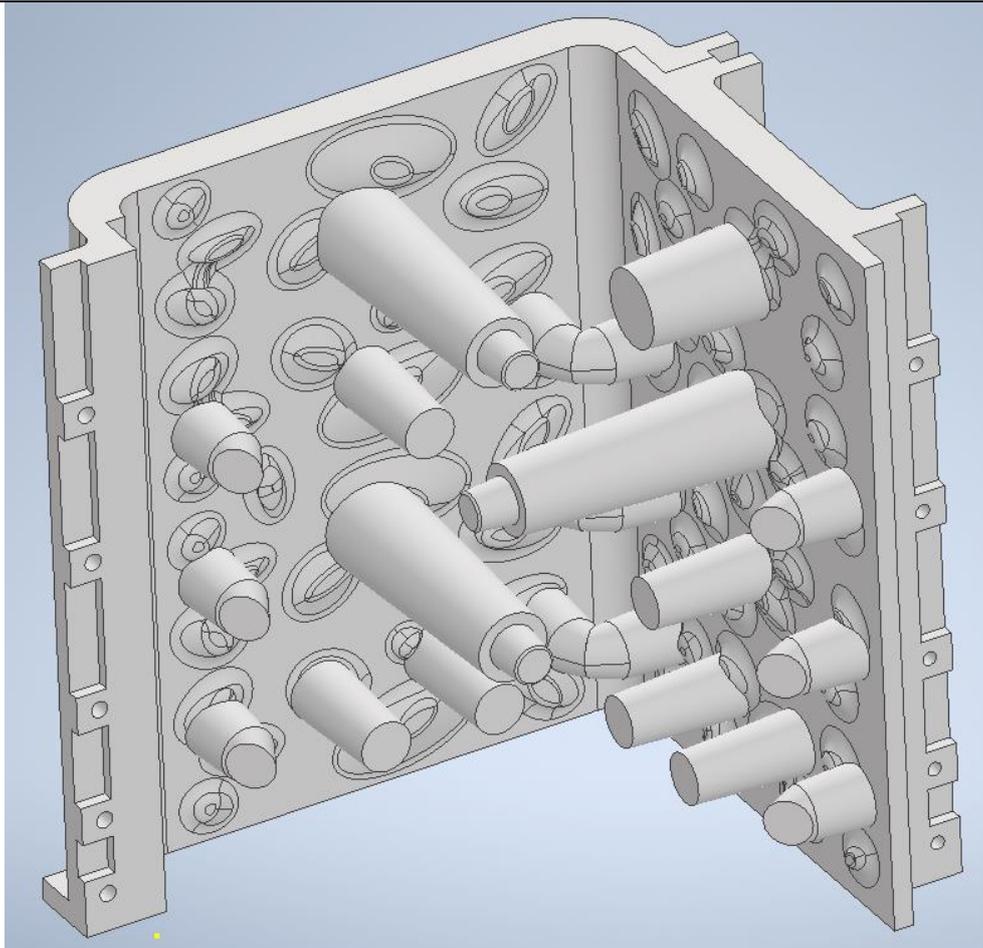


Figura 46. Imagen de la parte interna de las paredes 1 y 2.

6.1.4 DISEÑO DEL RESTO DE PAREDES

El diseño de las dos paredes restantes, Pared 3 y Pared 4, fue exactamente igual al realizado con las paredes 1 y 2, respectivamente. Las paredes 1 y 3 serán idénticas, al igual que la 2 y la 4, con la única diferencia de la geometría necesaria para ensamblarlas.

6.1.5 DISEÑO FINAL

Tras esto, se finalizó el diseño del molde, el cual puede verse en la Figura 47 (donde se incluyen la conexión mediante pernos). Concretamente, este molde fue nombrado con la nomenclatura “Molde E”.

A este diseño se le nombró Molde E porque previamente se plantearon cuatro diseños que fueron descartados (Moldes A, B, C y D) porque no eran válidos para fabricar los arrecifes.

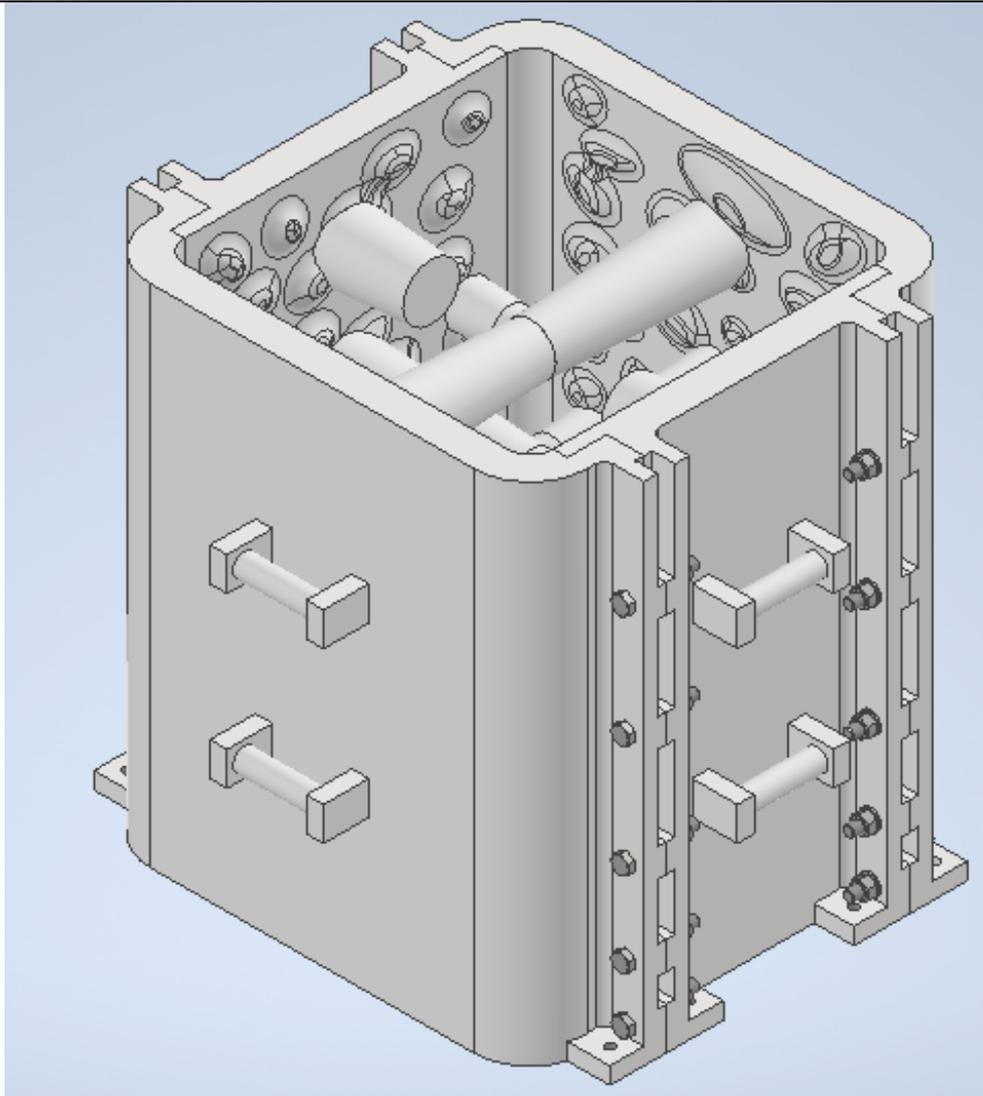


Figura 47. Molde E.

Después de realizar el diseño, se planteó la opción de diseñar un accesorio para el molde que sirviera para distribuir las tensiones producidas durante el desmoldeo en aquellos casos en los que fuera necesario utilizar una barra de uña para tratar de separar el molde y el arrecife.

Este accesorio se decidió que tuviera la forma que se puede ver en la Figura 48, y estuviera fabricado en acero de 4 milímetros de espesor. Será sobre este elemento sobre el que se apoyará la palanca, evitando así hacer fuerza directamente sobre la pletina de PLA. Además, debido a la geometría con la que fue diseñado, servirá también para distribuir las tensiones que producirán los pernos sobre el molde.

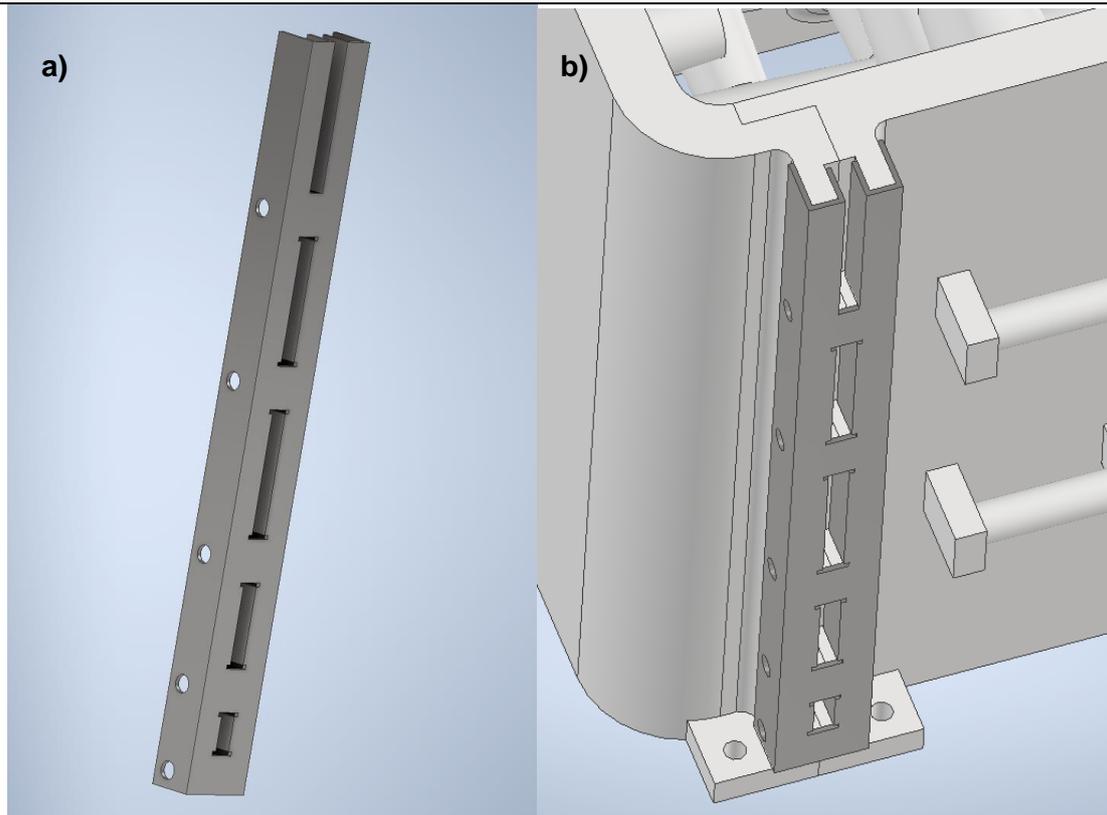


Figura 48. Útil para reforzar la zona de unión de las paredes, a) vista general, b) colocado sobre el molde.

Este útil ha sido diseñado como un accesorio, que puede ser utilizado o no, ya que el propio molde es válido para ser usado sin éste.

6.2 SIMULACIÓN NUMÉRICA

El diseño realizado, sin ningún tipo de cálculo, no tiene ninguna validez a nivel estructural ya que se desconoce si va a ser capaz de resistir los esfuerzos a los que esté sometido el molde. Por ello se considera de vital importancia la realización de simulaciones numéricas sobre la geometría previamente definida.

6.2.1 Introducción de la geometría

Lo primero que se realizó fue importar la geometría desde Autodesk Inventor al software Ansys.

6.2.2 Material

El material utilizado es el PLA, como bien se ha especificado anteriormente. A pesar de tratarse de un material isótropo, se introdujo en el software para realizar la simulación como si se tratase de un material anisótropo. Esto se debe a las características del propio proceso de fabricación, ya que al imprimirse a través de un proceso de modelado por deposición fundida se obtendrá una pieza (el encofrado) anisótropa.

Esta anisotropía depende de la posición en la que se fabriquen las paredes. Se decidió que era buena opción realizar la impresión de las paredes en vertical, es decir, crear la pared según su posición de trabajo, puesto que de esta manera la superficie de impresión necesaria es menor. Si que es cierto que será necesario una impresora con mayor altura (en dirección z) para fabricarla, pero esto resulta más sencillo de encontrar.

Otro de los motivos que favoreció esta elección, fue que, en caso de realizarla en posición horizontal, las paredes que tengan la parte curva tendrán una mala adherencia de las capas en esas curvas. Esto se debe a que la superficie de las capas en esas zonas es pequeña, como puede apreciarse en la Figura 49 representado en amarillo, por lo que tendrán una baja adherencia, siendo un problema porque es una zona débil.

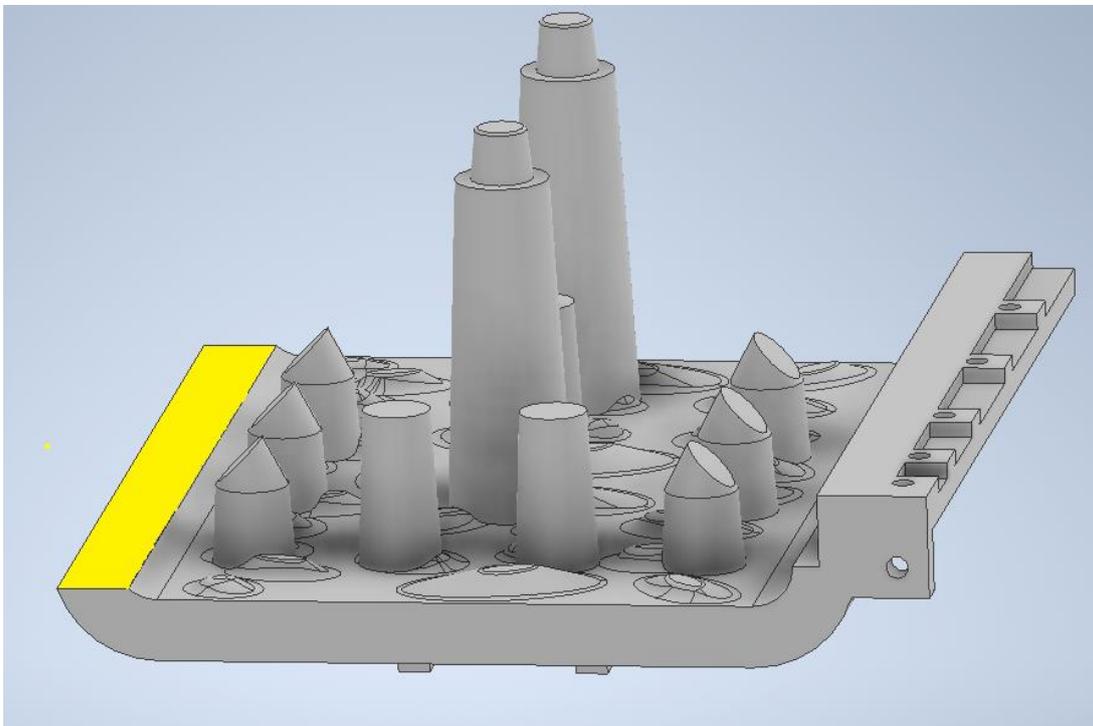


Figura 49. Superficie de contacto entre capas en las esquinas de la Pared 1, en el caso de imprimirse la pared en posición horizontal.

Al tratarse de una pieza anisótropa, las propiedades mecánicas variarán en función de la orientación. Para el caso que se está estudiando, la dirección vertical del molde se asemejaría a una probeta fabricada con orientación upright según la Figura 25. Por el contrario, en las otras dos direcciones se asemejaría a una probeta fabricada en posición 0° flat.

Para realizar la definición del material en Ansys, se utilizó el artículo mencionado en el apartado requisitos de material. Los parámetros que fueron necesarios definir fueron los que pueden verse en la Tabla 4.

Tabla 4. Parámetros para la definición del material.

Properties	Unit	100% Relleno
Density	KG/m ³	1240
ORTHOTROPIC ELASTICITY		
Young's Modulus X direction	Mpa	2333,3
Young's Modulus Y direction	Mpa	1750
Young's Modulus Z direction	Mpa	2333,3
Poisson's ratio XY		0,3166
Poisson's ratio YZ		0,3166
Poisson's ratio XZ		0,2033
Shear modulus XY	Mpa	830,76
Shear modulus YZ	Mpa	830,76
Shear modulus XZ	Mpa	1260,465
ORTHOTROPIC STRESS LIMITS		
Tensile X direction	Mpa	42
Tensile Y direction	Mpa	6
Tensile Z direction	Mpa	42
Compressive X direction	Mpa	-42
Compressive Y direction	Mpa	-6
Compressive Z direction	Mpa	-42
Shear XY	Mpa	19
Shear YZ	Mpa	19
Shear XZ	Mpa	35,5
ORTHOTROPIC STRAIN LIMITS		
Tensile X direction	Mpa	0,021
Tensile Y direction	Mpa	0,0036
Tensile Z direction	Mpa	0,021
Compressive X direction	Mpa	-0,021
Compressive Y direction	Mpa	-0,0036
Compressive Z direction	Mpa	-0,021
Shear XY	Mpa	0,0275
Shear YZ	Mpa	0,0275
Shear XZ	Mpa	0,045

6.2.3 Mallado

Una vez que el material se encontró completamente definido, se realizó el mallado de la geometría.

Debido al tamaño del propio molde, para reducir el número de elementos, se realizaron dos cortes sobre el molde (ya que éste cuenta con una doble simetría), para así trabajar únicamente con un cuarto de éste.

En la Figura 50 puede verse la malla que se utilizó para realizar el análisis.

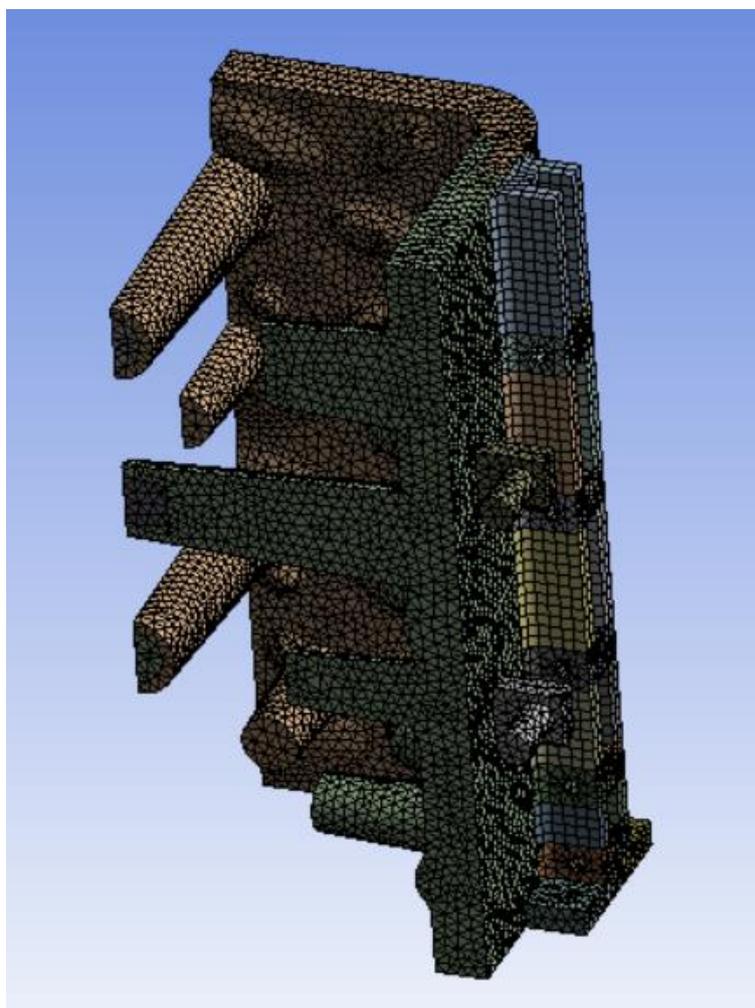


Figura 50. Imagen de la malla utilizada.

6.2.4 Aplicación de cargas y condiciones de contorno

Lo siguiente que se realizó fue aplicar las cargas sobre el modelo y las condiciones de contorno. Para ello fue necesario conocer la presión que ejercerá el mortero sobre las paredes del molde.

En este caso, la superficie encofrante es vertical. Se considera superficie encofrante vertical a aquellas que forman 90 grados con la horizontal, con un margen de error de ± 5 grados.

Este empuje o presión en paredes verticales es de carácter hidrostático, pudiendo ser corregido en función de las características del material encofrado y de las condiciones en las que se realice.

Una presión hidrostática es aquella que se produce por la acción de una columna de fluido que se encuentra en reposo (Definicion.de, s.f.).

Esta presión se calcula con la siguiente expresión:

$$P = \gamma \cdot h = \rho \cdot g \cdot h \quad (1)$$

Siendo P la presión a una cierta altura h (la cual se mide desde la superficie libre de líquido), γ es el peso específico del fluido, que a su vez es igual a la densidad del fluido (ρ) por la gravedad.

Esto supone que el valor de la presión dependa únicamente de la densidad del fluido y de la altura, lo que la hace continua y constante.

La presión provoca una fuerza perpendicular a todas las superficies que se encuentren en contacto con el fluido, Figura 51.

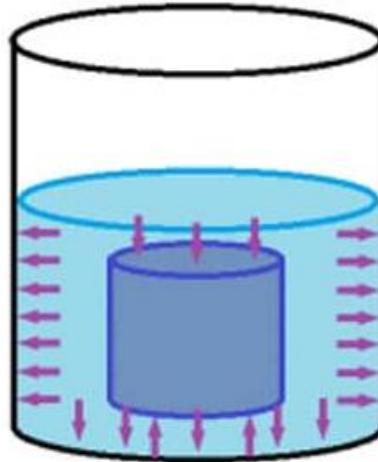


Figura 51. Presión de un fluido (Centro Estudios Cervantinos, 2019).

Los principales factores que influyen en la presión que ejerce el hormigón o mortero fresco sobre el encofrado son: la velocidad ascendente del hormigonado, la temperatura de fraguado, la docilidad de fraguado y la profundidad de vibrado (Universitat Politècnica de València - UPV. , 2017).

Para los encofrados verticales, cuando se realice el llenado del encofrado con el hormigón sin presión, el valor de presión sobre la pared variará, siguiendo una ley de presiones, o ley de empujes, distribuida y triangular en el primero de los tramos, hasta una altura h_s , lugar donde se tendrá una presión P_s , siendo $P_s = \rho \cdot g \cdot h_s$, valor que será máximo. Las alturas se considerarán desde la superficie del fluido ($h=0$), positiva hacia abajo.

Se mantendrá esta P_s constante desde esta altura h_s hasta una profundidad h_{fr} , lugar a partir del cual se encuentra el hormigón ya fraguado, siendo el empuje de todo este material fraguado nulo. En la Figura 52 se puede apreciar cómo sería el diagrama de presiones descrito anteriormente.

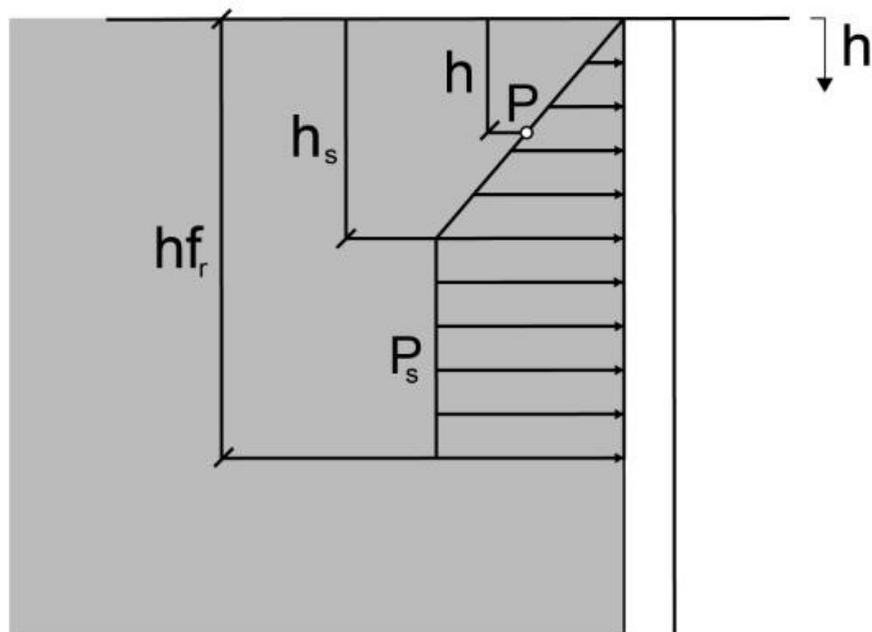


Figura 52. Diagrama de presiones del hormigón.

Las características que tienen influencia sobre el valor de la altura a partir de la cual la presión se mantiene constante (h_s) son la consistencia del hormigón, el tiempo total de fraguado, la velocidad de ascensión del hormigón y las temperaturas del hormigón y del ambiente.

La metodología de cálculo del empuje explicado anteriormente ha sido sacada de la Norma UNE 180201, de julio de 2022, "Encofrados; Diseño general, requisitos de comportamiento y verificaciones" (ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN [UNE], 2022).

No hay un método universalmente reconocido para dichos cálculos (aunque sí en todos se supone una presión hidrostática), ni una norma concreta para realizarlo. Se ha considerado usar esta norma debido a que es una de las actualizadas más recientemente y tratarse de una norma española.

En el caso particular de este encofrado vertical, se conoce que la distribución de presiones es triangular en todo momento (distribución que puede apreciarse en la Figura 53), es decir, no se llega en ningún momento a la altura h_s , ya que se trata de un encofrado con una altura total pequeña (900 milímetros).

El valor de la presión máxima entonces es la que se produce a $h=0,9$ metros, suponiendo una densidad del mortero de 2500Kg/m^3 , valdría:

$$P = \gamma \cdot h = \rho \cdot g \cdot h = 2500 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * 0,9 \text{ m} = 22072,5 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = 22072,5 \text{ Pa} \quad (2)$$

Por tanto, el valor máximo de la presión es: $P=22,0725 \text{ KPa}$.

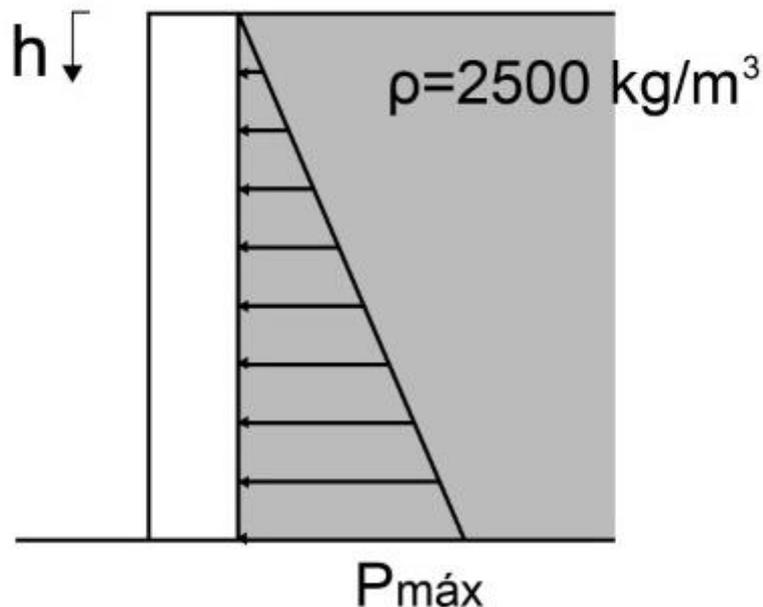


Figura 53. Diagrama de presiones del mortero sobre el Molde E.

Sobre el modelo introducido en Ansys, se aplicó en todas las caras internas del molde una presión de tipo hidrostática, cuyo valor máximo es 22,0725 Kilopascales.

Sobre los dos cortes realizados al modelo se introdujeron simetrías. Esto supone una doble restricción (la propia condición de simetría restringe el movimiento en una dirección). Además, fue introducida al modelo una restricción sobre la base del molde en dirección vertical.

6.2.5 Resultados

A pesar de trabajar con unas propiedades anisótropas en la pieza, se ha decidido utilizar como teoría de fallo estático la “Teoría de la energía de distorsión máxima”, es decir, Von Mises.

Normalmente, para materiales anisótropos se trabaja con las teorías de fallo Tsai-Wu y Tsai-Hill. La decisión de no utilizar estas teorías de fallo fue porque se desconocía una serie de constantes que eran necesarias para poder definir de forma correcta el material. Además, la teoría de Tsai-Wu considera que el material tiene diferentes resistencias en tracción y

compresión, y desde un primer momento, para el PLA utilizado se decidió suponer que éstas eran de igual valor.

A pesar de esto, la decisión de utilizar Von Mises vino motivada porque se considera que sus resultados no difieren demasiado de los reales.

En este caso, para aplicar Von Mises y estar del lado de la seguridad, se realizó el análisis considerando como límite de tensión la del caso menos resistente, es decir, los 6 MPa de la posición upright.

Para este caso concreto, se obtuvieron unos resultados de tensión máxima de 1,31 MPa (Figura 54) y una deformación máxima de 0,25 mm (Figura 55). El valor máximo de la tensión aparece sobre la parte trasera del molde, en la zona de la agarradera, producida por una concentración de tensiones, debida al cambio de sección de la agarradera. En el caso de las deformaciones, el valor máximo se produce en la zona central de la pared 1, por su parte inferior.

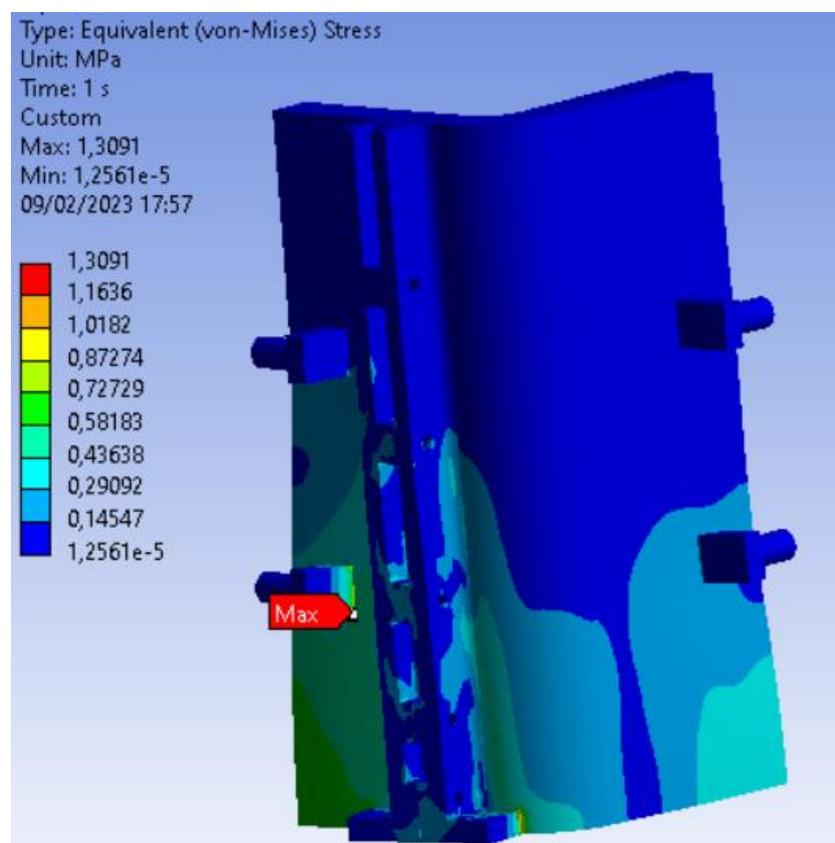


Figura 54. Resultado de las tensiones.

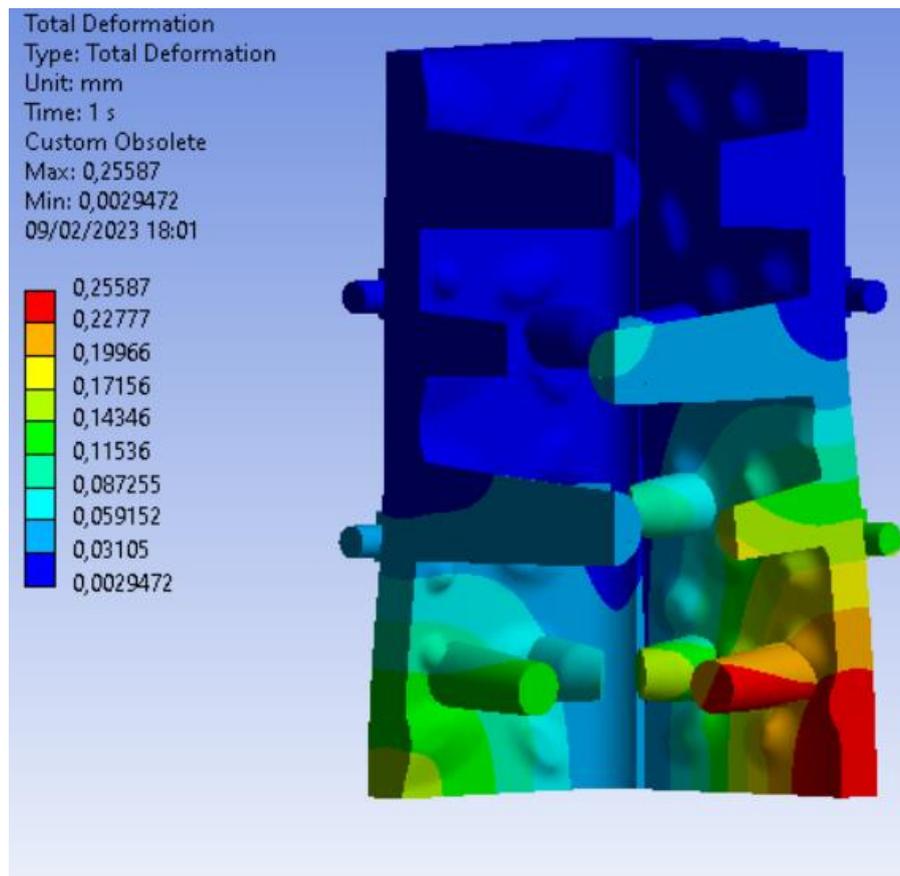


Figura 55. Resultado de las deformaciones.

Como se puede apreciar en las Figura 56 y Figura 57, las mayores tensiones producidas sobre la parte interna del molde se encuentran en la zona inferior de la esquina, las cuales llegan hasta los 0,92 MPa. Por el contrario, en las zonas superiores del molde el valor de las tensiones es muy bajo.

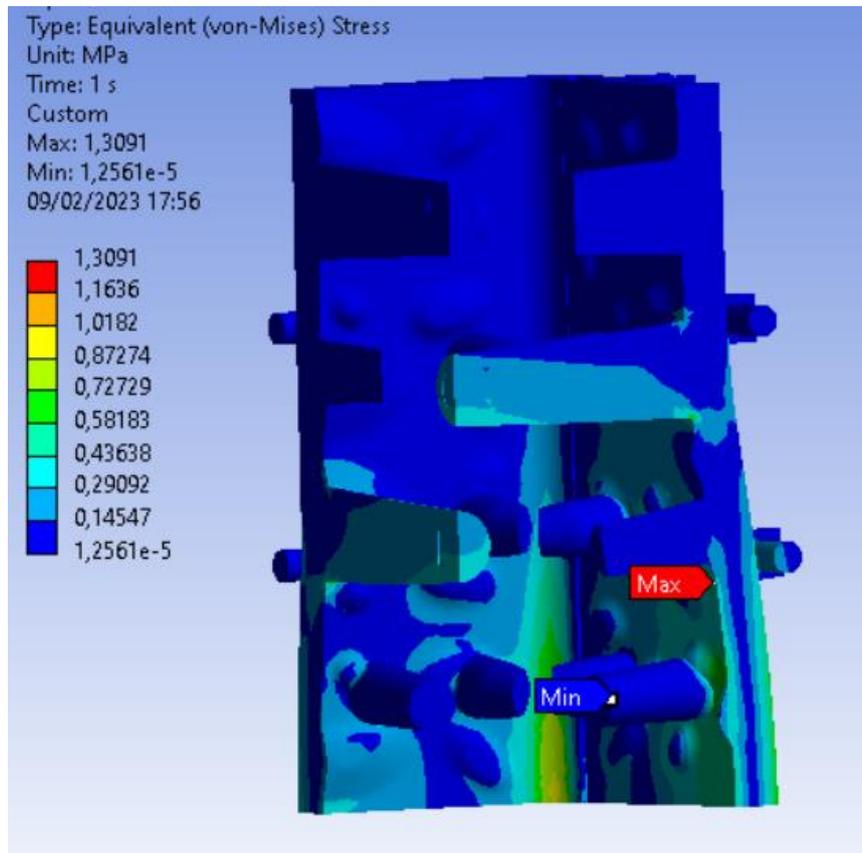


Figura 56. Tensiones de la parte interna del molde.

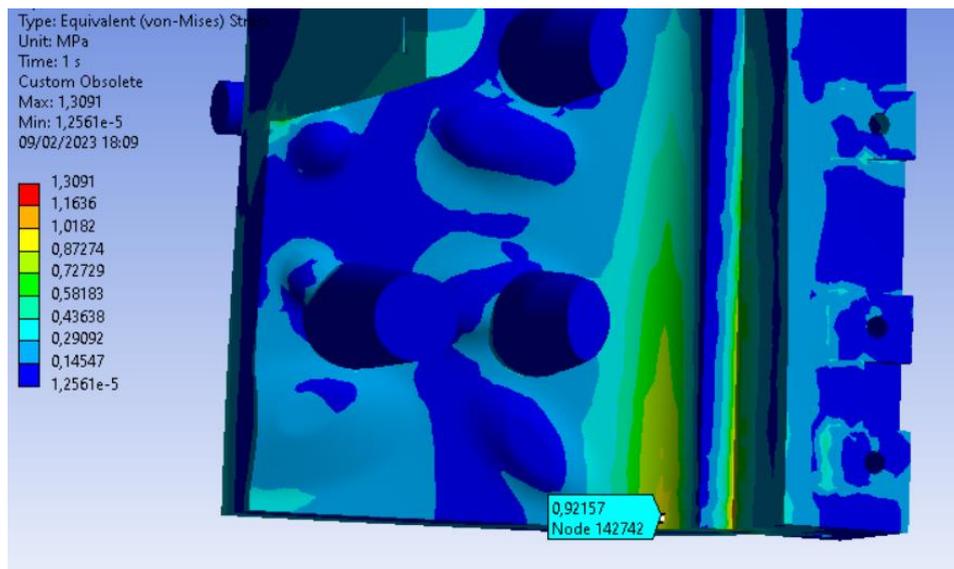


Figura 57. Tensiones de la parte interna del molde más en detalle.

6.3 CONCLUSIÓN INICIAL

Tras la obtención de los resultados de este primer análisis, se puede concluir que el diseño realizado soportará los esfuerzos provocados por el mortero. Concretamente, estudiando la distribución de tensiones que calcula Ansys, así como el valor de éstas y el factor de seguridad con el que contaría el molde (el cual tiene como valor mínimo 4,58), se puede confirmar que el diseño se encuentra sobredimensionado, y que es necesario realizar una optimización de éste para adaptarlo a las cargas que soporta.

7 OPTIMIZACIÓN

7.1 OPTIMIZACIÓN DEL MODELO

Para llevar a cabo la optimización del molde realizado, se han planteado dos vías diferentes. La primera de ellas es la reducción del porcentaje de relleno de la pieza cuando se realice la impresión 3D, y la segunda es la modificación de la geometría. Dentro de la modificación de la geometría, se realizó un afinamiento del espesor de las paredes del molde.

Con esta optimización se logrará reducir los costes y tiempos de fabricación del encofrado.

7.1.1 REDUCCIÓN DEL PORCENTAJE DE RELLENO.

Llegados a este punto, se decidió qué otros porcentajes de relleno emplear. Finalmente, se decidió utilizar (además del relleno al 100%, con el que ya se había hecho el análisis previo) porcentajes de relleno del 75, 50 y 25%, ya que estos son porcentajes utilizados en el artículo del cual se obtuvieron los datos. Adicionalmente se decidió incorporar el 10% de relleno, por si en alguno de los casos la geometría podía seguir optimizándose.

Los datos que eran necesarios para realizar los análisis pueden apreciarse en la Tabla 5.

Tabla 5. Parámetros para definir el material para las diferentes densidades de relleno.

Properties	Unit	100% Relleno	75% Relleno	50% Relleno	25% Relleno	10% Relleno
Density	KG/m ³	1240	1240	1240	1240	1240
ORTHOTROPIC ELASTICITY						
Young's Modulus X direction	Mpa	2333,3	2121,2	1824,41	1739,47	1620,71018
Young's Modulus Y direction	Mpa	1750	1590,925	1368,325	1304,625	1215,55
Young's Modulus Z direction	Mpa	2333,3	2121,2	1824,41	1739,47	1620,71018
Poisson's ratio XY		0,3166	0,31	0,3	0,29	0,28
Poisson's ratio YZ		0,3166	0,31	0,3	0,29	0,28
Poisson's ratio XZ		0,2033	0,2	0,19	0,18	0,17
Shear modulus XY	Mpa	830,76	755,24	649,57	619,33	577,045896
Shear modulus YZ	Mpa	830,76	755,24	649,57	619,33	577,045896
Shear modulus XZ	Mpa	1260,465	1145,89	985,56	939,68	875,518989
ORTHOTROPIC STRESS LIMITS						
Tensile X direction	Mpa	42	38	31,5	28	25,2
Tensile Y direction	Mpa	6	5,42	4,5	4	3,6
Tensile Z direction	Mpa	42	38	31,5	28	25,2
Compressive X direction	Mpa	-42	-38	-31,5	-28	-25,2
Compressive Y direction	Mpa	-6	-5,42	-4,5	-4	-3,6
Compressive Z direction	Mpa	-42	-38	-31,5	-28	-25,2
Shear XY	Mpa	19	17,19	14,25	12,67	11,4
Shear YZ	Mpa	19	17,19	14,25	12,67	11,4
Shear XZ	Mpa	35,5	32,12	24,09	23,67	21,3
ORTHOTROPIC STRAIN LIMITS						
Tensile X direction	Mpa	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021
Tensile Y direction	Mpa	0,0036	0,0036	0,0036	0,0036	0,0036
Tensile Z direction	Mpa	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021
Compressive X direction	Mpa	-0,021	-0,021	-0,021	-0,021	-0,021
Compressive Y direction	Mpa	-0,0036	-0,0036	-0,0036	-0,0036	-0,0036
Compressive Z direction	Mpa	-0,021	-0,021	-0,021	-0,021	-0,021
Shear XY	Mpa	0,0275	0,0275	0,0275	0,0275	0,0275
Shear YZ	Mpa	0,0275	0,0275	0,0275	0,0275	0,0275
Shear XZ	Mpa	0,045	0,045	0,045	0,045	0,045

Los valores para el caso del 10% de relleno fueron calculados a través de una extrapolación a partir del resto de valores que aparecían en el artículo.

7.1.2 REDUCCIÓN DEL ESPESOR DE LAS PAREDES.

Como ya se ha comentado, otra de las maneras de optimizar el diseño es variando la geometría. Con tal fin, se realizó el diseño de dos nuevos moldes.

La primera de estas variaciones destaca por haber sido diseñada con un espesor de pared de 30 milímetros, a diferencia del molde que se utilizó para realizar el primero de los análisis, que contaba con una pared de 60 milímetros de espesor. Este nuevo diseño fue nombrado como "Molde F".

Como puede apreciarse en la Figura 58 a, el espesor de la pared de este Molde F es visualmente inferior a la del diseño que le precedía, el Molde E.

El tercer diseño de molde que se realizó recibió el nombre "Molde G". En este caso, la pared con la que contaba esta nueva geometría era de 10 milímetros de espesor. Este diseño con pared de menor espesor puede apreciarse en la Figura 58 b.

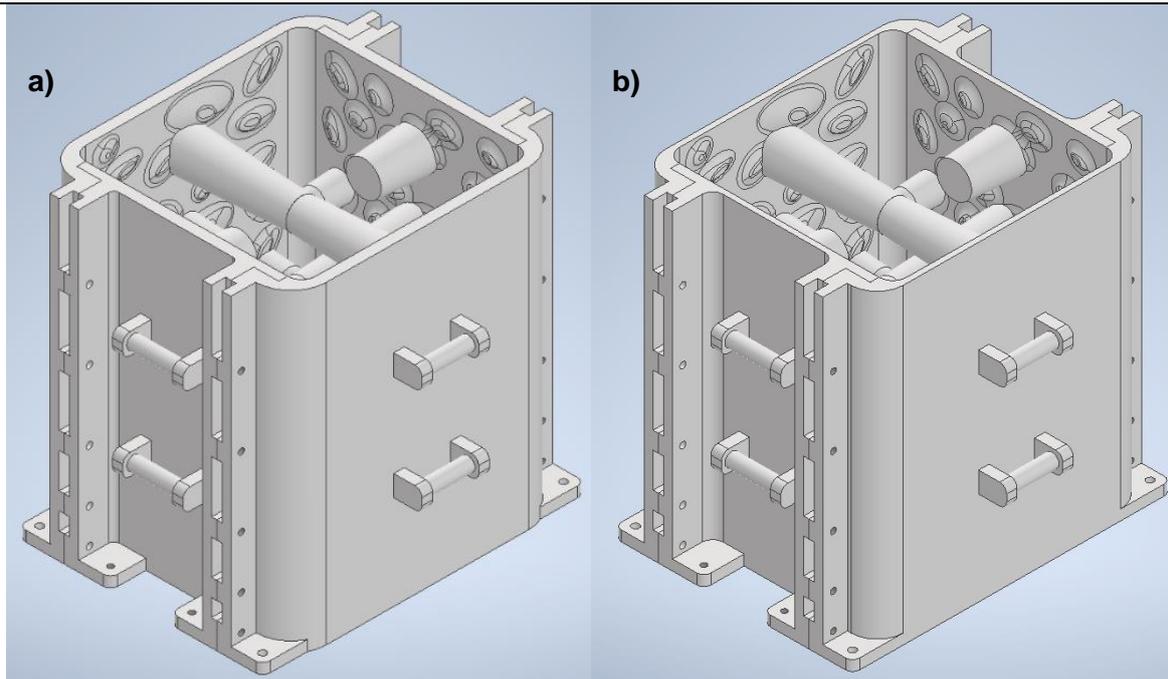


Figura 58. a) Vista del Molde F, b) Vista del Molde G.

Las dos vías de optimización no se realizaron de manera independiente en todos los casos, también se combinaron los diseños de los moldes F y G, con los diferentes porcentajes de relleno. Se simularon un total de 14 modelos, como se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6. Propiedades de los modelos analizados

Nº de modelo	Espesor de la pared	% de relleno
1	6 cm	100
2	6 cm	75
3	6 cm	50
4	6 cm	25
5	6 cm	10
6	3 cm	100
7	3 cm	75
8	3 cm	50
9	3 cm	25
10	3 cm	10
11	1 cm	100
12	1 cm	75
13	1 cm	50
14	1 cm	25

Una vez establecidas las maneras de optimizar el diseño original, se procedió a realizar los análisis pertinentes, para poder comparar los resultados obtenidos y así, poder seleccionar la mejor manera para fabricar el encofrado.

7.2 RESULTADOS DE LA OPTIMIZACIÓN

Utilizando el mismo procedimiento de simulación numérica descrito en el apartado 6.2, se obtuvieron la tensión máxima a la que estaba sometido el molde, la deformación máxima que sufría y el coeficiente de seguridad del molde.

En la Tabla 7, se muestran los resultados de los análisis de los diferentes modelos realizados. En la tabla se presenta el número de modelo, el espesor de su pared y el porcentaje de relleno que se le había dado, además de los resultados de tensión, deformación y factor de seguridad.

Es importante recordar los requisitos que debe cumplir la geometría para que sea considerada válida. El valor del coeficiente de seguridad debe ser en todo momento superior a 1,75 y la máxima deformación sufrida por el molde inferior a 4 milímetros.

En dicha tabla pueden apreciarse los diferentes resultados de deformación y factor de seguridad representados con un color. El caso de los valores que se encuentren en una celda de color verde significa que cumplen con los requisitos que se les dio previamente. En cambio, en color amarillo vienen representados los parámetros que no cumplen con los requisitos (pero con los que el molde no rompe durante el ensayo), y en color rojo vienen expresados los casos en los que el molde rompe.

Tabla 7. Resultados de los análisis para los diferentes diseños y diferentes densidades de relleno.

MODELO	ESPESOR DE PARED	% RELLENO	TENSIÓN EQUIVALENTE MAX.	DEFORMACIÓN MAX.	FACTOR DE SEGURIDAD MÍNIMO
	cm		MPa	mm	
1	6	100	1,3091	0,25587	4,58
2	6	75	1,3133	0,28266	4,1269
3	6	50	1,3195	0,3309	3,4105
4	6	25	1,3255	0,34939	3,0177
5	6	10	1,3315	0,37743	2,7
6	3	100	2,9369	0,888	2,04
7	3	75	2,9377	0,98	1,845
8	3	50	2,9358	1,1462	1,5328
9	3	25	2,9343	1,2087	1,3632
10	3	10	2,9335	1,3041	1,22
11	1	100	12,08	2,99	0,49
12	1	75	12,129	3,3117	0,44
13	1	50	12,204	3,8897	0,36
14	1	25	11,977	4,1194	0,33

Se preseleccionan, para su posterior estudio y selección de la opción óptima, los modelos del 1 al 7, ya que son los casos que pueden llegar a ser considerados válidos.

7.3 ELECCIÓN DE LA OPCIÓN DEFINITIVA

Para llevar a cabo la elección de la opción más adecuada es importante tener en cuenta varios factores.

- Valor de tensión máximo al que estará sometido el molde: puede estudiarse comparando los factores de seguridad de las diferentes opciones analizadas
- Deformación máxima que sufra el encofrado durante el moldeo. En función de estos factores ya han sido descartados varios casos por considerarlos no válidos
- Cantidad de material a utilizar: esta cantidad se expresa en kilos o metros de material.
- Tiempos de impresión: éstos afectarán en el costo final de la pieza y es un aspecto importante para saber en qué plazo se puede tener el elemento fabricado.

Para calcular los tiempos de impresión, así como la cantidad de material necesaria se utilizó el software Cura.

En Cura, se introdujo la pieza sobre la que se calcula el tiempo y la cantidad de material en formato STL (Pared 1), así como los parámetros bajo los cuales se llevaría a cabo la impresión.

Como el equipo a utilizar no está todavía completamente definido, se decidió incorporar unos parámetros de impresión cercanos a los de la mayoría de los equipos que se pueden encontrar en el mercado de gran formato. Los parámetros más importantes que se introdujeron en Cura fueron una altura de capa de 0,8 mm, una velocidad de impresión de 100 mm/s y una velocidad de desplazamiento de 300 mm/s.

En el mercado se pueden encontrar bastantes impresoras 3D que sean capaces de realizar la impresión de las diferentes paredes de este molde. Algunas de ellas son:

- BIGREP ONE: impresora 3D de gran formato alemana, con volumen de impresión de un metro cubico, capaz de imprimir con PLA a una velocidad máxima de 500 mm/s (Shamloo H. , s.f.).
- WASP 3MT HDP: impresora de gran formato compatible con alturas de capa de 0,5 a 2,5 mm. Cuenta con una velocidad de impresión de 100 mm/s (WASP., s.f.).
- RE:3D TERABOT 4: impresora con un volumen de impresión de 915x915x1000 mm³, con una resolución de capa de hasta 70 micras (RE:3D, s.f.).

Una vez introducidos en Cura los parámetros de impresión, se obtuvieron los resultados que se pueden ver en la Tabla 8. En color rojo se han marcado aquellas combinaciones en las que se considera que el tiempo necesario para llevar a cabo la impresión es excesivamente largo, como en el caso del molde E al 100% de relleno, para el cual sería necesario un total de 1140,56 horas (más de 47 días).

Tabla 8. Parámetros que influirán en la elección del modelo adecuado.

MODELO	ESPESOR DE PARED	% DE RELLENO	TENSION EQUIVALENTE MAX.	DEFORMACION MAX.	FACTOR DE SEGURIDAD MÍNIMO	TIEMPO	CANT. MATERIAL
	cm		MPa	mm		horas	
1	6	100	1,3091	0,25587	4,58	1140,56	82363
2	6	75	1,3133	0,28266	4,1269	472,82	63225
3	6	50	1,3195	0,3309	3,4105	335,78	44133
4	6	25	1,3255	0,34939	3,0177	201,12	25044
5	6	10	1,3315	0,37743	2,7	113,12	13387
6	3	100	2,9369	0,888	2,04	777,62	56547
7	3	75	2,9377	0,98	1,845	336,11	43945

Realizando un estudio sobre esta tabla, se consideró que la mejor opción es la fabricación del molde E con un 10% de densidad de relleno, ya que es la combinación que conllevará un tiempo de impresión para la Pared 1 menor (un total de 113 horas, lo que es igual a 4 días 17 horas y 7 minutos), siendo además un caso en el que tanto la deformación como el coeficiente de seguridad (y por ello las tensiones) cumple de manera holgada. Tan solo sufrirá una deformación de 0,37 mm y una tensión máxima de 1,33 MPa.

Además, esta opción será la que resulte más barata de realizar, ya que es sin duda la que menor cantidad de material y tiempo de impresión necesitará.

En la Figura 59, puede apreciarse una imagen del modelo que devuelve Cura una vez segmentada la pieza. En esta figura, las zonas representadas en color azul claro son aquellas en las que el programa indica a la impresora que es necesario la incorporación de soportes para la correcta fabricación del modelo.

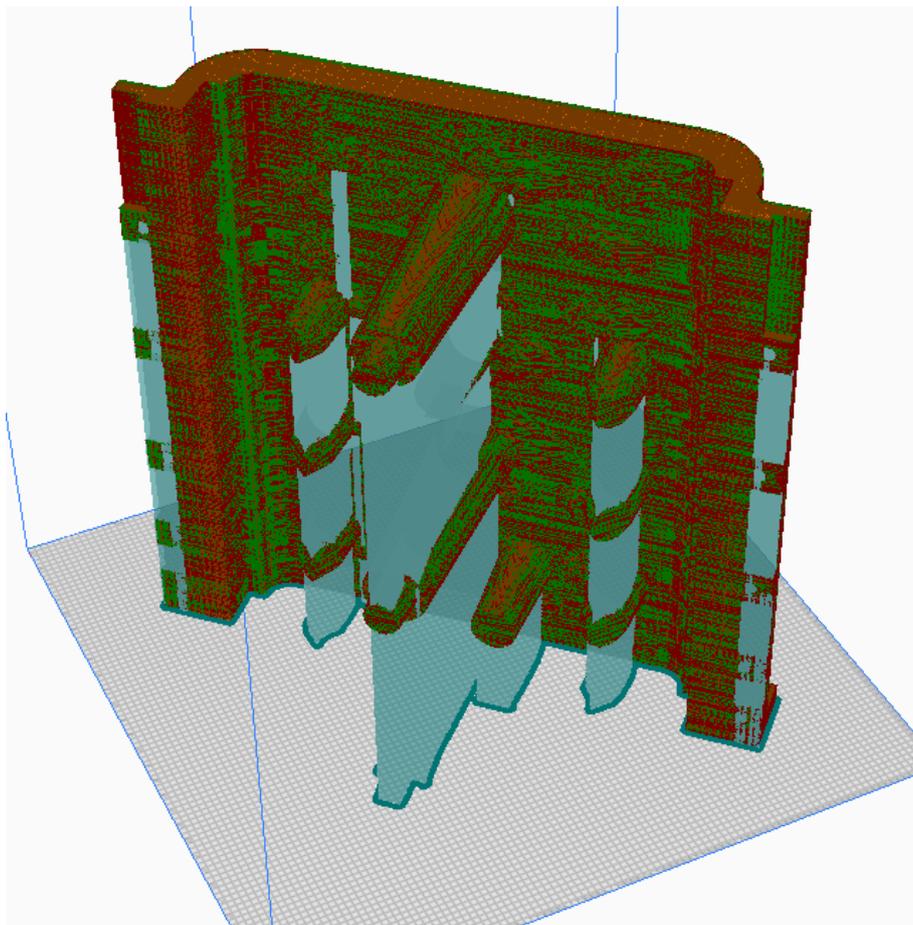


Figura 59. Imagen del modelo procesado en Ultimaker Cura.

8 PRUEBAS DE LABORATORIO

8.1 PRUEBAS DE DESENCOFRADO

8.1.1 Descripción del problema

A la hora de hacer el diseño del molde, uno de los mayores problemas encontrados fue el desconocimiento de la magnitud de las fuerzas que era necesario aplicar a las paredes para realizar el desmoldeo una vez se halla realizado el vertido del mortero dentro del molde y éste haya fraguado.

Para lograr que dichas paredes se separen del arrecife, es lógico que haya que realizar algún esfuerzo, ya que. una vez que el mortero fragüe habrá una serie de fuerzas que tiendan a mantener unidos molde y arrecife. Son éstas las que son desconocidas.

Con el fin de estudiar y poder prever cómo serán estas fuerzas, se decidió realizar un pequeño ensayo. Dicho ensayo consistió en la realización de un moldeado similar al que se está estudiando en este proyecto.

Por ello, se realizó el diseño de un nuevo molde mucho más simplificado y a escala.

El proceso del moldeado sería llevado a cabo en el laboratorio de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la universidad de Cantabria.

Se consideró oportuno realizar el ensayo con varias mezclas de material y varios desencofrantes. Las mezclas ensayadas fueron dos con las que trabajan en el laboratorio de caminos. La primera de ellas se trata de un mortero, igual al que se utiliza para la fabricación de los arrecifes artificiales, y la segunda, un geopolímero que están comenzando a utilizar. Como desencofrantes se utilizaron los dos con los que suelen trabajar y tienen constancia de que son funcionales: aceite mineral y vaselina.

Como particularidad, cabe destacar que, desde su experiencia con el trabajo de estas dos mezclas, han podido comprobar que la mezcla de geopolímero es un material que tiene gran adherencia a las paredes de los moldes, y que la mejor manera de evitar esto es con el uso de vaselina como desencofrante.

En total se realizaron tres ensayos, combinando las mezclas con los desencofrantes de los que disponíamos, como puede verse en la Tabla 9.

Tabla 9. Ensayos realizados.

Nº de ensayo	Mezcla	Desencofrante
1	Mortero	Aceite mineral
2	Geopolímero	Vaselina
3	Mortero	Vaselina

8.1.2 Método empleado

Este molde fue compuesto por dos paredes idénticas (ver Figura 60), con dos machos en cada una que servirían para hacer cuatro cavidades dentro de la pieza de mortero. El espesor de la pared fue de 10 milímetros, y se le incluyeron dos pletinas para poder realizar la sujeción de ambas paredes de manera más sencilla.

El molde para realizar el ensayo fue diseñado a escala 1/6 respecto del molde del proyecto y el arrecife real. Este molde permite crear piezas de mortero de 130 por 130 milímetros y 150 milímetros de altura.

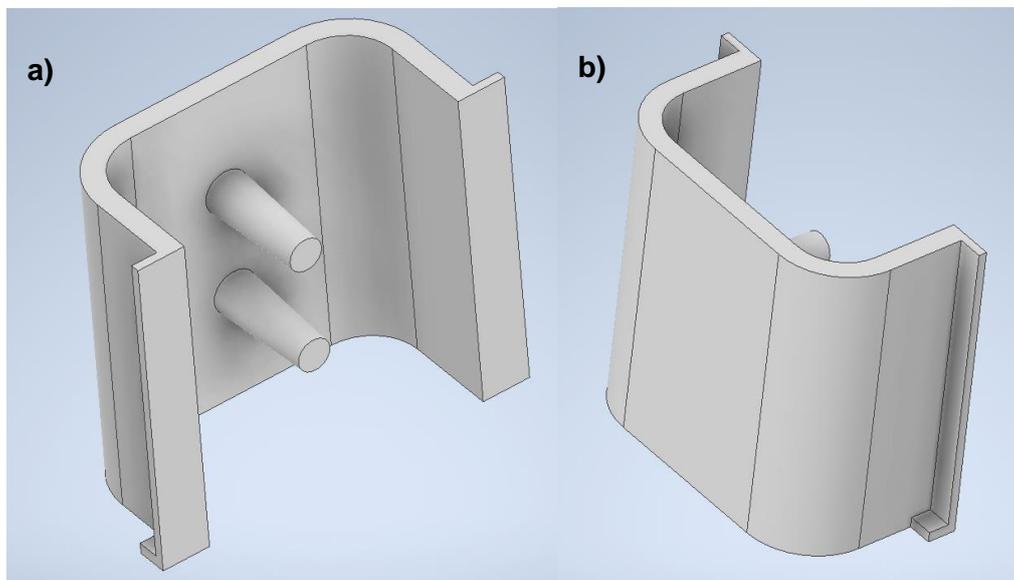


Figura 60: Imagen de la pared diseñada para el ensayo, a) Vista 1, b) Vista 2.

8.1.3 Impresión del molde

El molde fue realizado mediante impresión 3D con las impresoras del departamento de Transportes y Tecnología de Proyectos y Procesos de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación de la universidad, en ácido poli láctico (PLA),

con una densidad de relleno del 30%. En la Figura 61 puede verse una fotografía del proceso de impresión.

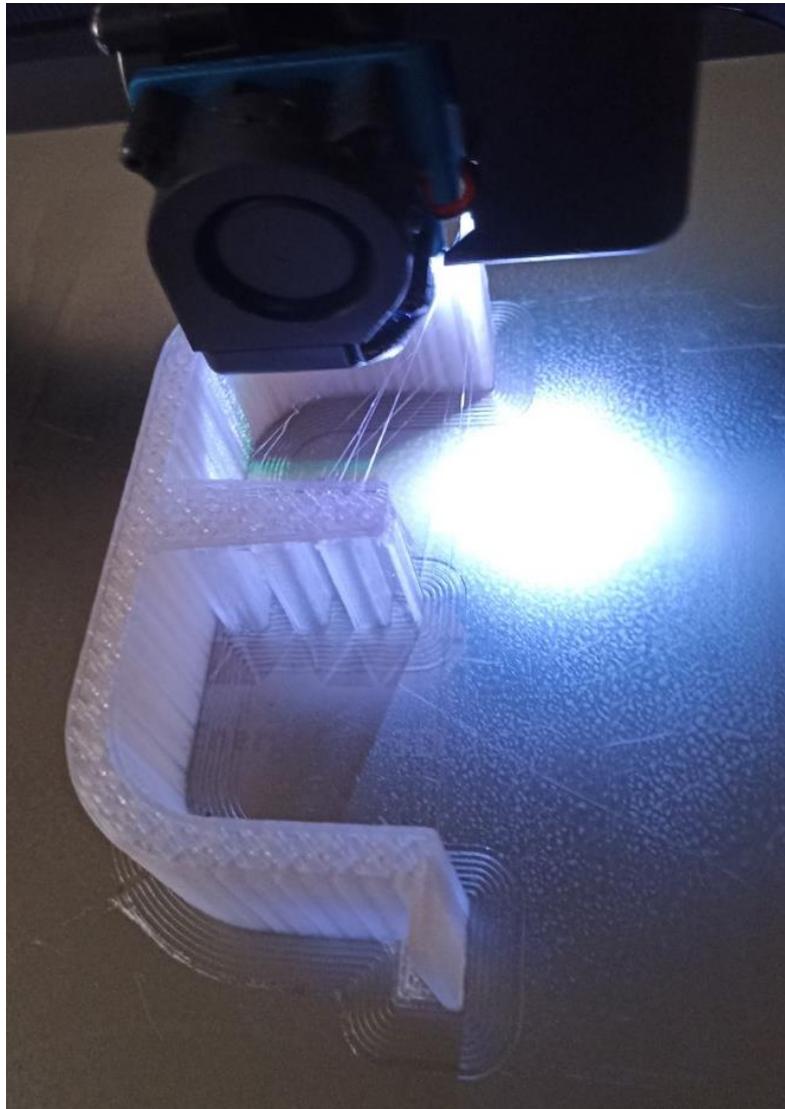


Figura 61: Proceso de impresión de una de las paredes

Durante la impresión de una de las paredes se produjo un problema con la impresora que supuso que la impresión se parara antes de que la pared hubiera alcanzado la altura correcta. Finalmente, se obtuvo una pared de 120 milímetros de altura en lugar de los 150 como estaba diseñado, pero con los machos completos. Tras pensar si repetir esta pared que no se imprimió por completo o si ensayar con ella, se consideró que con la altura impresa era suficiente para el caso que se pretendía estudiar.

En las Figura 62 y Figura 63, pueden apreciarse la pared y como sería el resultado final del molde, respectivamente.

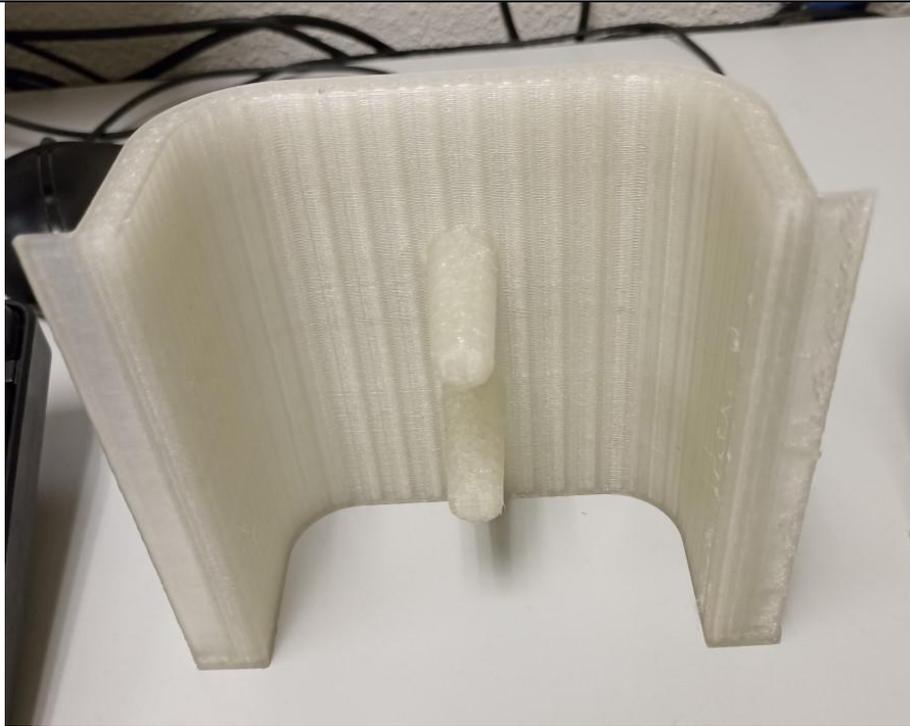


Figura 62: Pared del molde

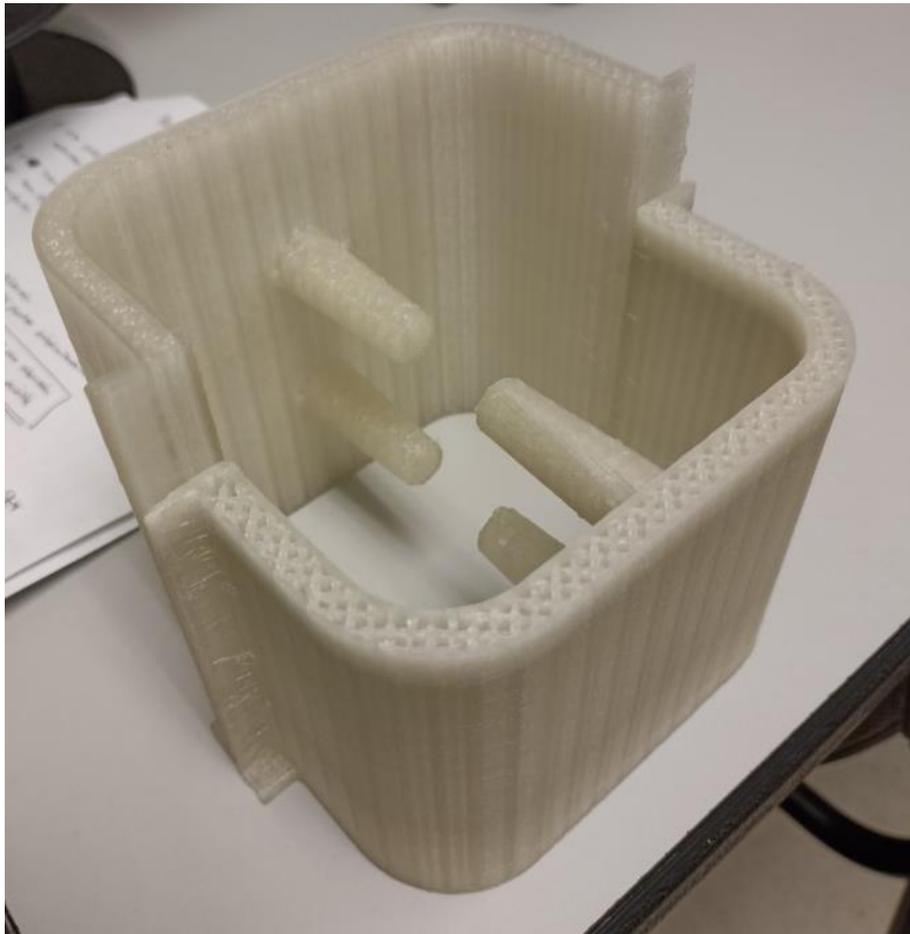


Figura 63: Molde

8.1.4 Composición de las mezclas

La primera de las mezclas, la de mortero, estaba compuesta por:

- Cemento III/B- 1800 gramos
- Caliza- 3600 gramos
- Agua- 961 gramos
- Superplastificante MasterSure 950- 15 gramos
- Fly ash- 900 gramos
- Caolín- 75 gramos

El fly ash es un polvo de partículas esféricas de menos de 50 micras, que funciona como plastificante del mortero. Además, mejora la trabajabilidad de la mezcla, disminuye la permeabilidad, produce un menor consumo de agua y aumenta la resistencia a la flexión y compresión (ArchiExpo., s.f.).

El caolín recibe el nombre de arcilla blanca, y es una tierra con abundancia de caolita (mineral perteneciente a los silicatos) (Arteologic, s.f.).

La relación agua-cemento de esta mezcla es de 0,36. Una mezcla con una relación de agua-cemento como ésta, produce que sea un material de alta resistencia y permeabilidad muy baja.

La segunda de las mezclas estaba compuesta por:

- Carbonato de sodio- 44,2 gramos
- Escoria de alto horno- 441,7 gramos
- Agua- 375,5 gramos
- Caliza- 1338,6 gramos

8.1.5 ENSAYOS

Llegados a este punto, lo siguiente a realizar sería el moldeado.

Ensayo 1

El primer moldeo fue resultado de la mezcla de mortero con cemento, utilizando el aceite mineral como desencofrante.

Para la sujeción de las dos paredes del molde se utilizaron dos sargentos que apretaban las pestañas impresas en las paredes con este fin, como se ve en la Figura 64.



Figura 64: Sujeción de las paredes del molde

En este momento, se preparó la mezcla y se comenzó a verter en el interior del molde. Durante el llenado, no se utilizó ninguna máquina vibradora, ya que no se consideró necesario. En su defecto se utilizó una herramienta manual, con la que únicamente se movía la mezcla para que se rellenara por completo el hueco y se favoreciera la salida del aire. En la Figura 65 pueden verse varios momentos del llenado del molde.



Figura 65: Proceso de llenado del molde

Se dejó secando la mezcla durante 24 horas (tiempo suficiente), para después realizar el desmoldeo. En la Figura 66 se ve el molde con la mezcla ya fraguada.



Figura 66: Mortero completamente fraguado

Este proceso fue bastante arduo y sorprendente, ya que se esperaba un desmoldeo más sencillo de lo que al final fue.

En un primer momento se trató de separar las paredes manualmente, tirando de ambas hacia fuera. Es importante tener en cuenta que hay que realizar el empuje de las paredes de manera que éstas se separen paralelas a la pieza, para que salga el macho perpendicular a la pieza. De no ser así y realizar empujes laterales u oblicuos, el macho se podría partir.

Para el desmoldeo se utilizaron varias espátulas para hacer palanca entre las dos paredes del molde, mecanismo a través del cual se consiguió progresivamente separar el molde de la pieza. La zona más complicada fue la superficie de contacto entre los machos y la pieza.

Sin embargo, debido a la fuerza utilizada, la pieza sufrió en exceso, llegando incluso a perder partes. Véase la Figura 67 y la Figura 68.



Figura 67: Desmoldeo de la primera pared



Figura 68: Pieza obtenida

Una vez finalizado el desmoldeo se pudo comprobar que el motivo por el cual hubo tantas complicaciones fue la elevada rugosidad superficial de los machos. Esta característica resulta

en una gran adherencia al mortero, debido a que éste fragua sobre las crestas de la superficie de los machos, como se ve en la Figura 69.



Figura 69: Adherencia del mortero y los machos

En este caso, puede concluirse que el aceite mineral no ha funcionado como se esperaba. Pese a esto, el acabado de la superficie de la pieza de mortero ha sido bueno, Figura 70. Además, se ha podido comprobar que el molde es resistente, ya que ha sido necesario aplicar esfuerzos grandes sobre el molde para conseguir la separación de las paredes, y este no ha sufrido ningún daño, Figura 71.



Figura 70: Acabado superficial de la pieza



Figura 71: Molde tras el primer desmoldeo.

Una manera más sencilla para desmoldar podría haber sido dejar más de 24 horas secando la mezcla, ya que cuanto más seco se encuentre al realizar el desmoldeo más contraído se encuentra el material, favoreciendo así la separación.

Ensayo 2

El segundo moldeo se realizó de la misma manera que el primero, pero con la mezcla de geopolímero y con vaselina como desencofrante.

Una de las primeras diferencias encontradas entre esta segunda mezcla y la primera es el color, siendo la segunda bastante más clara, Figura 72. El tiempo que se dejó secando esta mezcla fue de 4 días.



Figura 72: Moldeo 2.

En este caso, el resultado obtenido durante el desmoldeo fue sorprendente. Se esperaba que esta mezcla fuera muy complicada de desmoldar por experiencias previas con ella, pero resultó más fácil que con el primer caso. Esto sirvió para comprobar que la vaselina es mejor desencofrante que el aceite mineral.

Al igual que con el primer caso, fue necesario dar algún pequeño golpe y hacer palanca por ambos lados del molde para conseguir que salieran ambas paredes. De la misma manera,

las partes que fue más complicado de separar fueron los machos, pero fue más sencillo que en el ensayo 1.

El resultado obtenido fue una pieza completa, sin ningún tipo de fractura (Figura 73 y Figura 74) y con alguna tonalidad verde en alguna de sus partes. Esta coloración se debe a alguno de los componentes de la mezcla, que en contacto con el agua reacciona y produce este color. Conforme van secando estas zonas este color se va reduciendo.



Figura 73: Pieza 2 desmoldada (1).



Figura 74: Pieza 2 desmoldada (2).

Una vez finalizado el desmoldeo, se pudieron apreciar los primeros defectos sobre el molde. Como se puede ver en la Figura 75, la pestaña que se utilizaba para sujetar las paredes presentaba una zona donde se había partido.



Figura 75: Primeros defectos sobre el molde

Dicha pestaña (la cual tenía un espesor de 4 milímetros) es la parte donde se amarran los sargentos para evitar el movimiento de las paredes cuando se vierte el mortero y éste fragua.

El motivo de la rotura fue una mala colocación de los sargentos (excesivo apriete de uno de ellos). Esta colocación resultaba un poco complicada debido a que la parte de los sargentos que apretaba la pestaña podía rotar y no realizar el apriete en la dirección deseada, sino que realizaba un empuje lateral, produciendo que la pestaña no agarrara bien y se soltara. Por este motivo y para tratar de evitarlo, es posible que se diera un par de apriete mayor al necesario.

Pese a esta rotura, se pudo continuar usando el molde.

Ensayo 3

El tercer moldeo se realizó de la misma manera que los dos previos, pero con la mezcla de mortero con cemento (al igual que el primero) y con vaselina como desmoldante. Como con el primero, se dejó fraguando durante 24 horas.

Una vez transcurrido este tiempo, se procedió a desmoldarlo.

Al quitar las sujeciones de las paredes se apreció cómo éstas estaban más sueltas que en los casos anteriores. Esta vez, al realizar un pequeño empuje de una de las paredes hacía fuera se consiguió que saliera, y de la misma manera, se logró con la segunda. En este caso, se comprobó que la mezcla de mortero con cemento con vaselina se puede desmoldar de manera muy sencilla sin realizar apenas esfuerzos.

La pieza obtenida en este tercer ensayo (Figura 76) salió en perfecto estado, con sus cuatro cavidades limpias y sin roturas.

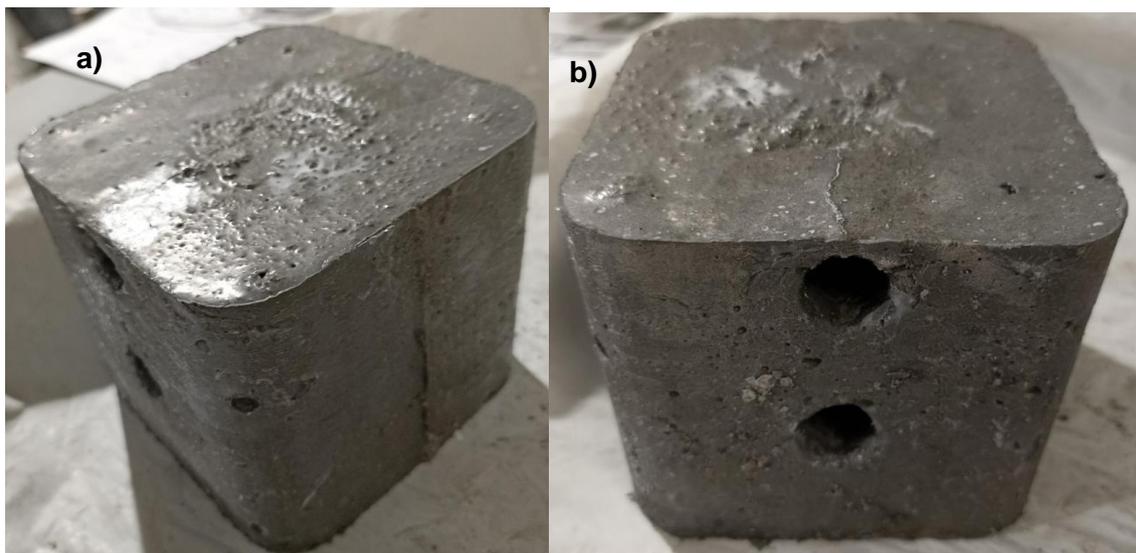


Figura 76: Pieza 3 desmoldada, a) Vista 1, b) Vista 2.

8.1.6 CONCLUSIONES

En la Figura 77, se pueden ver las tres piezas obtenidas durante estos ensayos, siendo la marcada como 1 la realizada con mortero con cemento (y aceite mineral como desmoldante); la 2, la de geopolímero y la tercera, la de mortero con cemento (pero con vaselina como desmoldante). En esta imagen se puede apreciar que cuanto más fácil ha

sido el desmoldeo (3,2 y 1 de más fácil a menos) en mejor estado se obtuvo la pieza y menos defectos presenta.

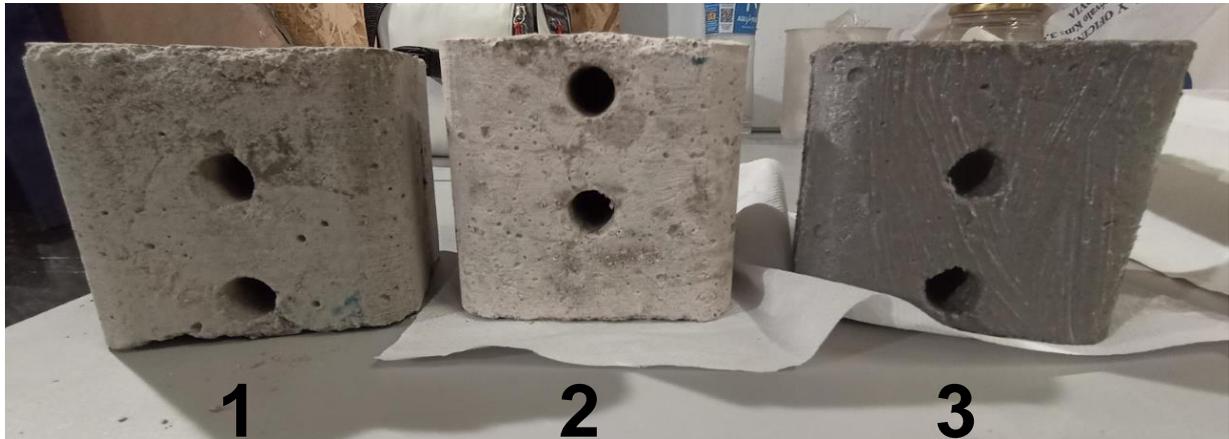


Figura 77: Imagen de las tres piezas fabricadas.

Finalmente, el molde presenta una pequeña fractura, la ya comentada anteriormente, siendo el único desperfecto. En la Figura 78 se puede ver cómo quedó una de las paredes tras los tres procesos de moldeo. También, se comprobó que el uso de este tipo de material es compatible con el uso del mortero, ya que éste no resulta abrasivo para el molde.



Figura 78: Aspecto final del molde

La realización de este ensayo ha permitido comprobar que la vaselina funciona como desencofrante y que cumple con las necesidades. En cambio, se comprobó que el aceite mineral no es tan eficaz.

También, ha servido para ver que uno de los posibles problemas es que en zonas con mal acabado superficial; zonas del molde donde se presenten grandes rugosidades; es decir, huellas perpendiculares al plano que está en contacto con el mortero, éste fragua entre las huellas, produciendo que el desencofrado sea mucho más complicado. Esto puede verse en la Figura 79, imagen del molde una vez desencofrado, donde se aprecia cómo el mortero se ha introducido en las huellas.



Figura 79: Macho del molde con restos de mortero

Como se ha comprobado con estos ensayos, la vaselina suaviza este problema, ya que es un desencofrante que crea una película sobre el molde, evitando que el mortero penetre en estos huecos.

En caso de necesitar un mayor suavizado de las paredes del molde, existen otros métodos que podrían resultar útiles:

- Lijado con lija muy fina para reducir la altura de estas huellas y que menos mortero penetre en ellas. Para ello, lo primero que debería realizarse es una inspección visual

de las paredes internas del molde, para poder localizar estos puntos que podrían suponer un problema y así trabajar sobre ellos.

- Uso de productos químicos, que funcionan como disolventes, aunque no es la manera más adecuada ya que podría ser que se dañara el molde con su uso.
- Con resina epoxi. Esto consiste en la aplicación de una o varias capas finas de este compuesto, en función de lo que se considere oportuno o necesario. Esta resina rellenará las huellas que queden entre las diferentes capas o cualquier otro hueco que pueda haber (Alfonso, 2021).

Como ya se ha comentado anteriormente, estas son posibles soluciones, en caso de que con el desencofrante no fuera suficiente, considerando como mejor opción la del lijado.

9 CONCLUSIONES

Finalmente, la geometría seleccionada ha sido la del Molde E (6 centímetros de espesor), ya que es la que, en combinación de un 10% de densidad de relleno, cumple con los requisitos de forma óptima en función de los parámetros escogidos (tensión, deformación, tiempo de impresión y cantidad de material).

El factor de seguridad mínimo del molde tiene un valor de 2,7, lo que significa que la diferencia entre el límite admisible y las tensiones que soporta el molde durante el proceso de moldeo es grande. Dado que para realizar el modelo y la simulación se realiza alguna aproximación, los resultados obtenidos también lo son. Por ello es importante contar con un margen que permita una pequeña variación de los resultados (debido a las aproximaciones, pequeños errores de cálculo o propios errores inherentes en la formulación del MEF) sin que suponga la rotura del molde. Además, este margen también resulta importante por tratarse del primer diseño realizado del molde y por ser una primera aproximación a este tipo de fabricación (creación de piezas a través de moldeo o encofrado de mortero, con moldes fabricados a partir de la impresión 3D, siendo en este caso de PLA).

También se considera que hay posibilidades de mejora y mayor optimización del molde, que no se han llevado a cabo por no conocer con exactitud como será el desencofrado (a pesar de que el ensayo realizado haya arrojado buenos resultados). Una de las posibles mejoras puede ser la reducción de material en zonas donde se vayan a producir bajas tensiones (parte superior de las paredes). También podría ser crear paredes de espesor variable, del mismo modo que las presas hidráulicas, o el diseño de machos independientes, es decir que sean construidos por separado de las paredes.

El trabajo desarrollado en este Trabajo Fin de Grado se considera un buen punto de partida para seguir desarrollando este tipo de encofrados de plástico mediante impresión 3D, así como seguir mejorando y optimizando los modelos de elementos finitos.

El desarrollo de este proyecto ha sido complicado especialmente por la falta de datos y experiencias previas de este uso tan concreto de la impresión 3D (creación de moldes con formas complejas, reutilizables), pero ha servido para comprobar que se trata de un método de fabricación válido y con gran visión de futuro.

A partir de este momento, podría comenzar a llevarse a la práctica el diseño creado y a realizarse el moldeo de arrecifes artificiales de mortero con este molde, con el objetivo de

poder mejorar el diseño, gracias a los datos que se obtengan durante los ensayos llevados a cabo.

10 REFERENCIAS

- Centro Estudios Cervantinos*. (2019). Obtenido de Presión Hidrostática: ¿Qué es y cómo se calcula?: <https://www.centroestudioscervantinos.es/presion-hidrostatica/>
- 3Dfils*. . (s.f.). Obtenido de esFil PLA 850 Pellets. : <https://www.3dfils.com/es/pellets-impresion-3d/pellets-PLA.html>
- 3dmingda.com*. (s.f.). Obtenido de MD-1000Pro: <https://www.3dmingda.com/>.
<https://www.3dmingda.com/md-1000pro>
- Adeva, R. (24 de Noviembre de 2022). *ADSLZone*. Obtenido de Todo lo que debes saber sobre la impresión 3D y sus utilidades: <https://www.adslzone.net/reportajes/tecnologia/impresion-3d/>
- Adrian I. Yoris-Nobile, Carlos J. Slebi-Acevedo, Esther Lizasoain-Arteaga, Irune Indacoechea-Vega, Elena Blanco-Fernandez, Daniel Castro-Fresno, Alejandro Alonso-Estebanez , Sara Alonso-Cañon , Carlos Real-Gutierrez , Fouad Boukhelf, Mohamed Boutouil . (2022). Artificial reefs built by 3D printing: Systematisation in the design, material selection and fabrication. *ELSEVIER*, 17.
- Alfonso, M. (23 de Mayo de 2021). *Bitfab*. Obtenido de ¿Cómo alisar PLA? 4 técnicas y trucos: <https://bitfab.io/es/blog/alisar-pla/>
- Alicia, M. (4 de Agosto de 2022). *3Dnatives*. Obtenido de PLA vs ABS, ¿qué material de impresión 3D elegir?: <https://www.3dnatives.com/es/pla-abs-material-impresion-3d-080820222/>
- ALL3DP. (16 de Febrero de 2022). *Tipos de impresoras 3D: las 7 tecnologías de impresión 3D*. Obtenido de <https://all3dp.com/es/1/tipos-de-impresoras-3d-tecnologia-de-impresion-3d/>
- Andrei Jipa, Lex Reiter, Robert J. Flatt, Benjamin Dillenburger. (2022). Environmental stress cracking of 3D-printed polymers exposed to concrete. *Additive Manufacturing* 58 (2022), 19.
- Anellides*. (06 de Junio de 2020). Obtenido de ¿Cuál es la importancia de los océanos?: <https://anellides.com/es/blog/quina-es-limportancia-dels-oceans/>

ArchiExpo. (s.f.). Obtenido de FLY ASH: CONCRETE APPLICATIONS - Aditivo para hormigón by Lafarge: <https://www.archiexpo.es/prod/lafarge/product-59609-1470641.html>

Arteologic. (s.f.). Obtenido de Caolín: TODO sobre esta beneficiosa arcilla blanca: <https://arteologic.com/ceramica/materiales-ceramica/caolin/>

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN [UNE], 2022. (s.f.). *ENCOFRADOS; DISEÑO GENERAL, REQUISITOS DE COMPORTAMIENTO Y VERIFICACIONES (UNE 180201)*.

AUTOMOTRIZ., I. Y. (2 de Marzo de 2020). *INGENIERÍA Y MECÁNICA AUTOMOTRIZ.* . Obtenido de ¿Qué es un material Isotrópico, Anisotrópico y Ortotrópico? : <https://www.ingenieriaymecanicaautomotriz.com/que-es-un-material-isotropico-anisotropico-y-ortotropico/>

Bitfab. . (2019). Obtenido de Las partes de una impresora 3D ¿Qué componentes elegir? : <https://bitfab.io/es/blog/partes-impresora-3d/>

CPI-Worldwide.com. . (s.f.). Obtenido de Moldes de encofrado creados con impresora 3D |: <https://www.cpi-worldwide.com/es/journals/artikel/56074>

Definicion.de. (s.f.). Obtenido de Definición de presión hidrostática: <https://definicion.de/presion-hidrostatica/>

El constructor civil. (6 de Diciembre de 2011). Obtenido de Encofrados: Deslizantes y tipo túnel. : <https://www.elconstructorcivil.com/2011/12/encofrados-deslizantes-y-tipo-tunel.html>

Equiposdetrabajoenaltura. (2019). Obtenido de <https://equiposdetrabajoenaltura.lineaprevencion.com/equipos-de-trabajo/encofrados/descripcion-general-y-aplicaciones-2/encofrados-verticales>

Espinosa, A. (2 de Mayo de 2019). *TRESDE.* Obtenido de ¿Pensando en comprar una impresora 3D?: Esto es lo que debes saber antes de tomar una decisión. : <https://tresde.pe/pensando-en-comprar-una-impresora-3d-esto-es-lo-que-debes-saber-antes-de-tomar-una-decision/>

ESSS. (2022). Obtenido de Simulación Ansys: ingeniería para lo que está por venir:
<https://www.esss.co/es/ansys-simulacion-computacional/>

Eurobots News. (02 de Octubre de 2021). Obtenido de LA IMPRESIÓN 3D CON BRAZO
ROBÓTICO: <https://www.eurobots.es/news/la-impresion-3d-con-brazo-robotico/>

Fernández Roldán, L. (08 de Julio de 2021). *Qué es un arrecife de coral*. Obtenido de
ecologiaverde.com: <https://www.ecologiaverde.com/que-es-un-arrecife-de-coral-3486.html>

Formlabs. (s.f.). Obtenido de Cómo elegir una impresora 3D de gran formato.:
<https://formlabs.com/es/blog/como-elegir-impresora-3d-gran-formato/>

Formlabs. (s.f.). *Validación de la isotropía en la impresión 3D por estereolitografía (SLA)*. .
Obtenido de <https://formlabs.com/es/blog/isotropia-impresion-3D-estereolitografia-sla/>

Freepik. (29 de Noviembre de 2021). *Vertido de hormigón en encofrado de madera de la base*.
Obtenido de https://www.freepik.es/fotos-premium/vertido-hormigon-encofrado-madera-base_20861082.htm

H. Gonabadi & A. Yadav & S. J. Bull. (2020). The effect of processing parameters on the
mechanical characteristics of PLA produced by a 3D FFF printer. *The International
Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 15.

Hassan Gonabadi, Yao Chen, Arti Yadav, Steve Bull. (2021). Investigation of the effect of
raster angle, build orientation, and infill density on the elastic response of 3D printed
parts using finite element microstructural modeling and homogenization techniques.
The International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2022), 26.

impresoras3d.com. (11 de Octubre de 2022). *Impresora 3D Creality Ender 3*. Obtenido de
<https://www.impresoras3d.com/producto/impresora-3d-creality-ender-3/>

impresoras3d.com. (11 de Enero de 2019). *Perfecciona tus impresiones 3D*. Obtenido de
<https://www.impresoras3d.com/perfecciona-tus-impresiones-3d/>

impresoras3d.com. (30 de Septiembre de 2022). *Tipos de impresoras 3D*. Obtenido de
<https://www.impresoras3d.com/tipos-de-impresoras-3d/>

Inboundcycle, I. (11 de Noviembre de 2021). *BCN3D Technologies*. . Obtenido de Tipos de impresoras 3D y técnicas de impresión: una rápida visión en conjunto: <https://www.bcn3d.com/es/tipos-de-impresoras-3d-y-tecnicas-de-impresion-una-rapida-vision-en-conjunto/>

Jipa, A. (14 de Noviembre de 2017). *Digital Building Technology*. Obtenido de SkelETHon wins 1st Prize for Design Innovation at the 16th Concrete Canoe Regatta in Germany.: <https://dbt.arch.ethz.ch/skelethon-3d-printed-boat-wins-1st-prize-design-innovation-26th-concrete-canoe-regatta-germany/>

Kraljevich, F. (12 de Septiembre de 2020). *Encofrados impresos en 3D: Una innovación para las formas del hormigón. Hormigón al Día*. Obtenido de <https://hormigonaldia.ich.cl/smartconcrete/encofrados-impresos-en-3d-una-innovacion-para-las-formas-del-hormigon/>

Kraljevich, F. (15 de Mayo de 2021). *hormigonaldia.ich*. Obtenido de Revelan nuevo tipo de encofrado impreso en 3D para prefabricados de hormigón. Hormigón al Día.: <https://hormigonaldia.ich.cl/smartconcrete/revelan-nuevo-tipo-de-encofrado-impreso-en-3d-para-prefabricados-de-hormigon/>

Maria Jose R. (13 de Octubre de 2022). *3Dnatives*. Obtenido de ¿Cuáles son las máquinas con brazo robótico que existen en el mercado?: <https://www.3dnatives.com/es/ranking-brazos-roboticos-131020222/>

Marta, G. (13 de Junio de 2022). *3Dnatives*. Obtenido de ¿Qué es Autodesk Inventor y cuáles son sus características principales?: <https://www.3dnatives.com/es/que-es-autodesk-inventor-130620222/>

Modix3D. (s.f.). *BIG-Meter*. Obtenido de <https://www.modix3d.com/es/big-meter/>

nysplm.com. (s.f.). Obtenido de Ansys Software de Simulación : <https://www.nysplm.com/ansys/>

peri.es. (s.f.). Obtenido de Auditorio de Tenerife: <https://www.peri.es/proyectos/cultural-buildings/auditorio-de-tenerife.html>

RE:3D. (s.f.). Obtenido de TERABOT 4: <https://re3d.org/portfolio/terabot/>

Redshift ES. . (28 de Agosto de 2019). Obtenido de Moldes impresos en 3D dan chispa a la fachada de hormigón de una antigua azucarera. : <https://redshift.autodesk.es/moldes-hormigon-3d/>

RevistasBolivianas. (s.f.). Bolivia:
http://www.revistasbolivianas.ciencia.bo/pdf/rtft/v12n18/v12n18_a06.pdf.

Servitec3D. (21 de Junio de 2022). *Tipos de impresoras 3D que existen y sus principales usos*. Obtenido de <https://servitec3d.com/blog/tipos-de-impresoras-3d/>

Shamloo, H. (10 de Mayo de 2021). *BigRep Industrial*. Obtenido de BigRep and Forward AM Expand Strategic Partnership with new Material, CONCRETE FORMWORK : <https://bigrep.com/posts/bigrep-and-forward-am-expand-strategic-partnership-with-new-m>

Shamloo, H. (s.f.). *BigRep Industrial 3D Printers*. Obtenido de BigRep ONE: La impresora 3D de gran formato para uso industrial.: <https://bigrep.com/es/bigrep-one/>

Soto, J. A. (4 de Mayo de 2021). *GEEKNETIC*. Obtenido de ¿Qué es una Impresora 3D y para qué sirve? - Definición. : <https://www.geeknetic.es/Impresora-3D/que-es-y-para-que-sirve>

Todo3D. (s.f.). *todo-3d.com*. Obtenido de <https://todo-3d.com/impresion-3d/?v=911e8753d716>

TRACTUS3D. (s.f.). Obtenido de Filamento de TPU - aprende todo sobre el material de TPU: <https://tractus3d.com/es/materials/tpu/>

Trapero, D. (s.f.). *Bitfab*. Obtenido de Todo sobre el PETG en impresión 3D: <https://bitfab.io/es/blog/petg-impresion-3d/>

UltiMaker Cura. (s.f.). Obtenido de Software de impresión 3D potente y fácil de usar: <https://ultimaker.com>. <https://ultimaker.com/es/software/ultimaker-cura>

UN Environment programme. (s.f.). Obtenido de El mundo perdió 14% de sus corales desde 2009 por aumento de temperatura de la superficie del mar: <https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/comunicado-de-prensa/el-mundo-perdio-14-de-sus-corales-desde-2009-por-aumento>

UNEP - UN Environment Programme. (s.f.). Obtenido de Status of Coral Reefs of the World 2020: <https://www.unep.org/resources/status-coral-reefs-world-2020>

United Nations Decade of Ocean Science for Sustainable Development. (s.f.). Obtenido de Fondo Mundial para los Arrecifes de Coral - Decenio de los Océanos: <https://oceandecade.org/es/actions/global-fund-for-coral-reefs/>

Universitat Politècnica de València - UPV. . (28 de Febrero de 2017). Obtenido de Factores que influyen en la presión del hormigón fresco: <https://www.youtube.com/watch?v=TcbghmeKGGk&list=PLgkQxpnpKsf1g4xoErHKj5BSsZvq57YYG&index=54>

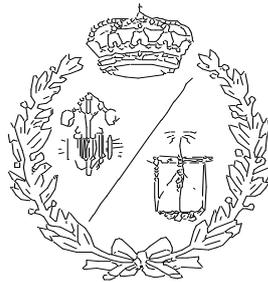
UPV., U. P. (28 de Febrero de 2017). Introducción a los encofrados y moldes. <https://www.youtube.com/watch?v=Gkb5jWOnBFk>. Valencia, España.

WASP. (s.f.). Obtenido de Big 3D printer | WASP 3MT HDP: <https://www.3dwasp.com/en/wasp-3mt-hdp-big-3d-printer/>

Yepes, V. (2017 de Marzo de 2017). *El blog de Víctor Yepes.* Obtenido de ¿Qué son y para qué sirven los encofrados?: <https://victoryepes.blogs.upv.es/2017/03/01/que-son-y-para-que-sirven-los-encofrados/>

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN**

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



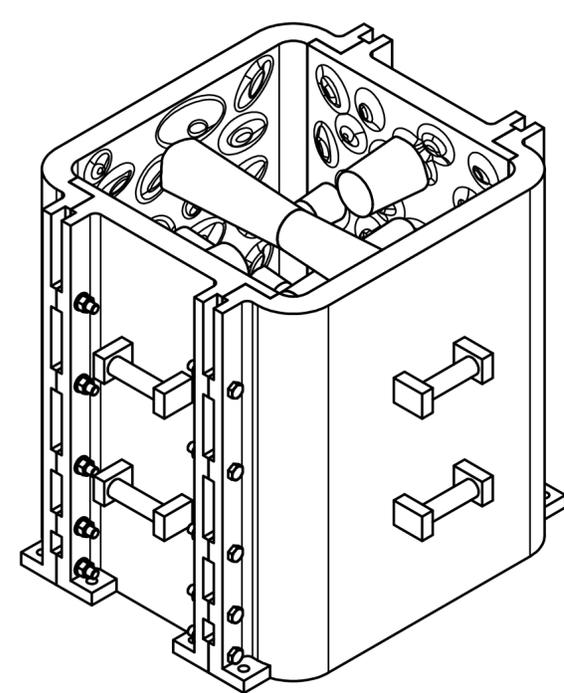
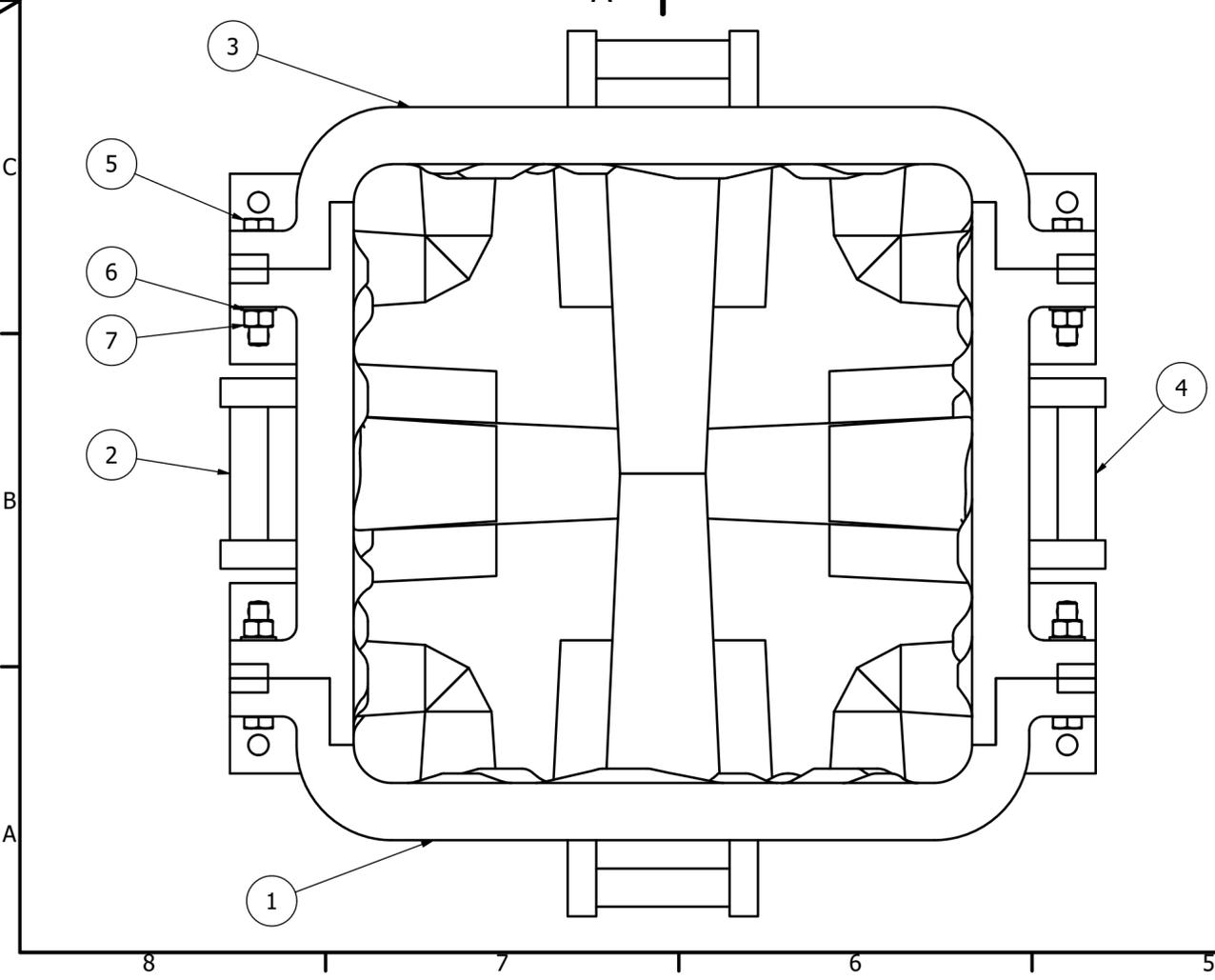
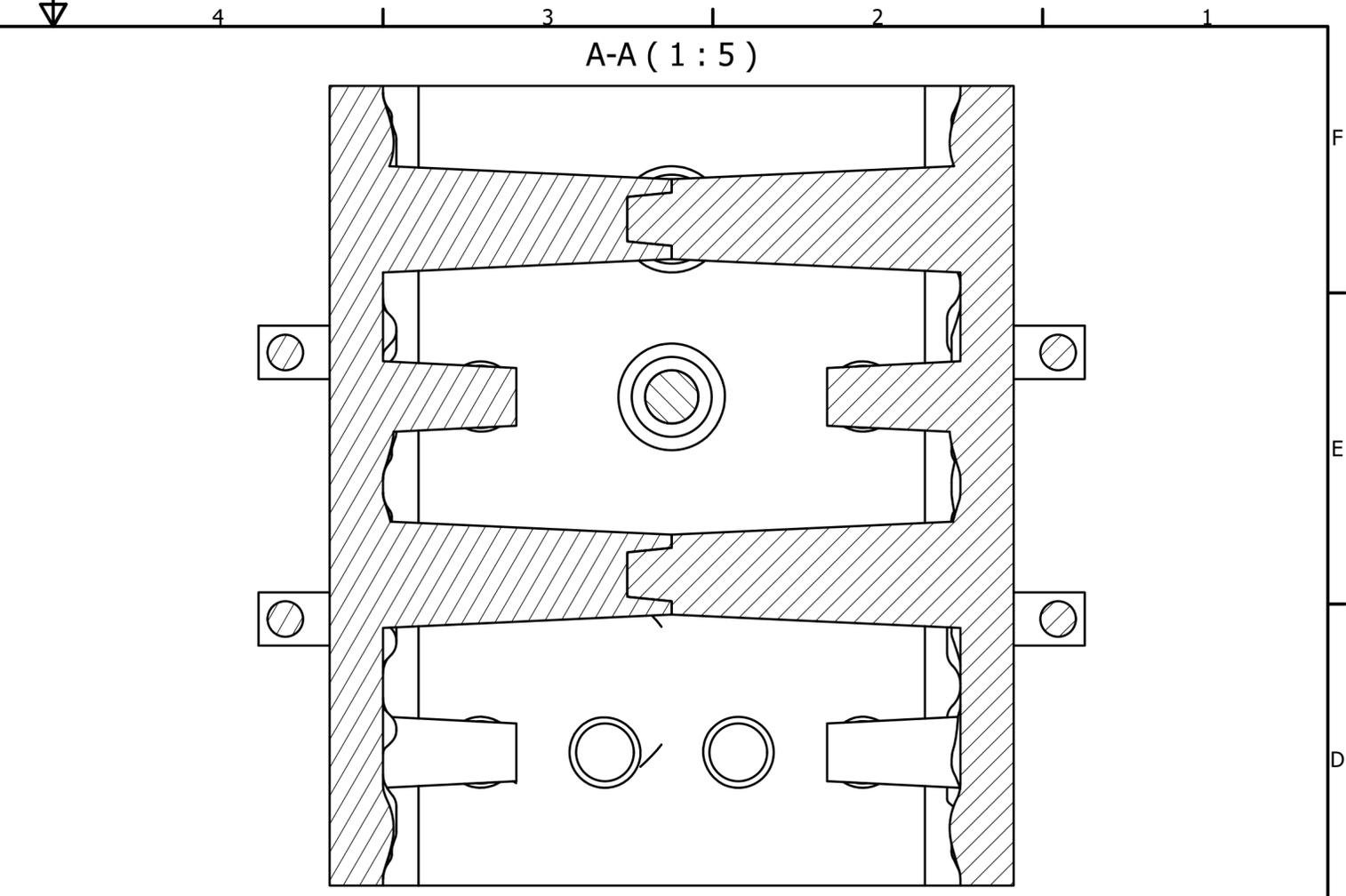
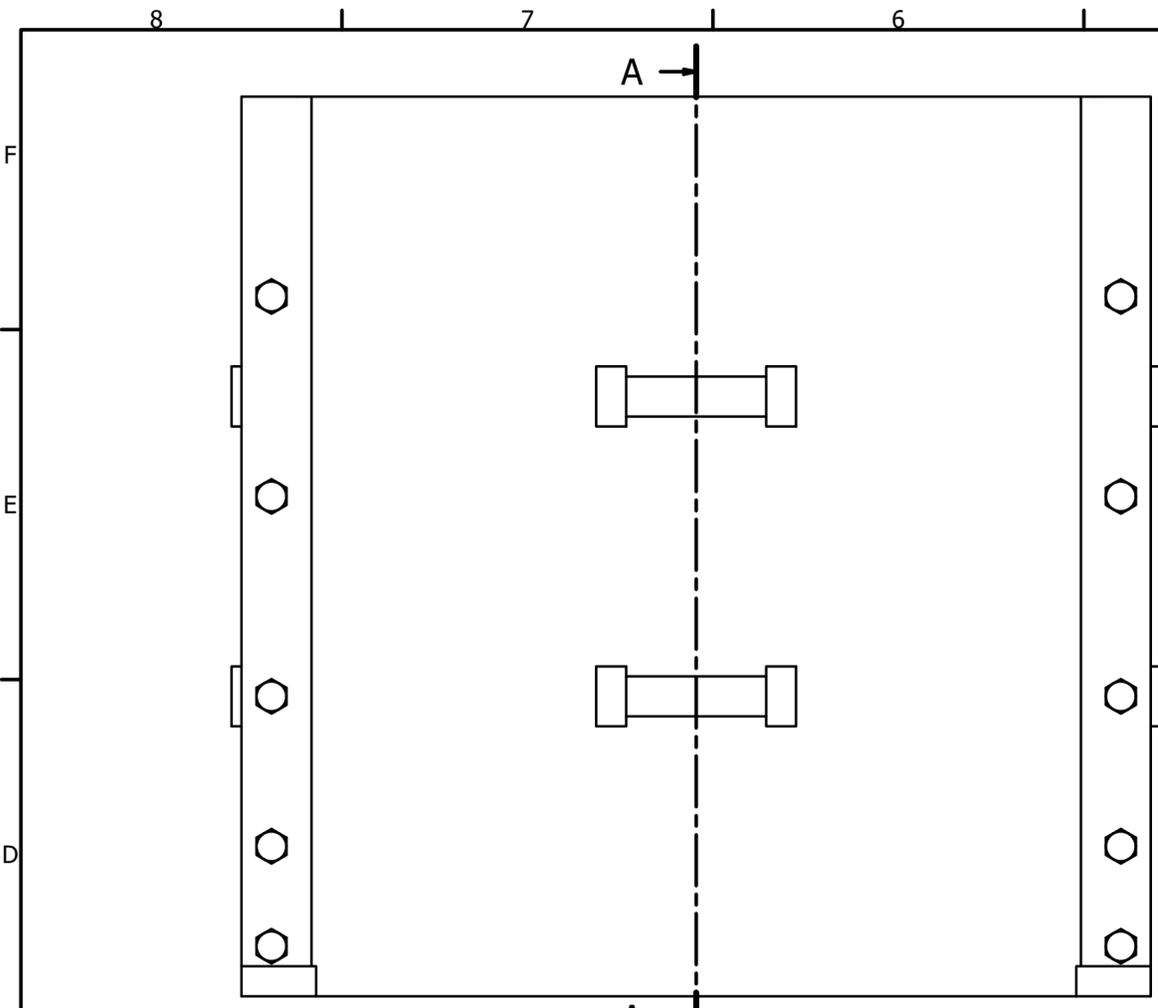
Proyecto Fin de Grado

DOCUMENTO II. PLANOS

**Autor: Mario Lozano Corona
Febrero – 2023**

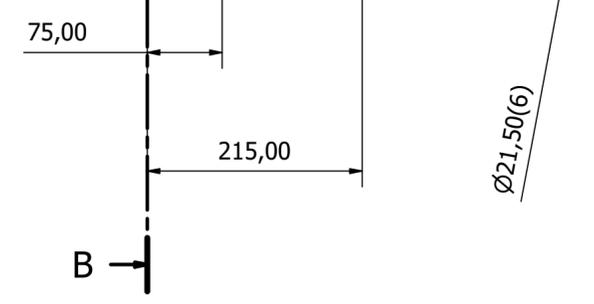
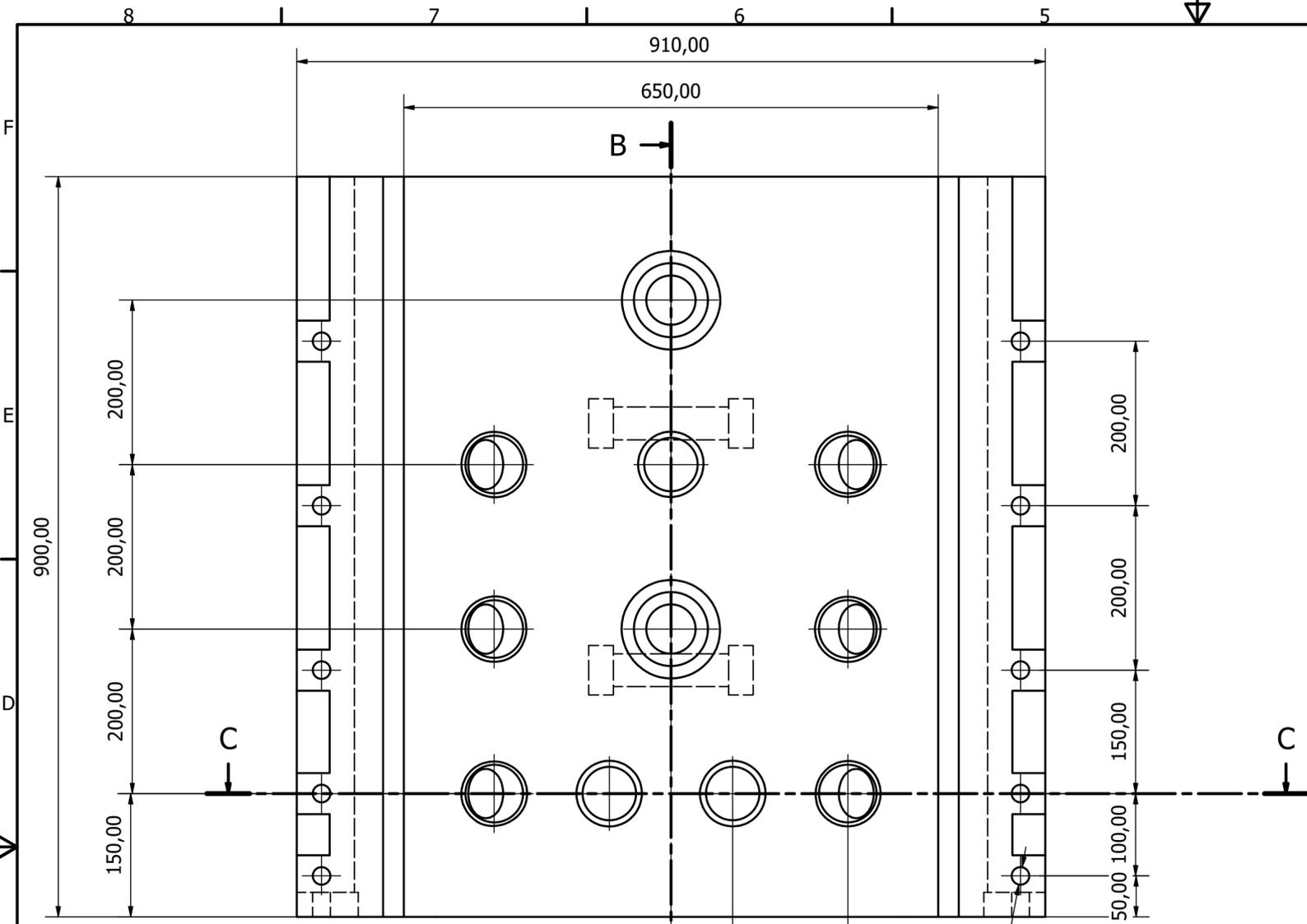
CONTENIDO

1 PLANOS MOLDE E.....	117
2 PLANOS MOLDE F.....	122
3 PLANOS MOLDE G.....	127
4 ACCESORIO REFUERZO	132

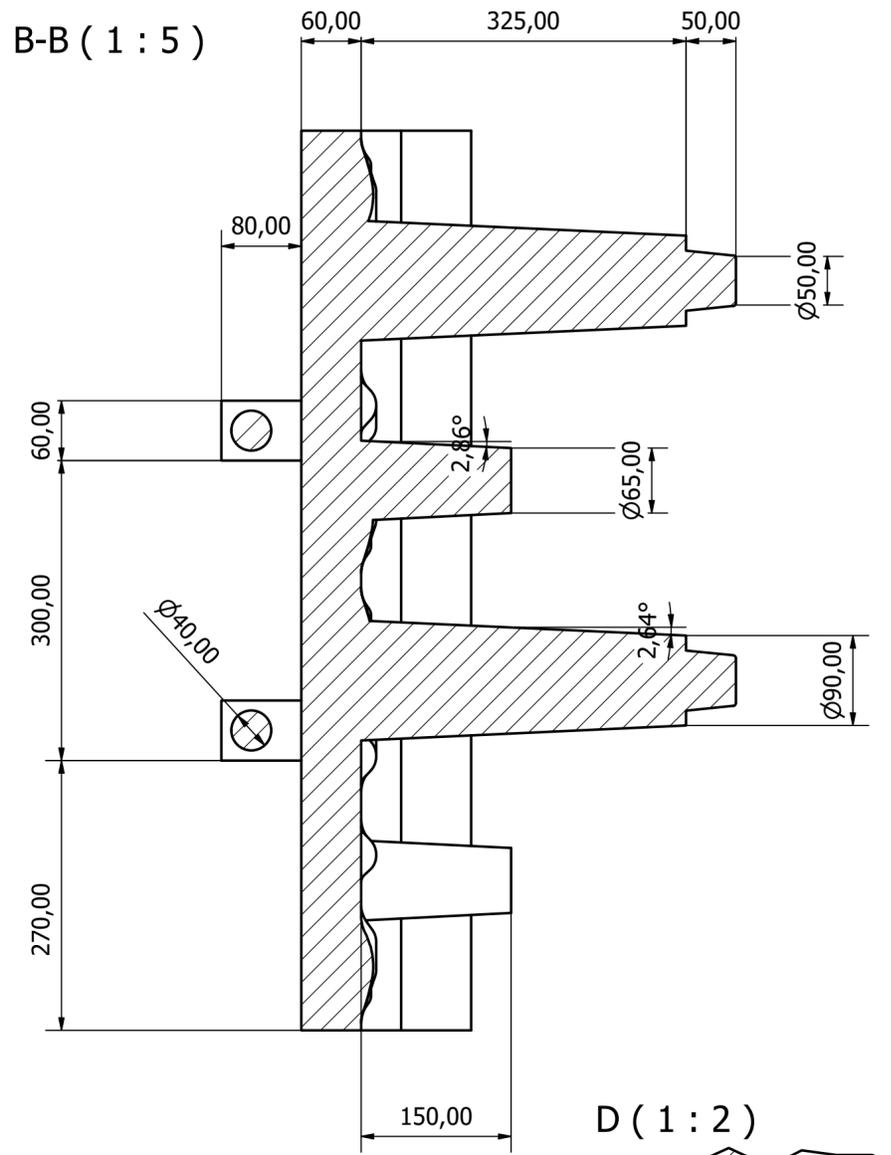


CANTIDAD	DENOMINACION	ELEMENTO	MATERIAL
20	ISO 4032 - M20	7	Acero inoxidable, 440C
20	ISO 7089 - 20	6	Acero inoxidable
20	ISO 4014 - M20 x 120	5	Acero inoxidable, 440C
1	Pared 4	4	PLA
1	Pared 3	3	PLA
1	Pared 2	2	PLA
1	Pared 1	1	PLA

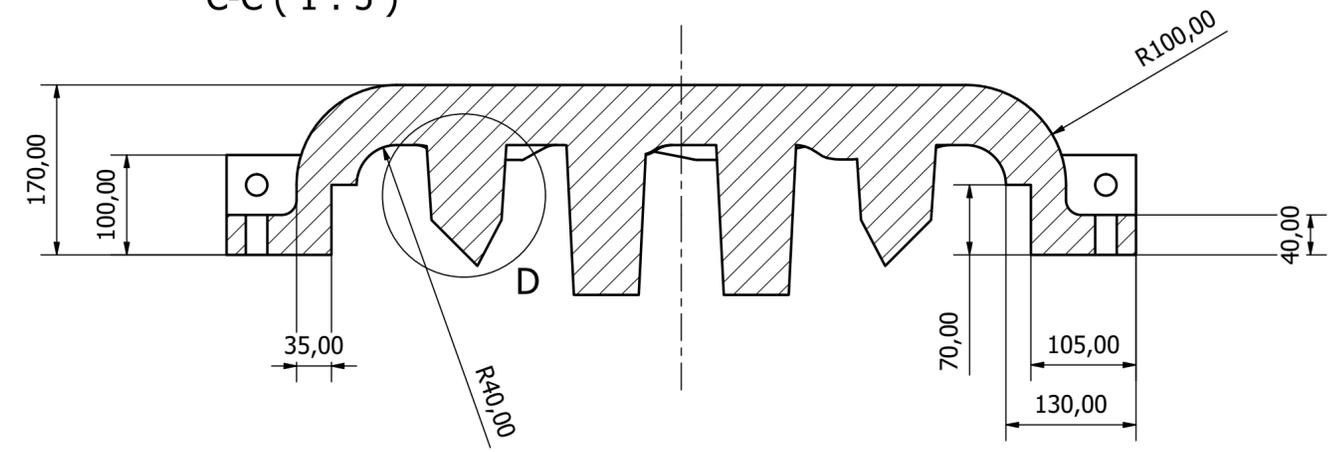
DISEÑADO POR	MARIO LOZANO CORONA	UNIVERSIDAD DE CANTABRIA	
REVISADO POR			
APROBADO POR			
MOLDE E		FIRMA	FECHA 09/12/2022
PLANO DE CONJUNTO		ESCALA 1:5	HOJA 1/5



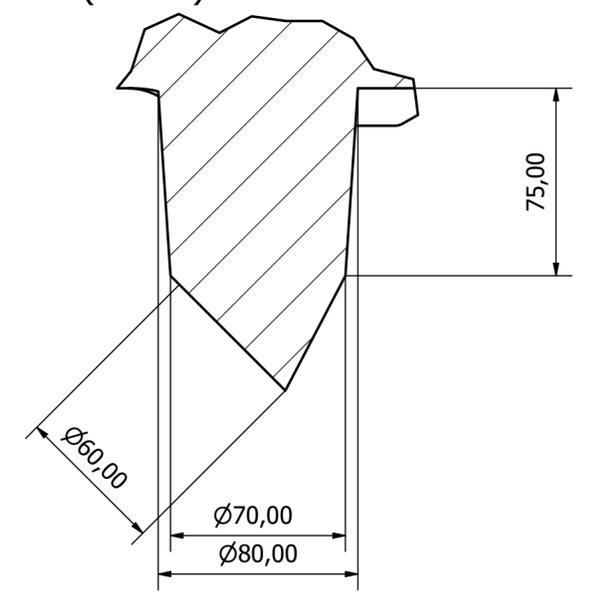
B-B (1 : 5)



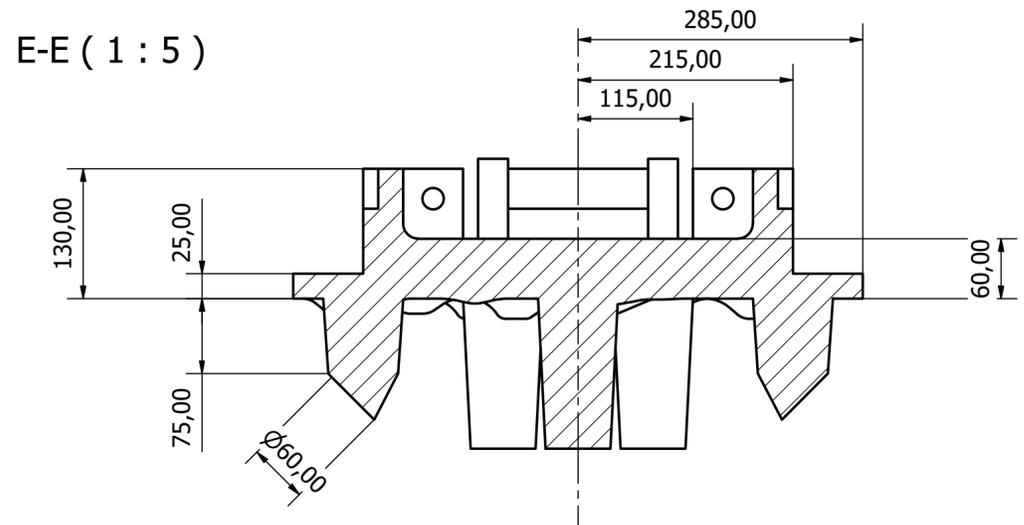
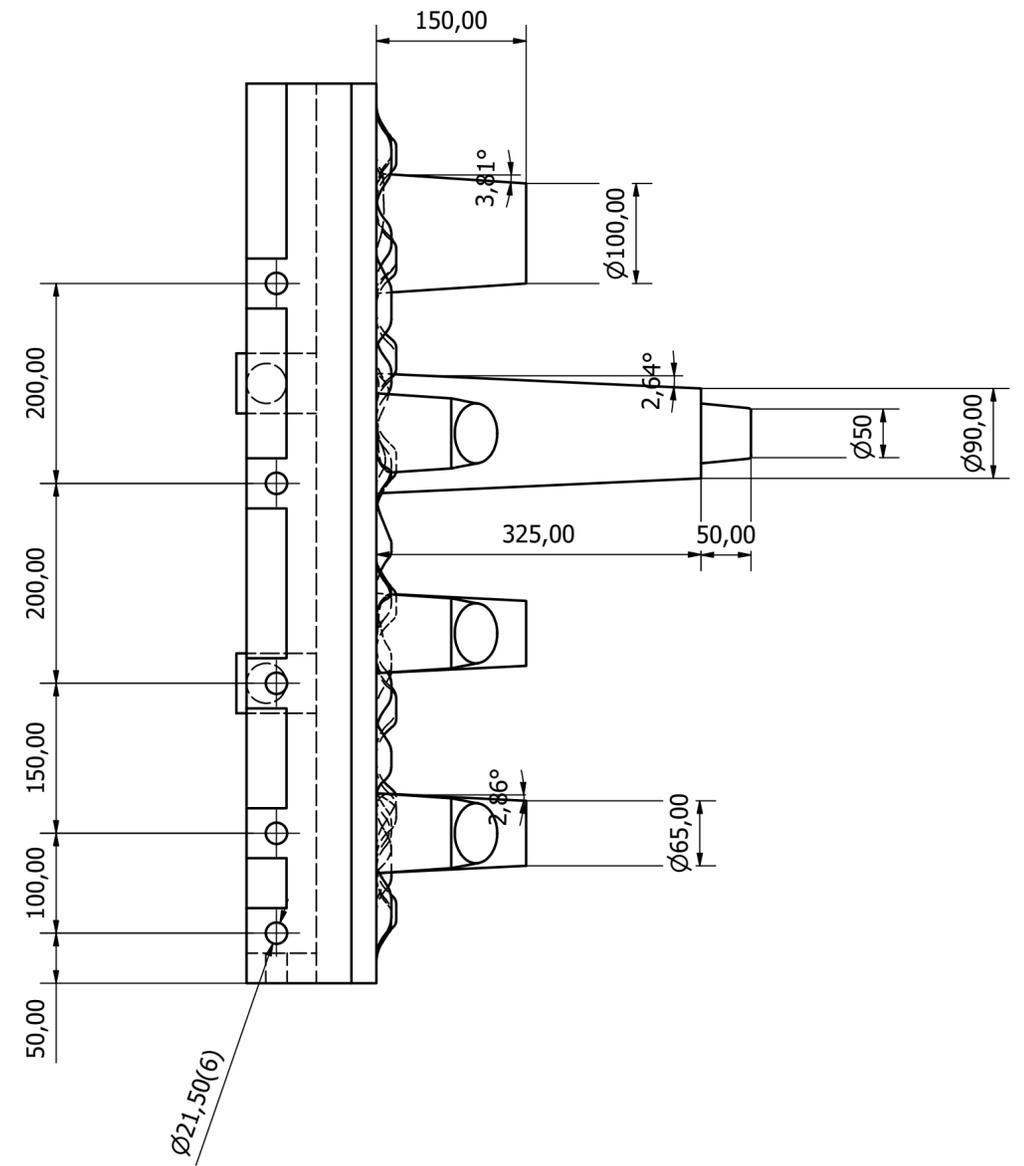
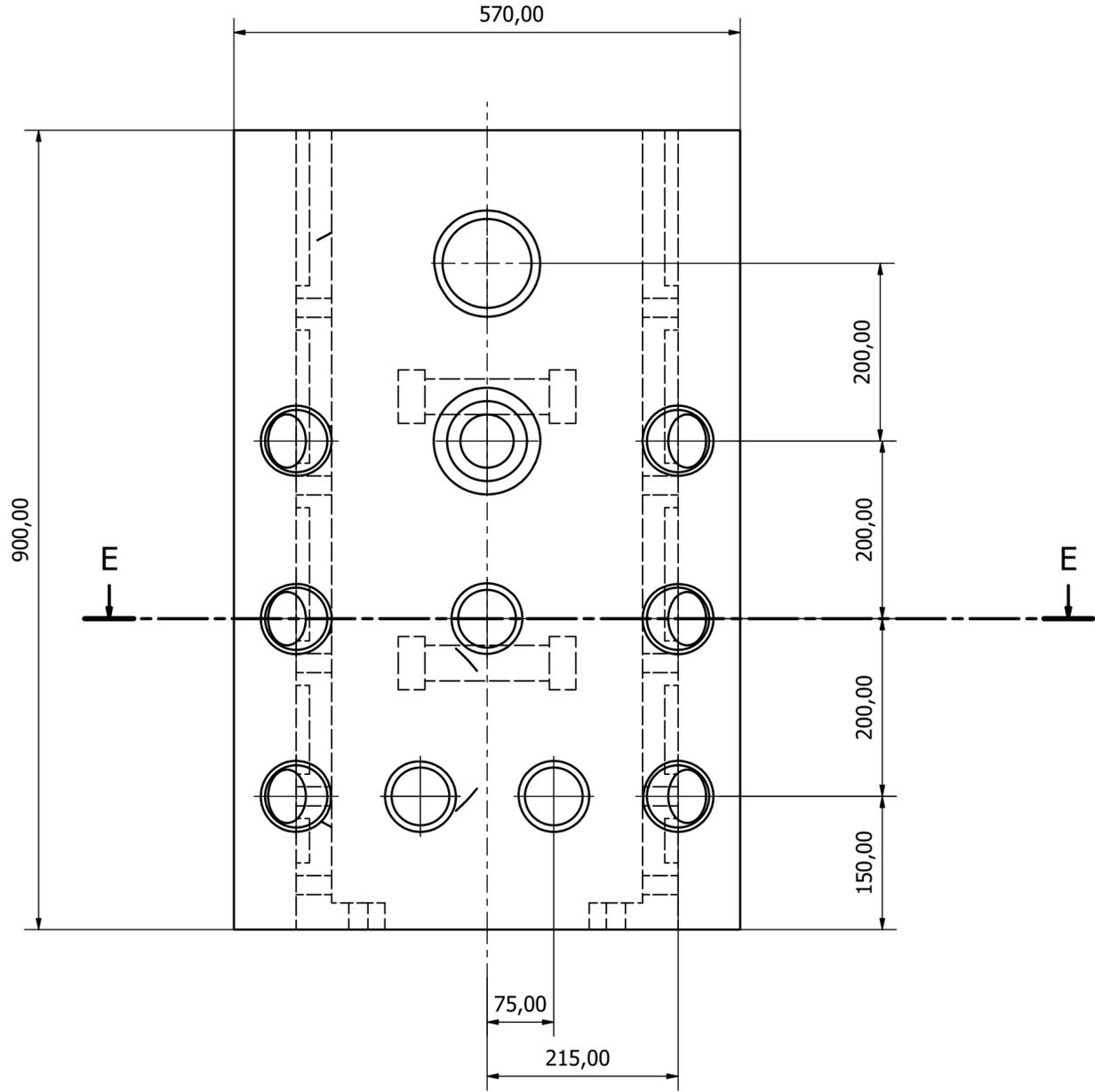
C-C (1 : 5)



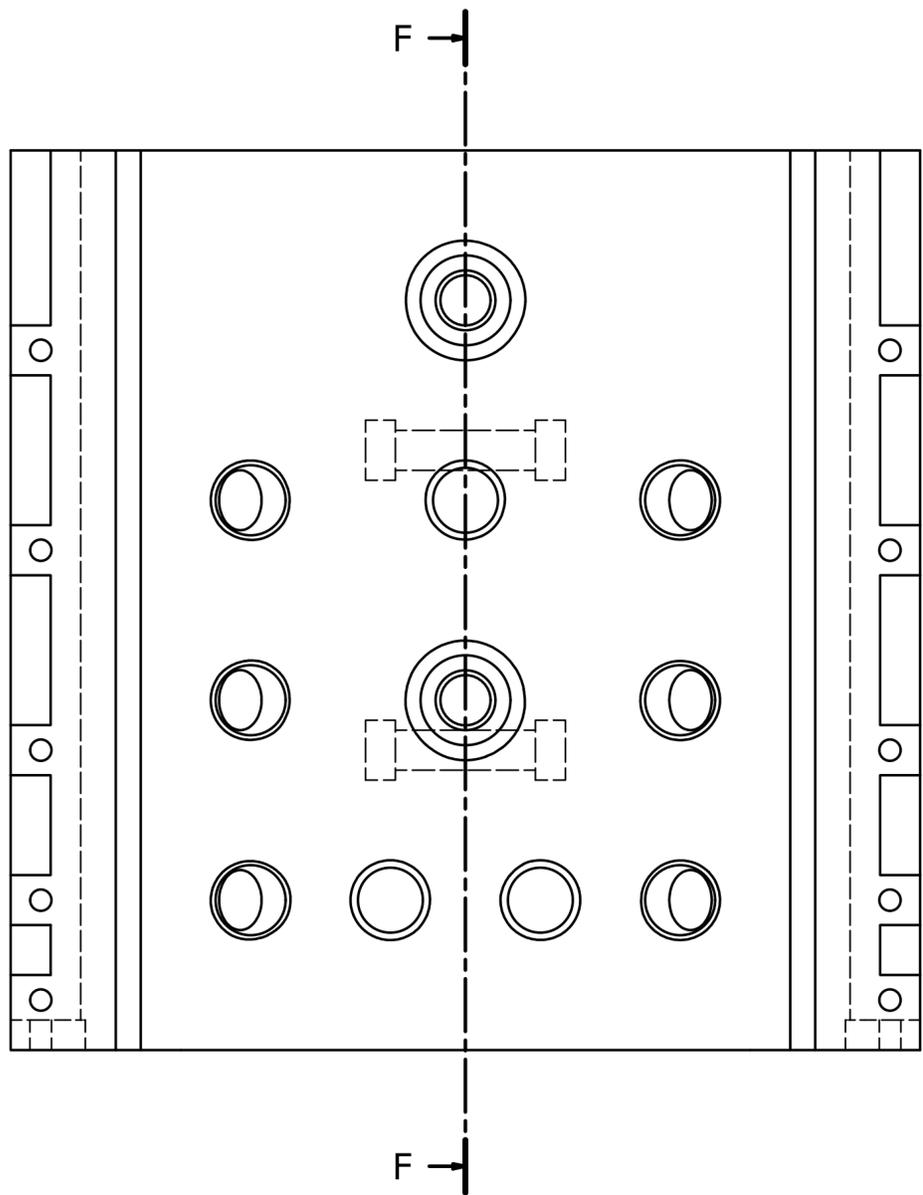
D (1 : 2)



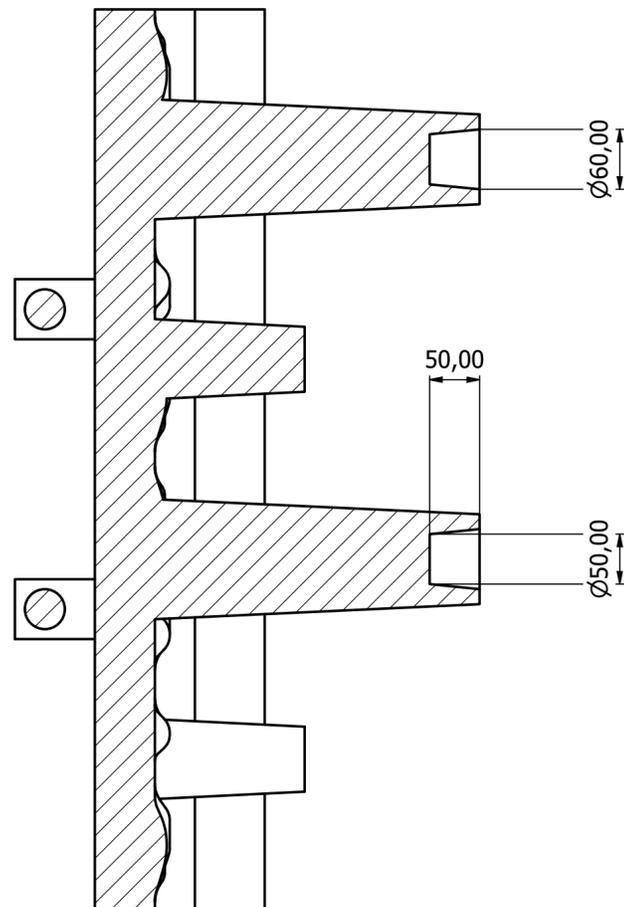
DISEÑADO POR	MARIO LOZANO CORONA	UNIVERSIDAD DE CANTABRIA	
REVISADO POR		FIRMA	FECHA 09/12/2022
APROBADO POR		ESCALA	HOJA 2/5
	MOLDE E		
	Pared_1E		



DISEÑADO POR	MARIO LOZANO CORONA	UNIVERSIDAD DE CANTABRIA	
REVISADO POR			
APROBADO POR		FIRMA	FECHA 09/12/2022
	MOLDE E	ESCALA	1 : 5
	Pared_2E	HOJA	3/5

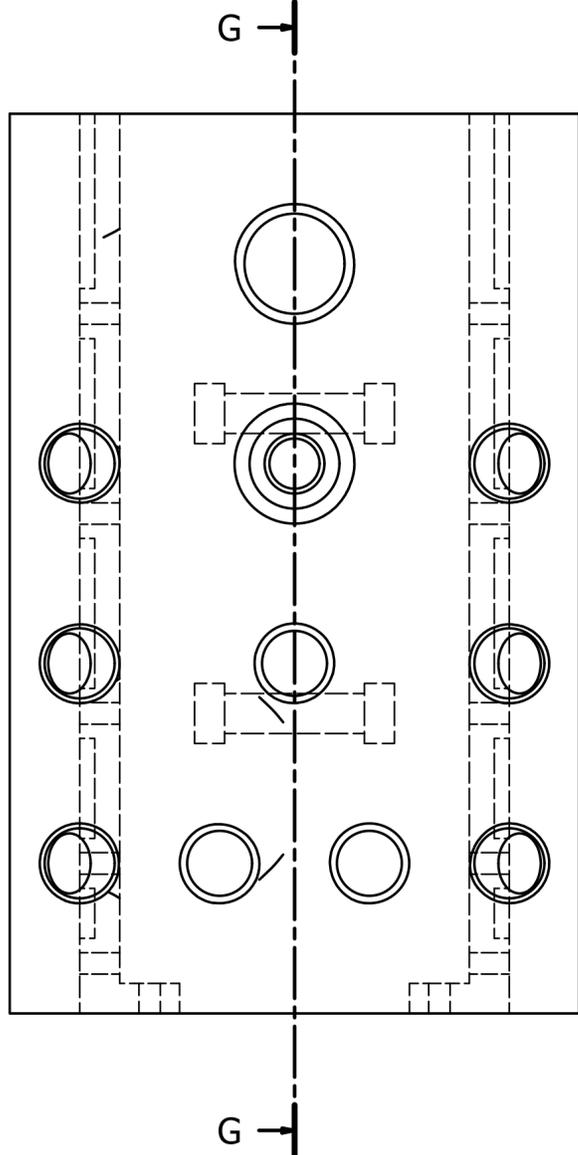


F-F (1 : 5)

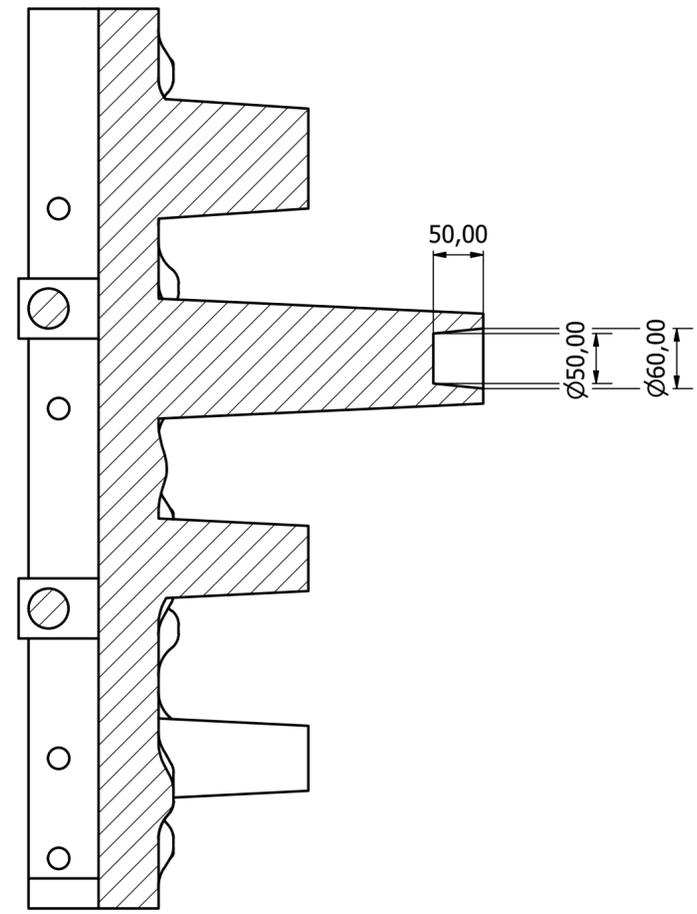


El resto de las cotas son las mismas que las de la Pared 1.

DISEÑADO POR	MARIO LOZANO CORONA	UNIVERSIDAD DE CANTABRIA	
REVISADO POR			
APROBADO POR			
	MOLDE E	FIRMA	FECHA 09/12/2022
	Pared_3E		ESCALA 1 : 5
			HOJA 4/5

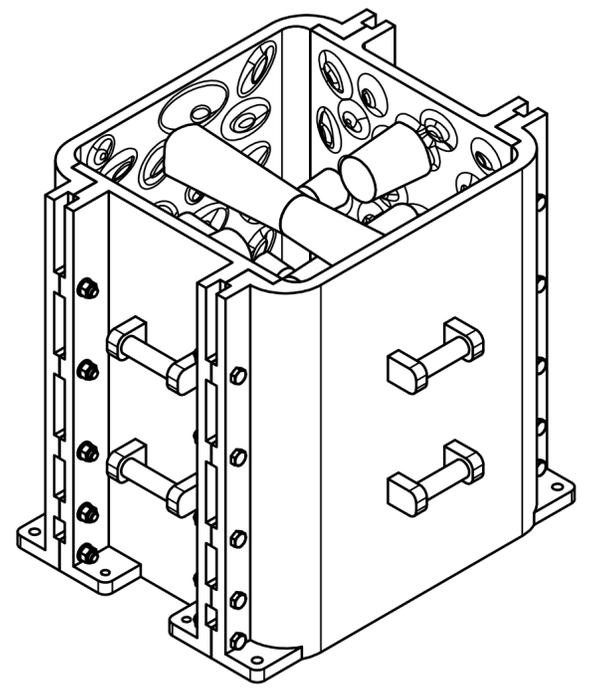
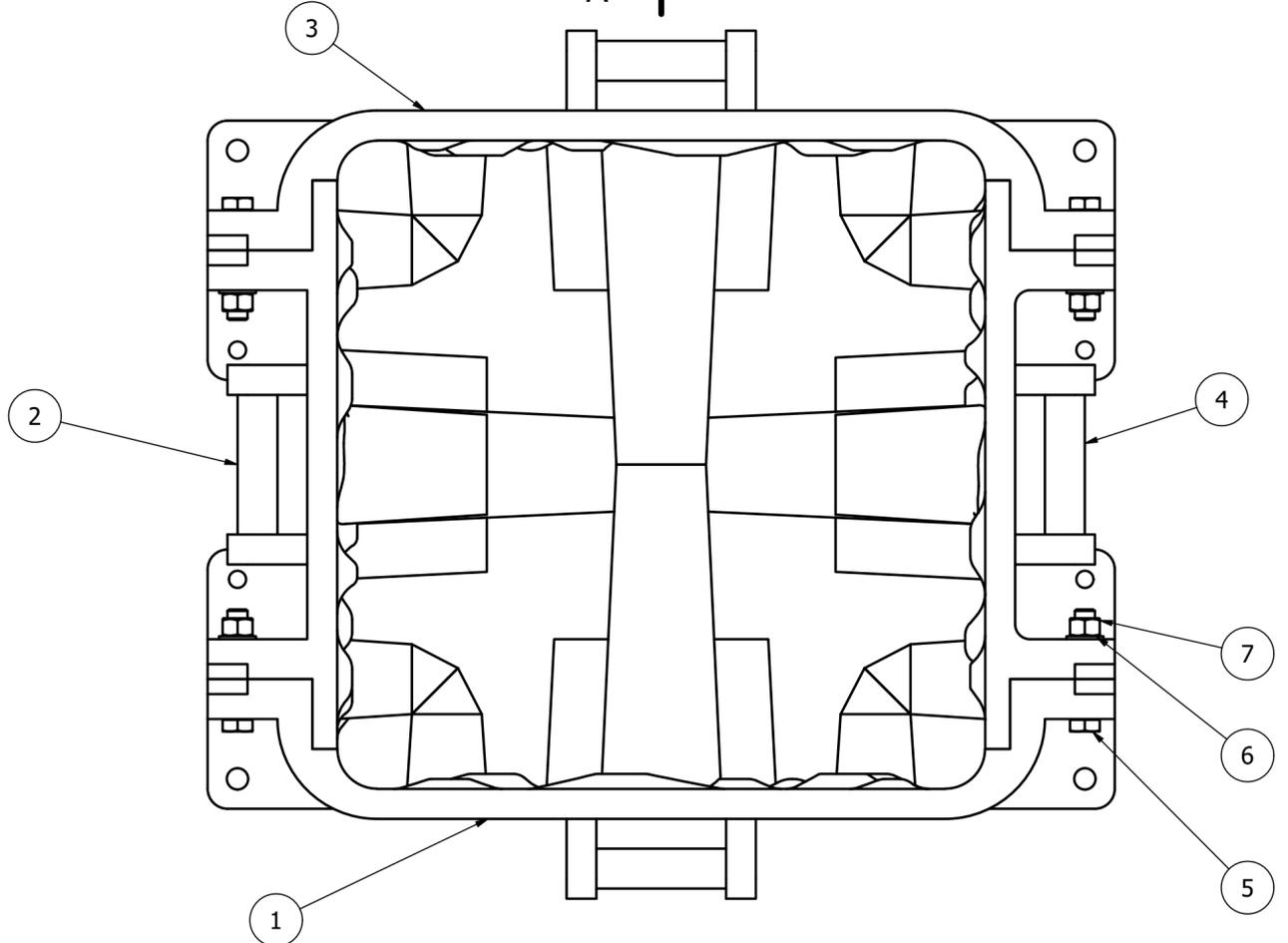
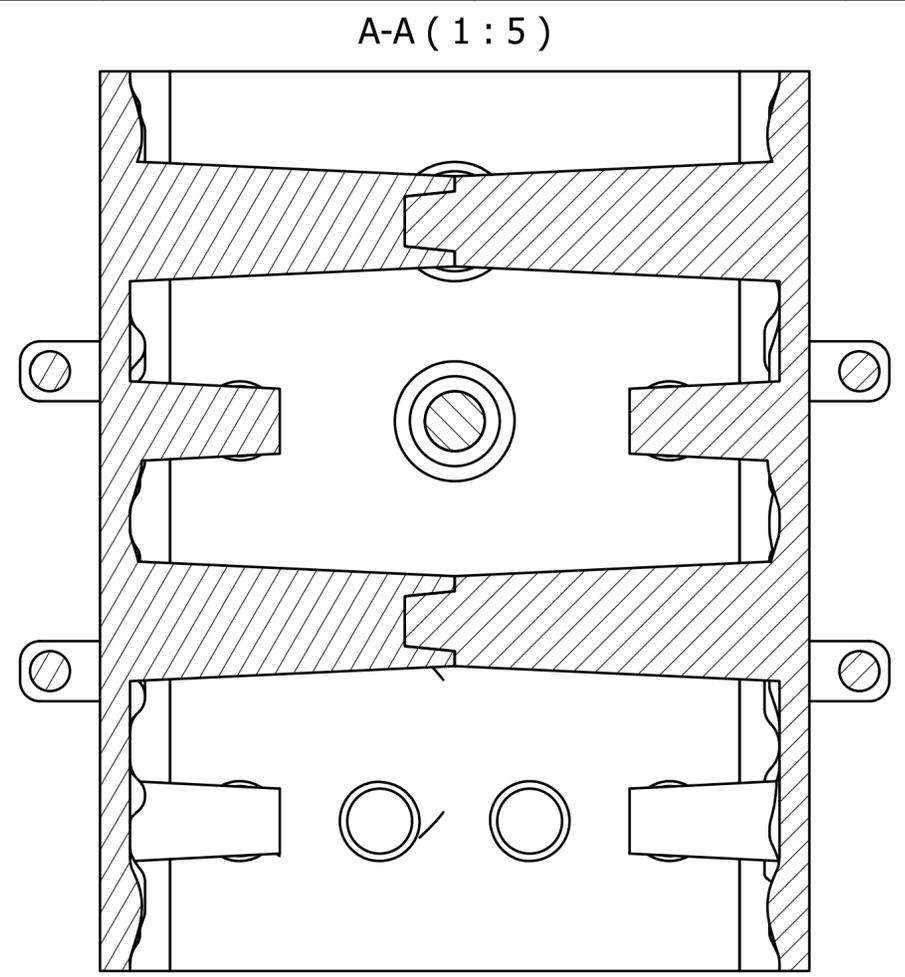
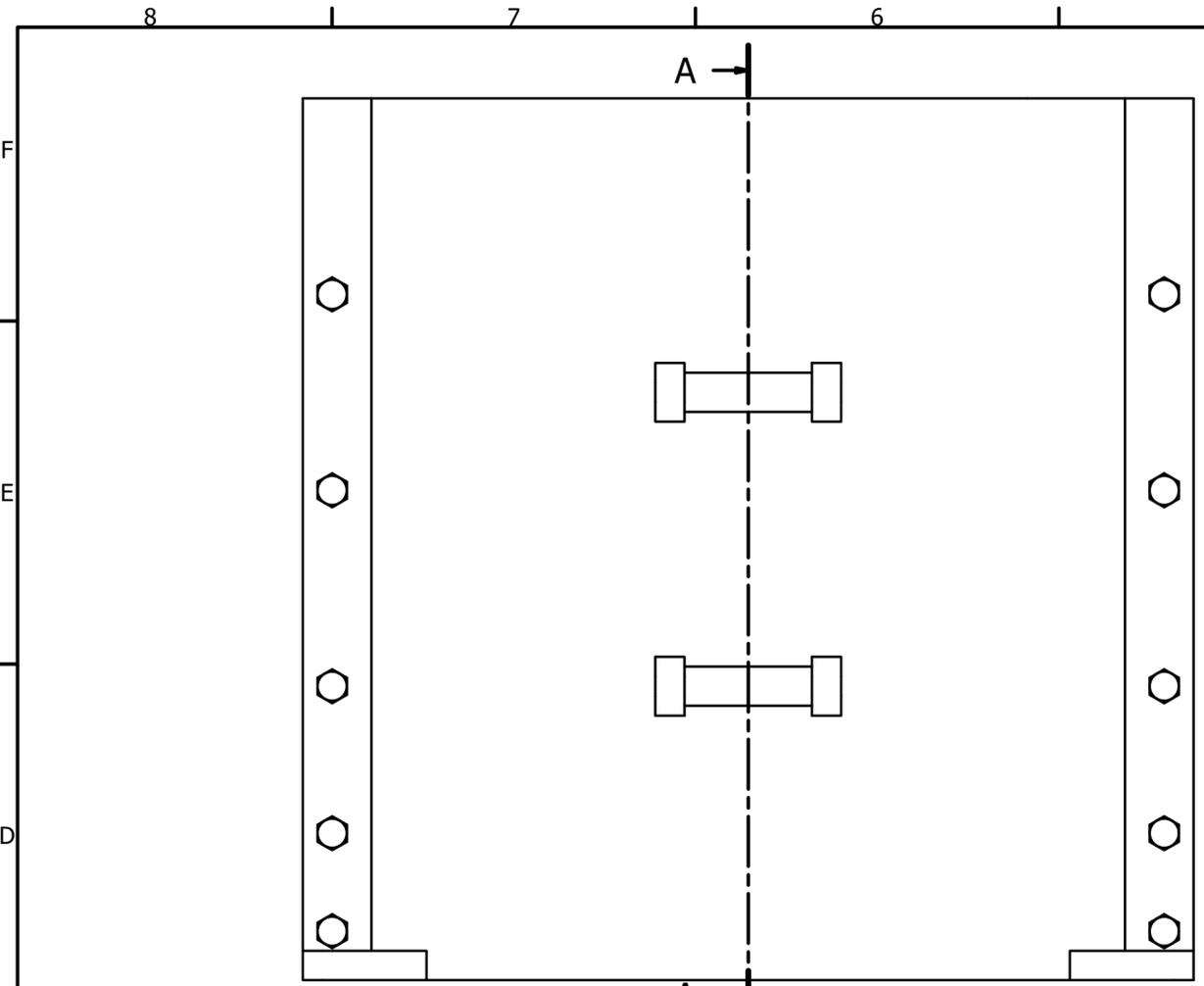


G-G (1 : 5)



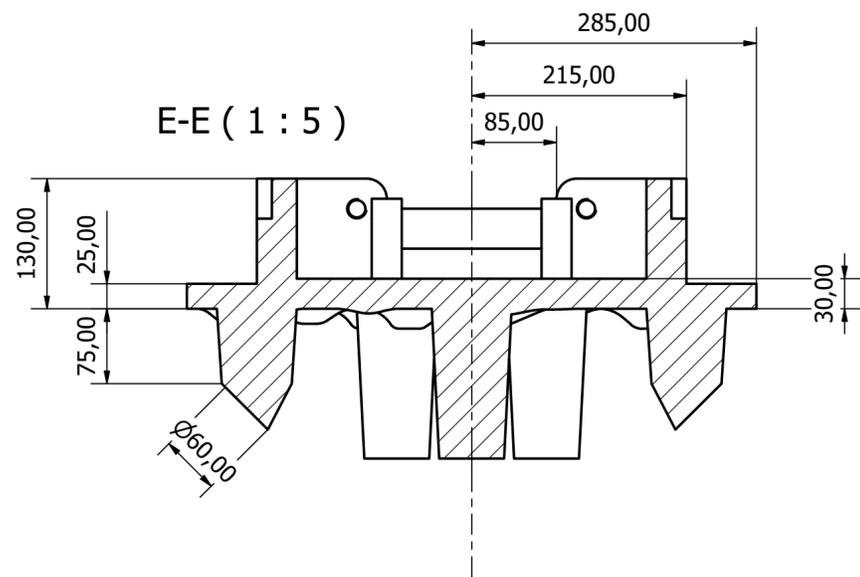
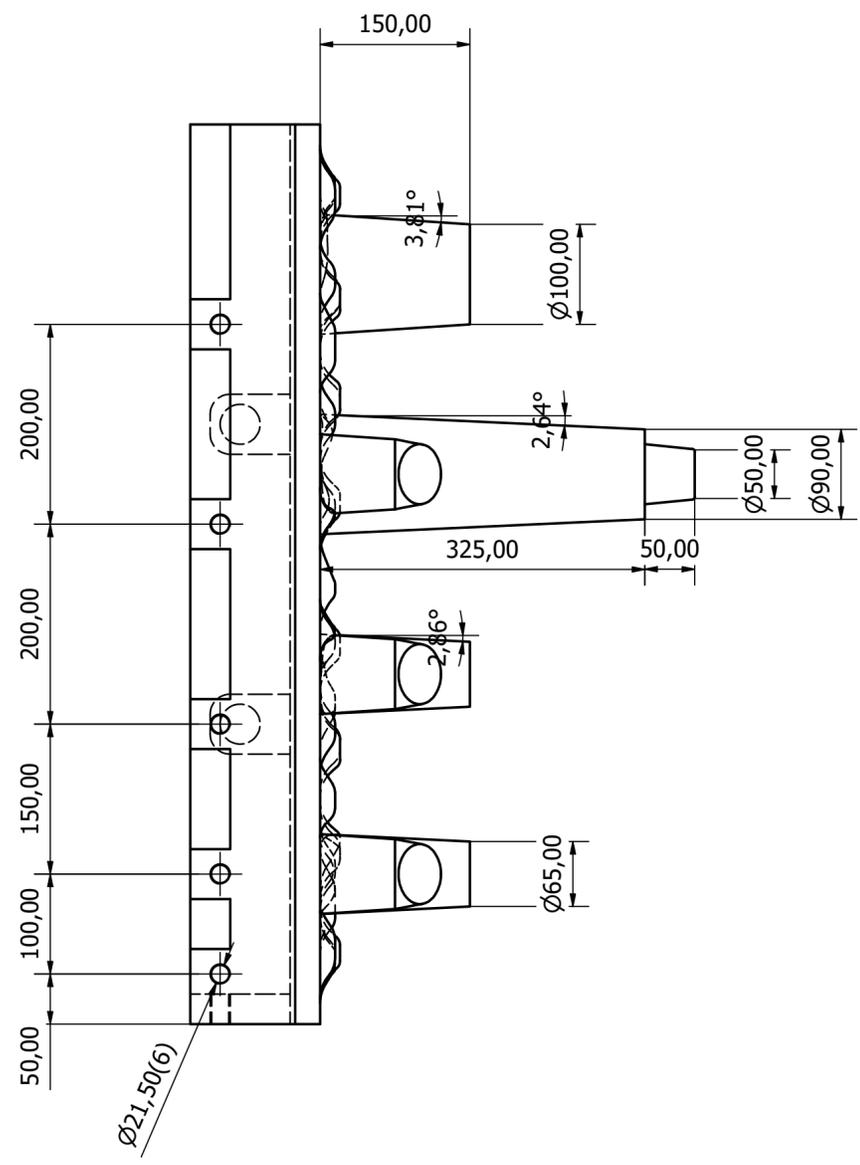
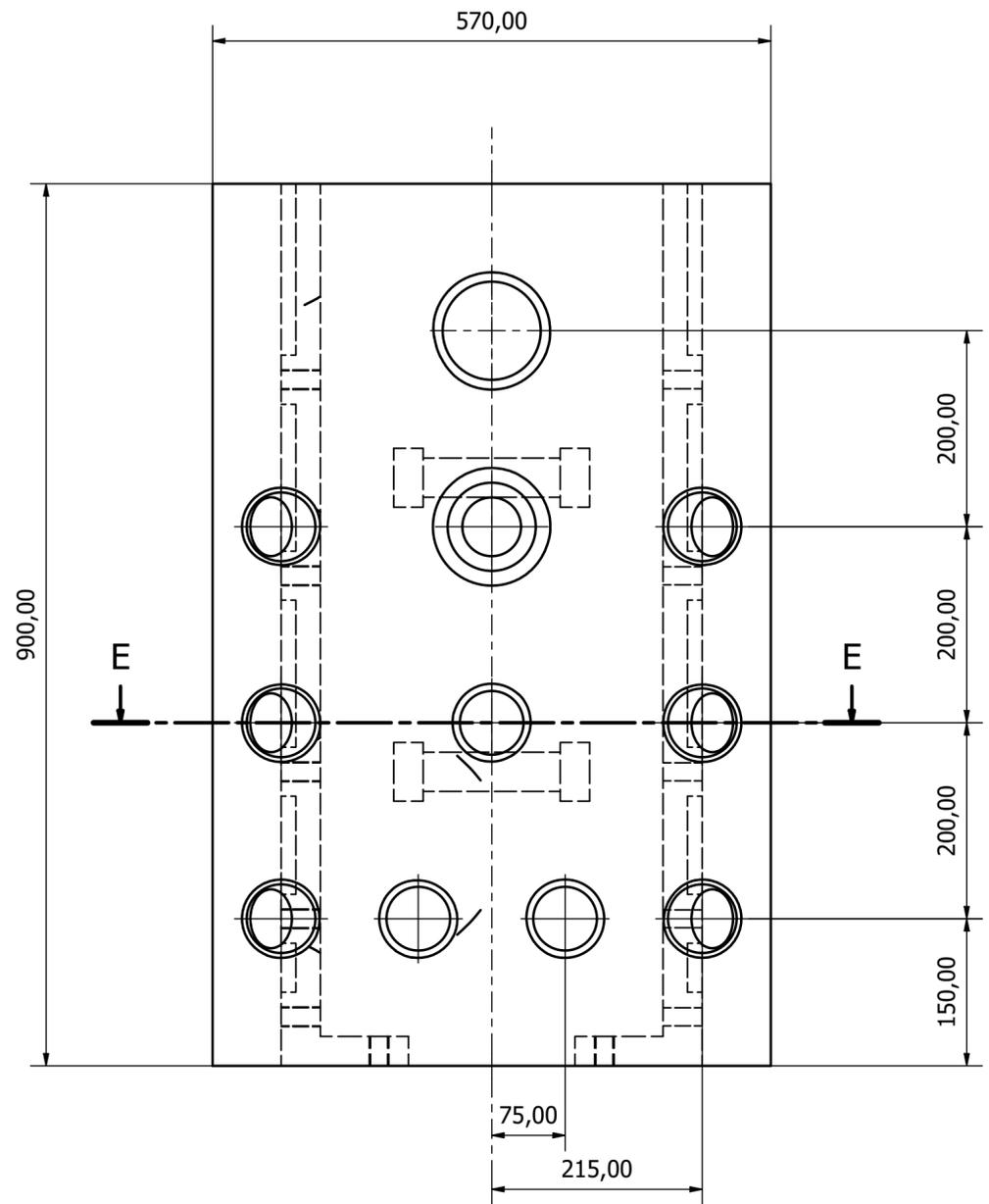
El resto de las cotas son las mismas que las de la Pared 2.

DISEÑADO POR	MARIO LOZANO CORONA	UNIVERSIDAD DE CANTABRIA	
REVISADO POR			
APROBADO POR			
	MOLDE E	FIRMA	FECHA 09/12/2022
	Pared_4E	ESCALA 1 : 5	HOJA 5/5

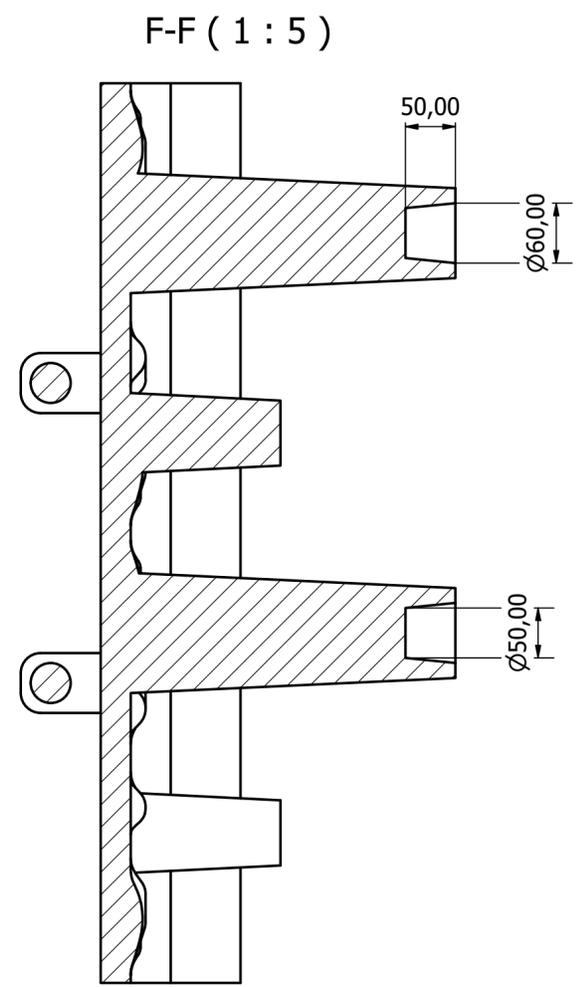
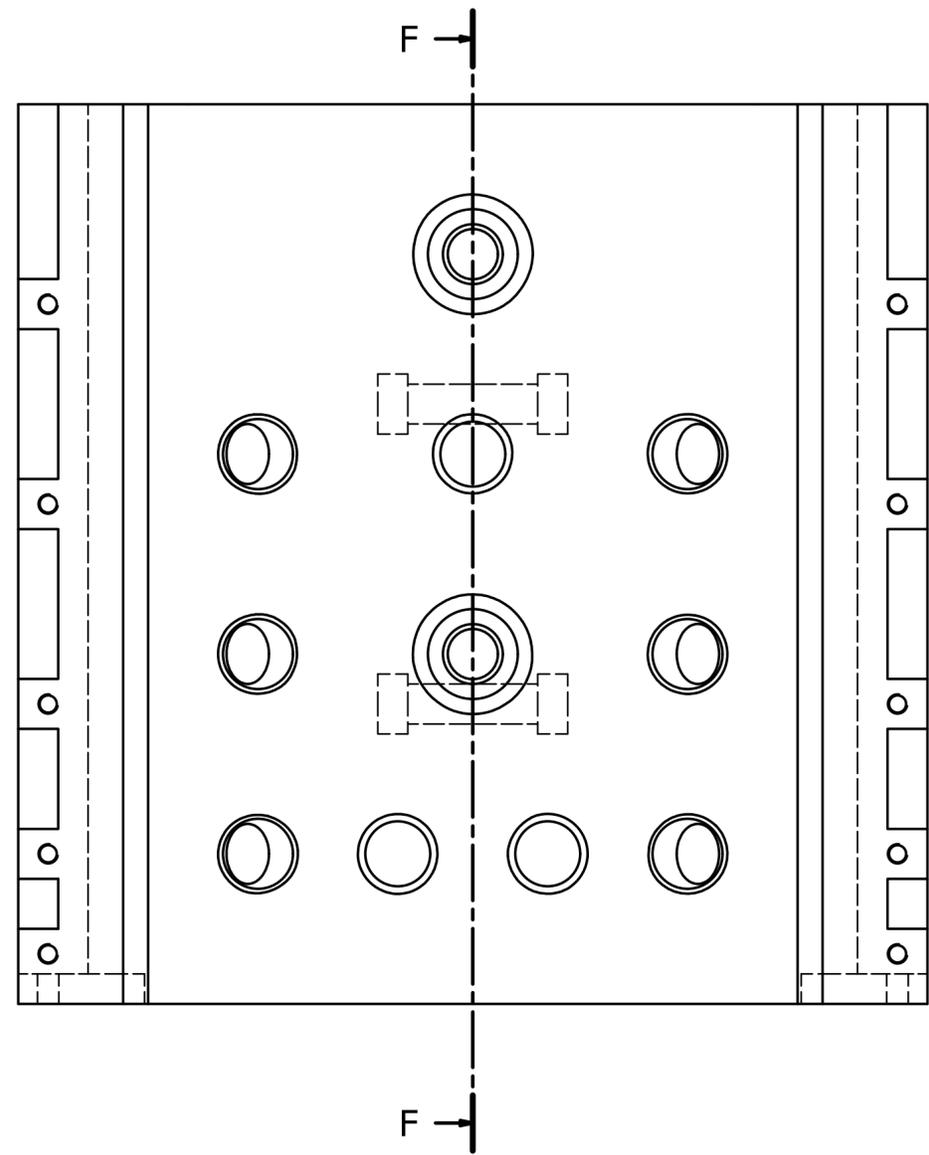


20	ISO 4032 - M20	7	Acero inoxidable, 440C
20	ISO 7089 - 20	6	Acero inoxidable
20	ISO 4014 - M20 x 120	5	Acero inoxidable, 440C
1	Pared 4	4	PLA
1	Pared 3	3	PLA
1	Pared 2	2	PLA
1	Pared 1	1	PLA
CANTIDAD	DENOMINACION	ELEMENTO	MATERIAL

DISEÑADO POR	MARIO LOZANO CORONA	UNIVERSIDAD DE CANTABRIA	
REVISADO POR			
APROBADO POR		FIRMA	FECHA 26/12/2022
MOLDE F		ESCALA	HOJA 1/5
PLANO DE CONJUNTO		ESCALA	1 : 5

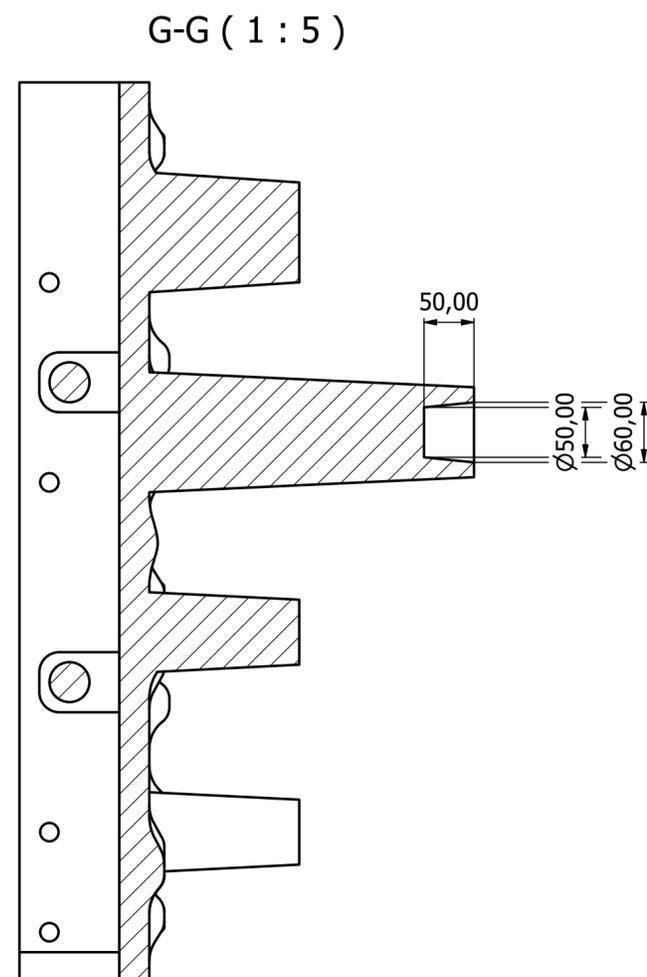
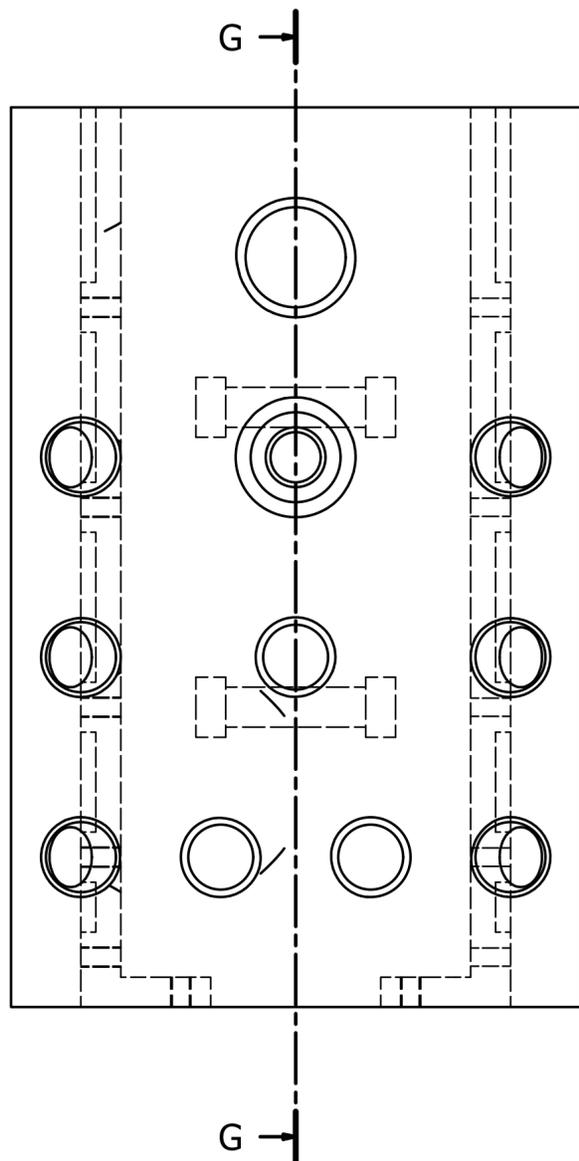


DISEÑADO POR	MARIO LOZANO CORONA	UNIVERSIDAD DE CANTABRIA	
REVISADO POR			
APROBADO POR			
MOLDE F		FIRMA	FECHA 26/12/2022
PARED 2		ESCALA 1:5	HOJA 3/5



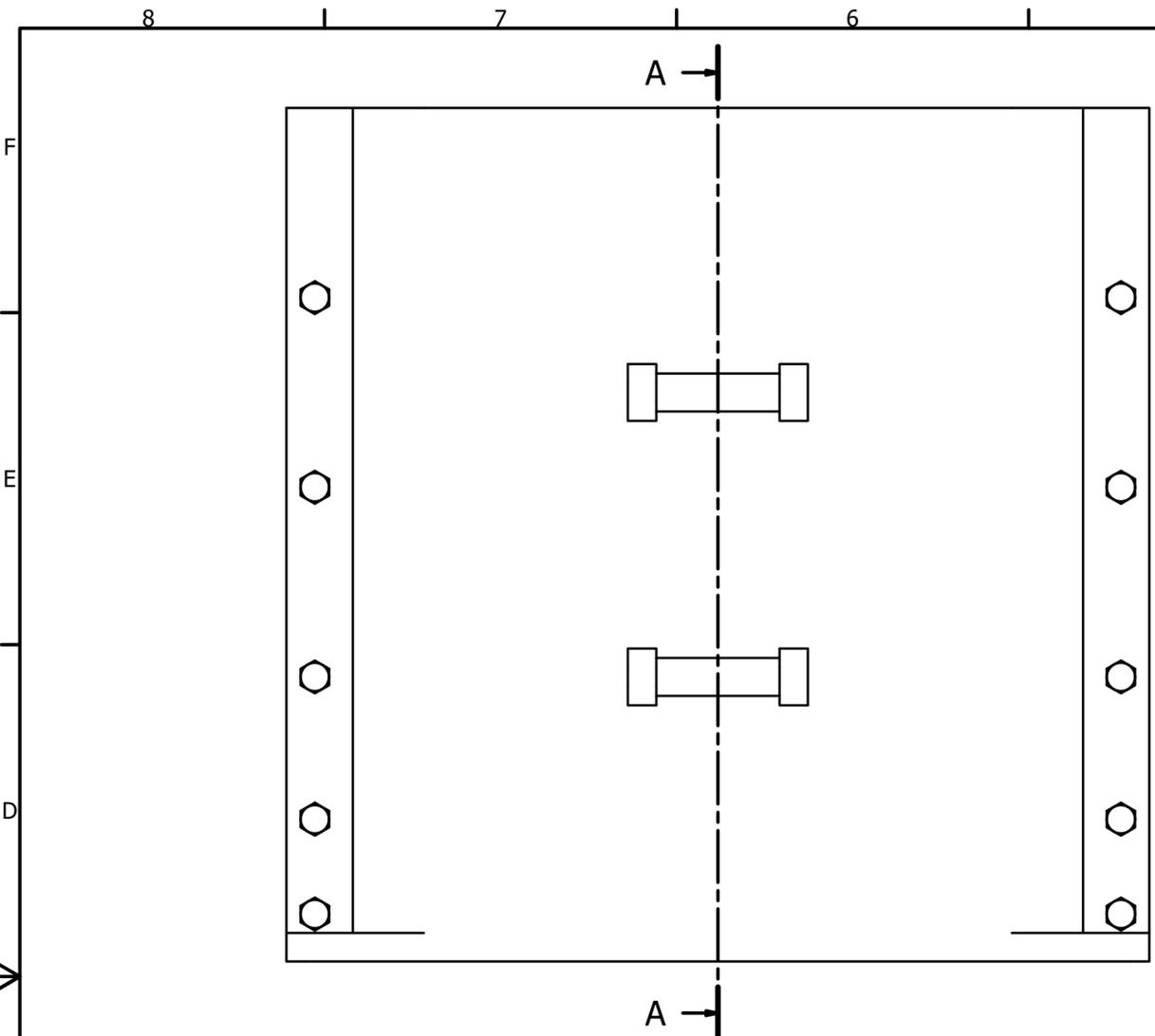
El resto de las cotas son las mismas que las de la Pared 1.

DISEÑADO POR	MARIO LOZANO CORONA	UNIVERSIDAD DE CANTABRIA	
REVISADO POR			
APROBADO POR			
	MOLDE F	FIRMA	FECHA 26/12/2022
	PARED 3		ESCALA 1:5 HOJA 4/5

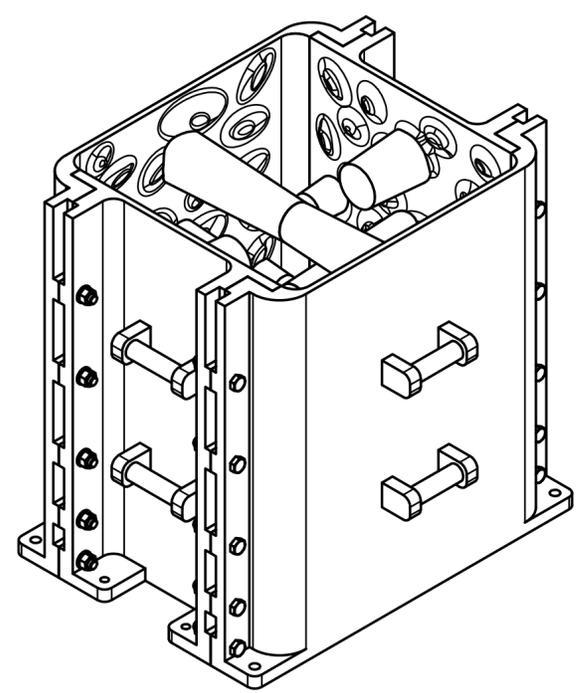
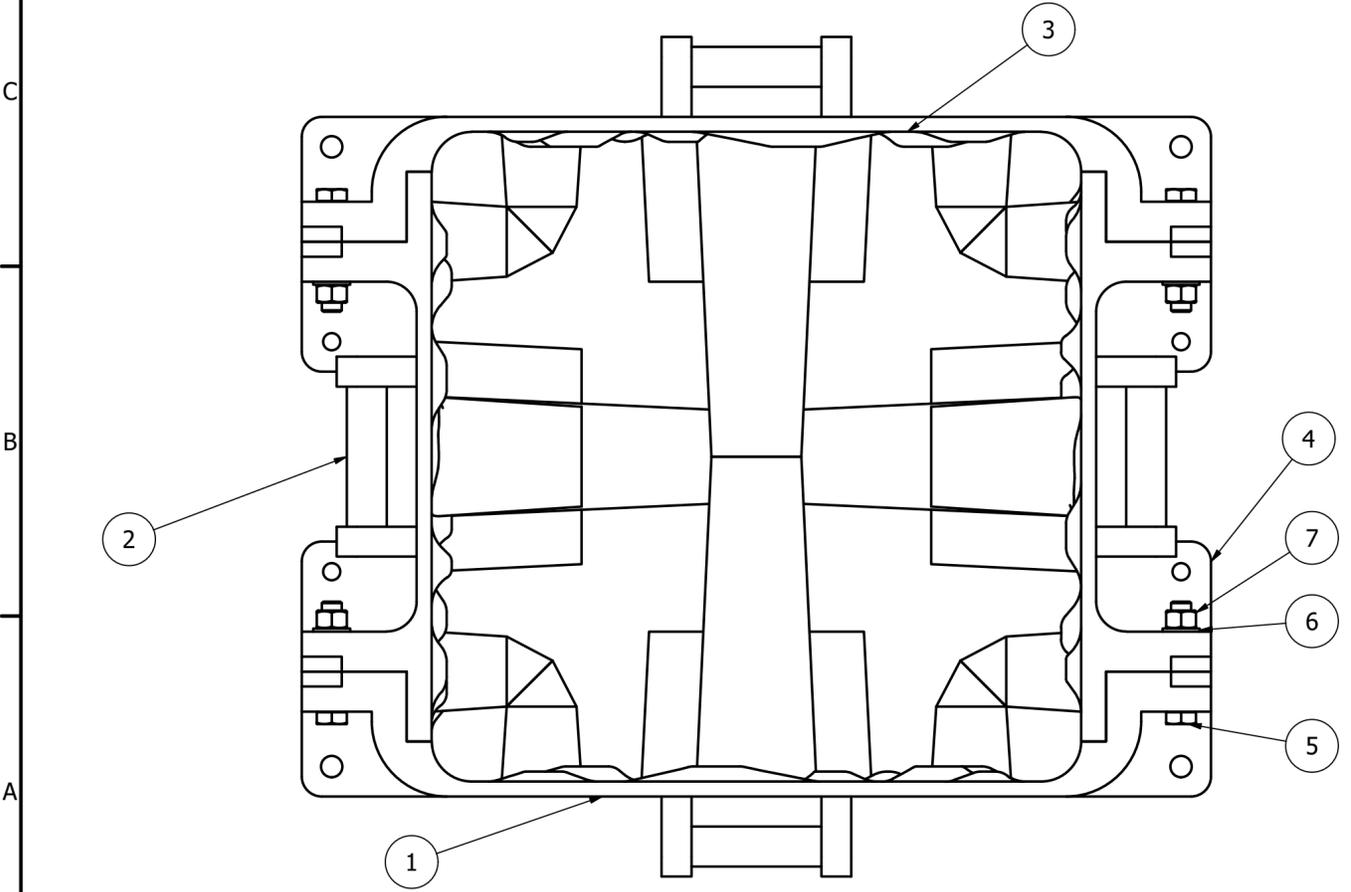
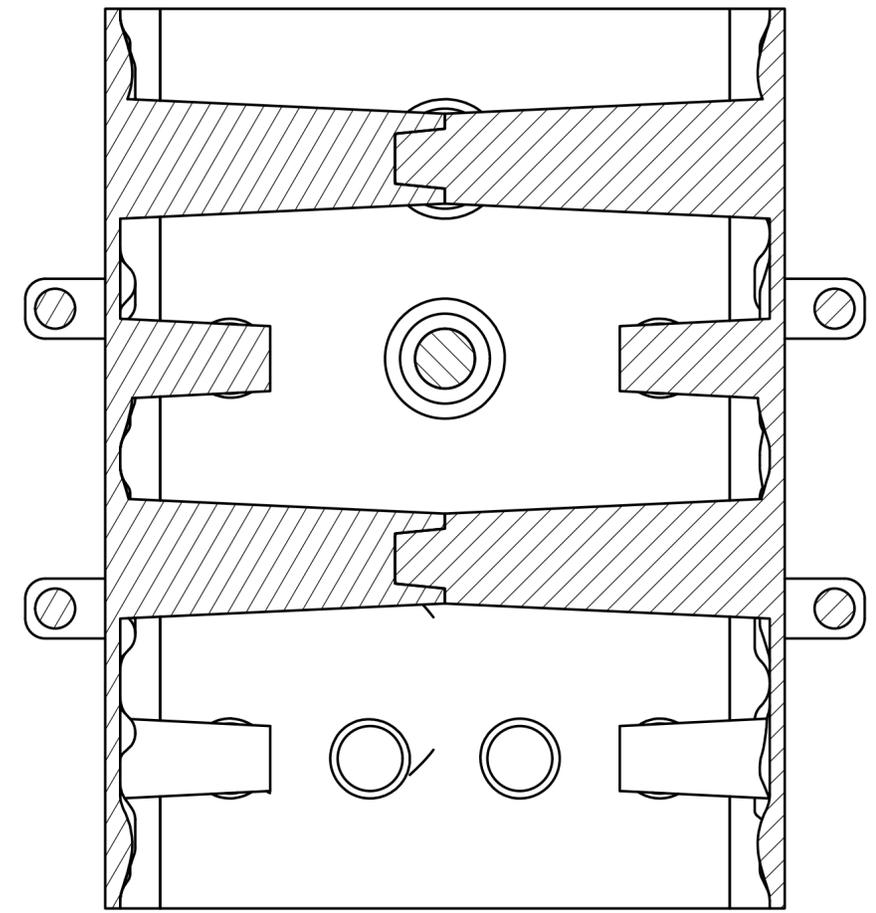


El resto de las cotas son las mismas que las de la Pared 2.

DISEÑADO POR	MARIO LOZANO CORONA	UNIVERSIDAD DE CANTABRIA	
REVISADO POR			
APROBADO POR			
	MOLDE F	FIRMA	FECHA 26/12/2022
	PARED 4		ESCALA 1:5 HOJA 5/5



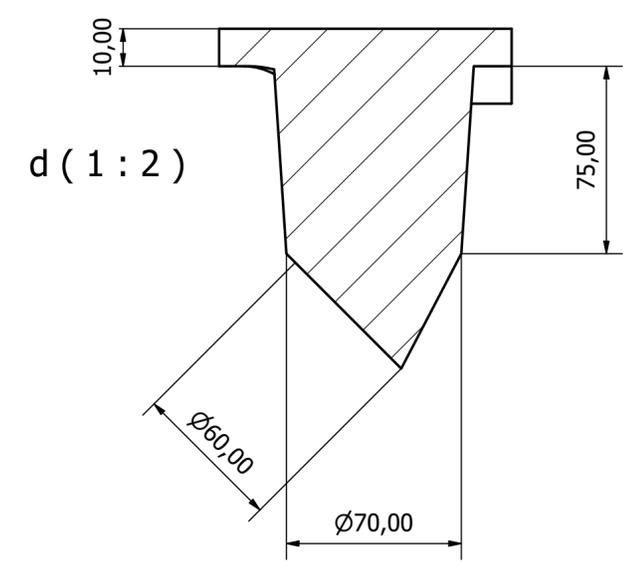
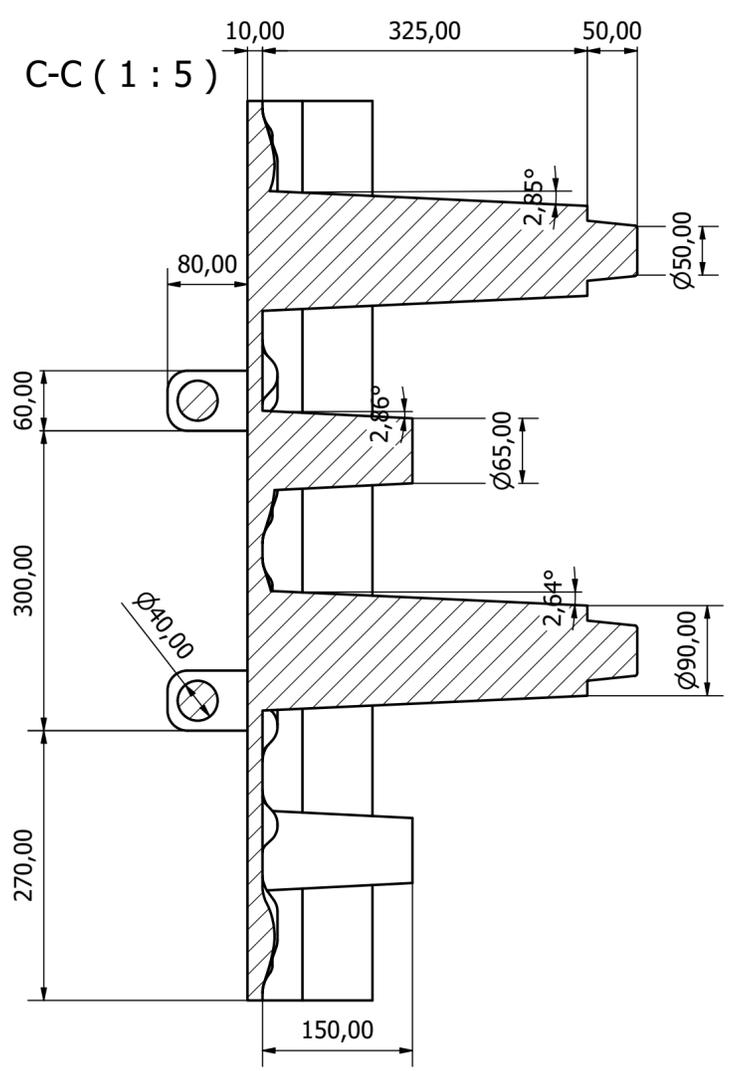
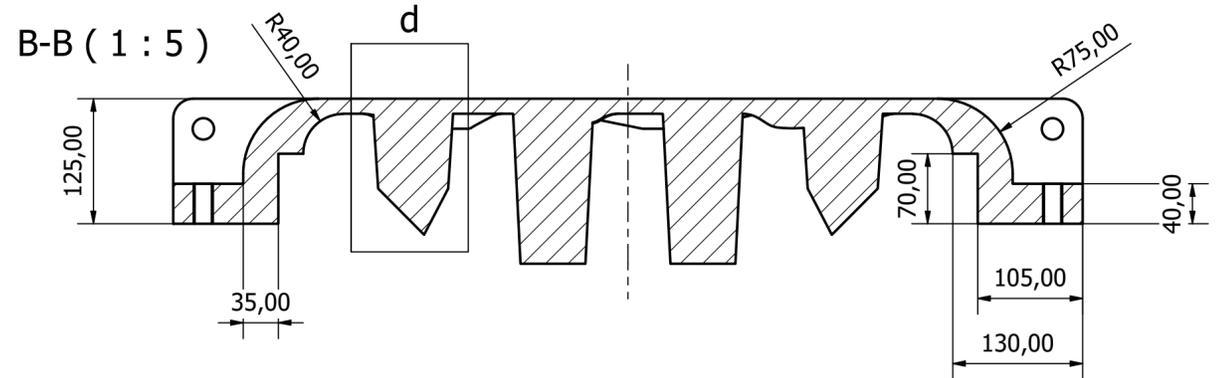
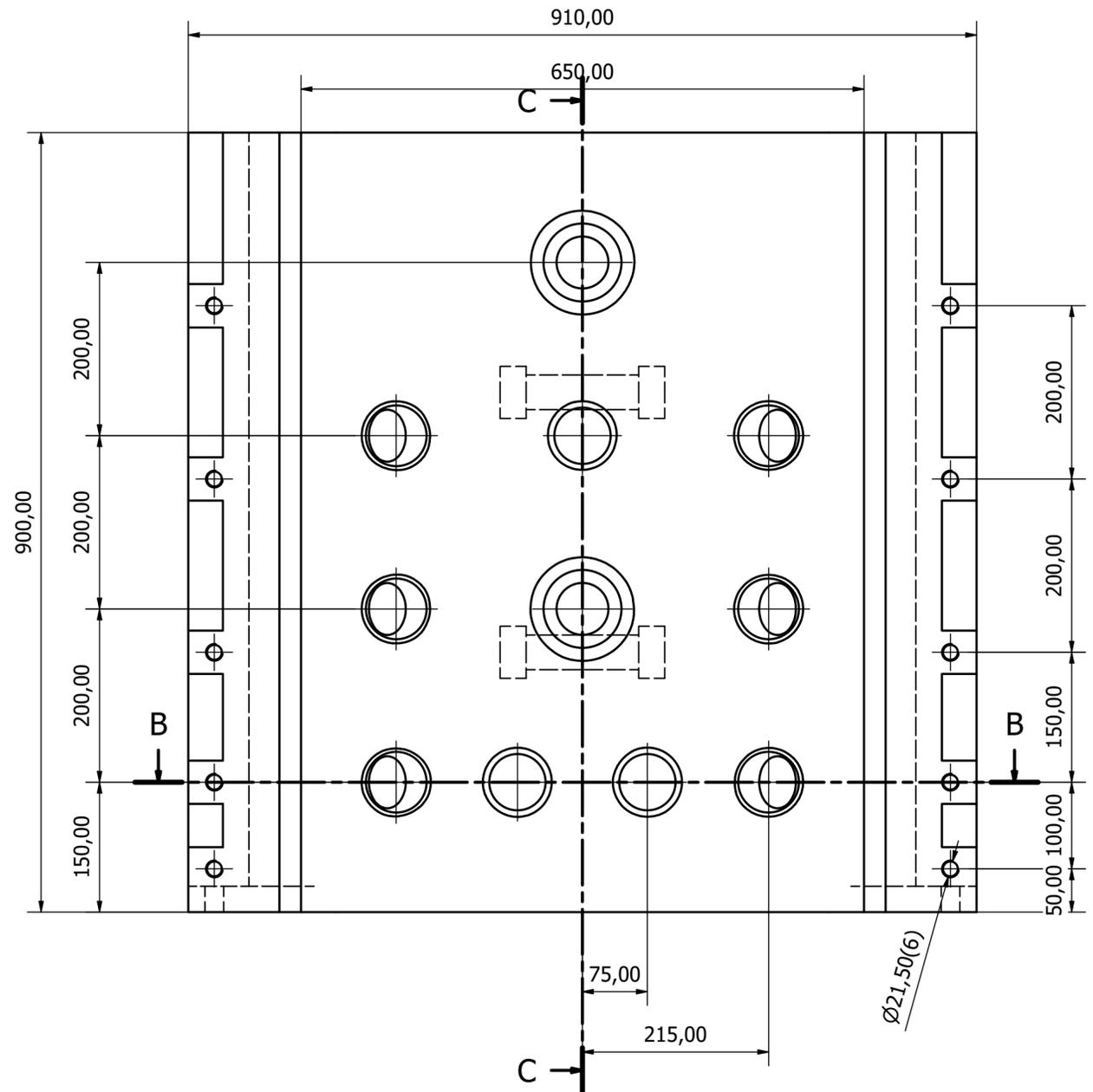
A-A (1:5)



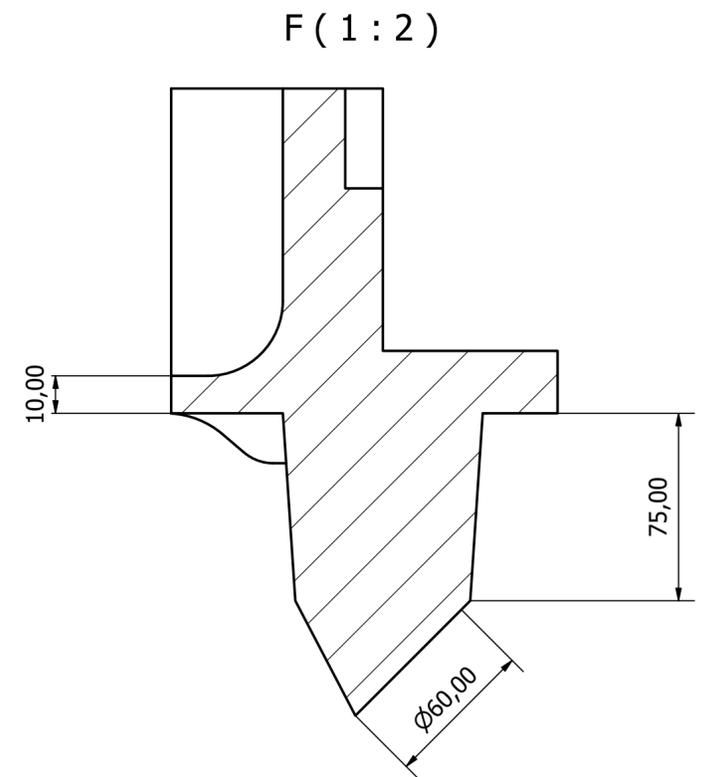
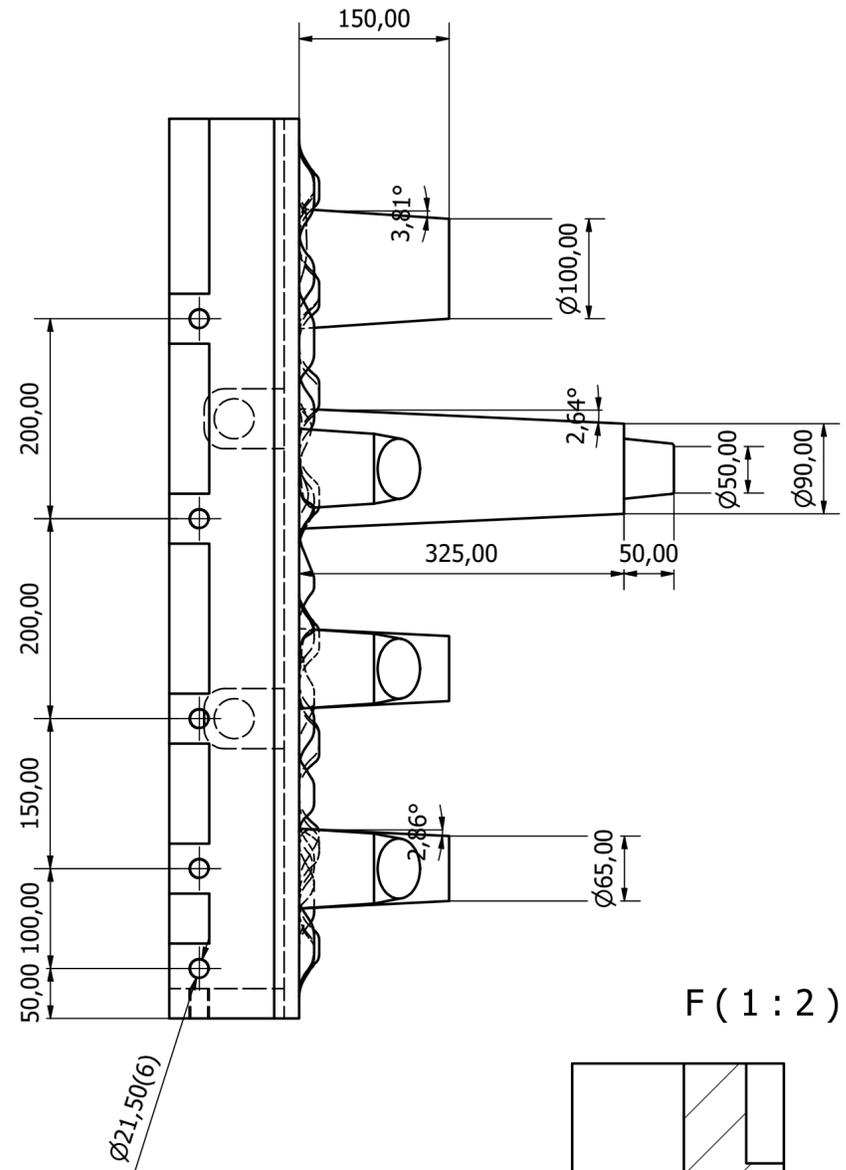
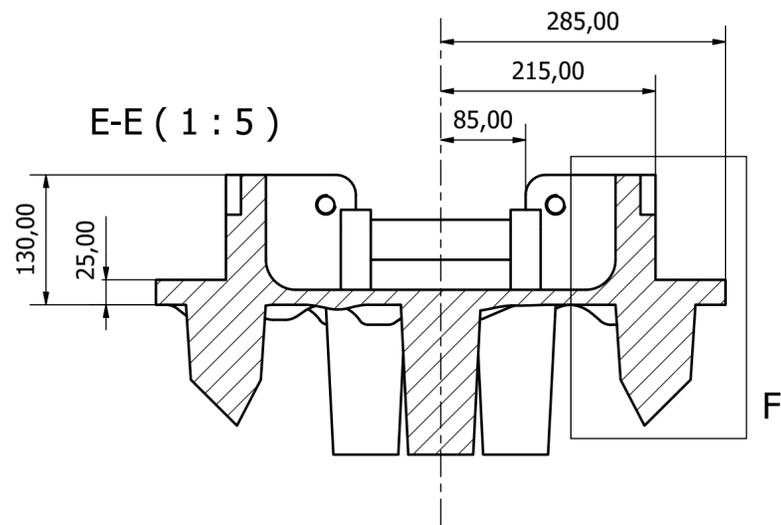
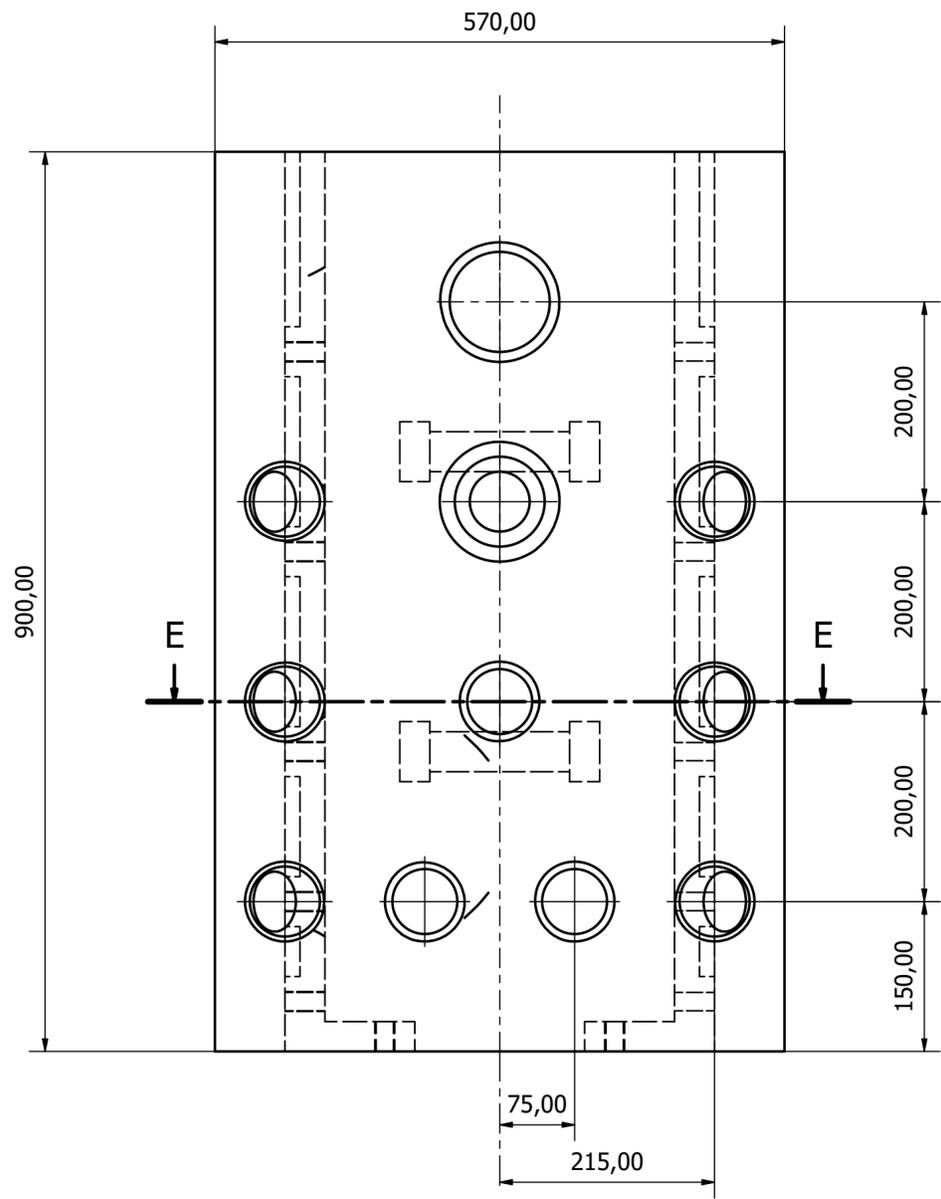
20	ISO 4032 - M20	7	Acero inoxidable, 440C
20	ISO 7089 - 20	6	Acero inoxidable
20	ISO 4014 - M20 x 120	5	Acero inoxidable, 440C
1	Pared 4	4	PLA
1	Pared 3	3	PLA
1	Pared 2	2	PLA
1	Pared 1	1	PLA
CANTIDAD	DENOMINACION	ELEMENTO	MATERIAL

DISEÑADO POR	MARIO LOZANO CORONA		
REVISADO POR			
APROBADO POR			
MOLDE G		FIRMA	FECHA 03/01/2023
PLANO DE CONJUNTO		ESCALA 1:5	HOJA 1/5

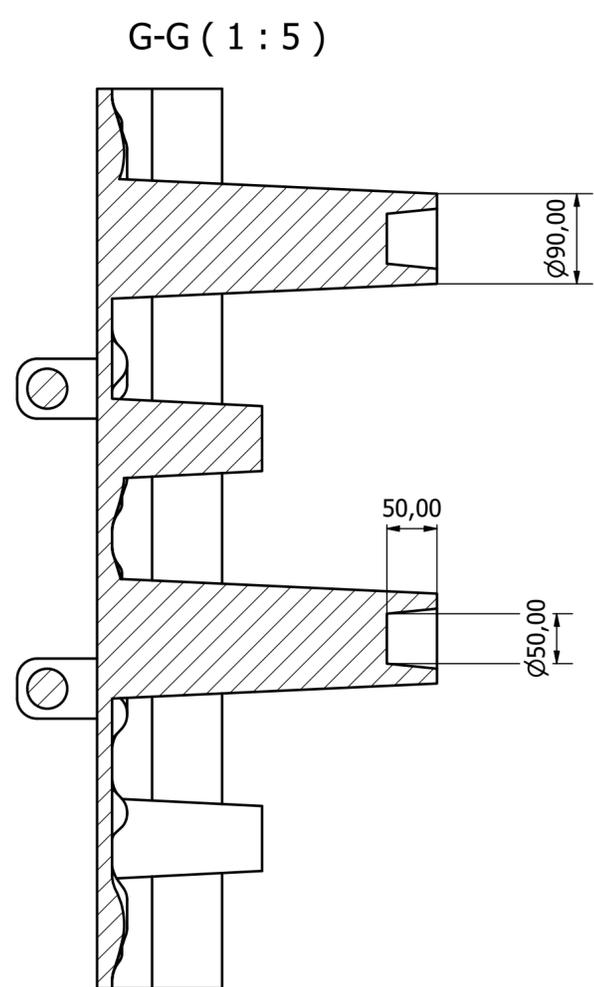
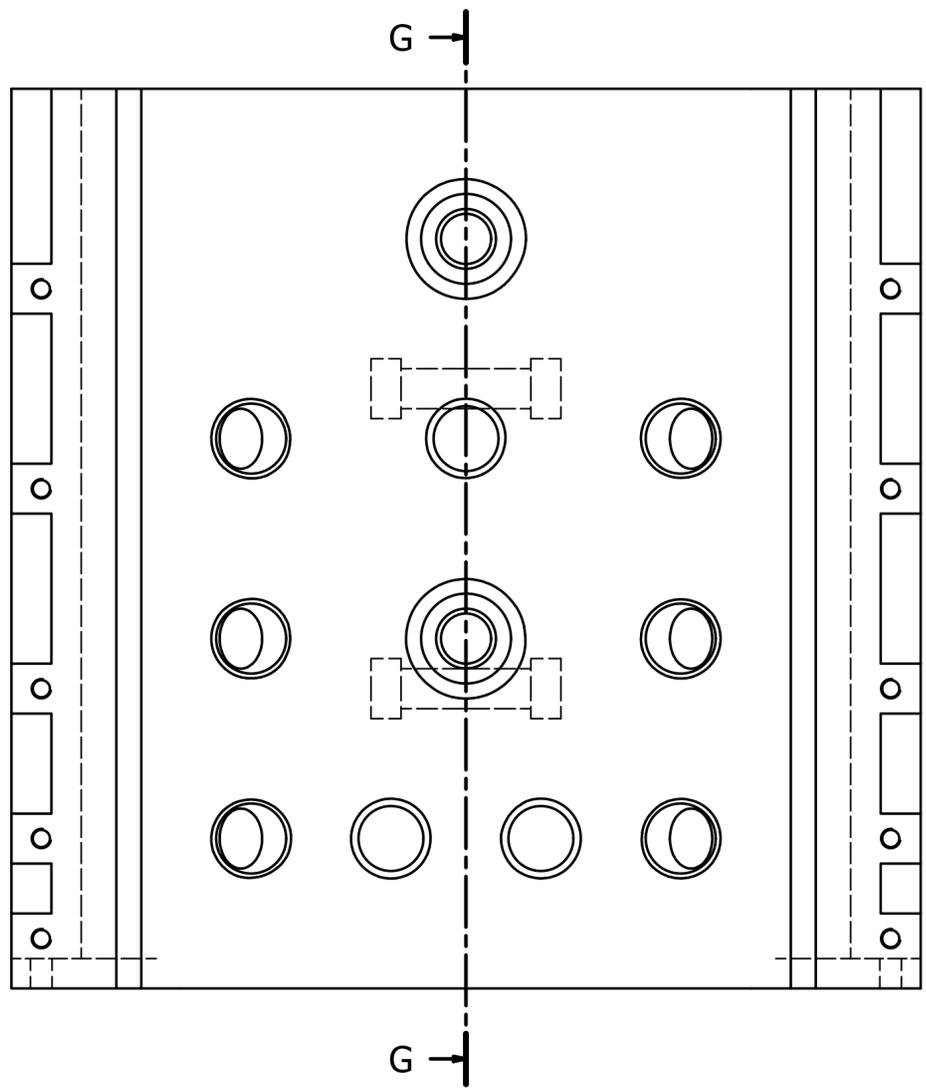
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



DISEÑADO POR	MARIO LOZANO CORONA	UNIVERSIDAD DE CANTABRIA	
REVISADO POR			
APROBADO POR			
MOLDE G		FIRMA	FECHA 03/01/2023
PARED 1		ESCALA 1:5	HOJA 2/5

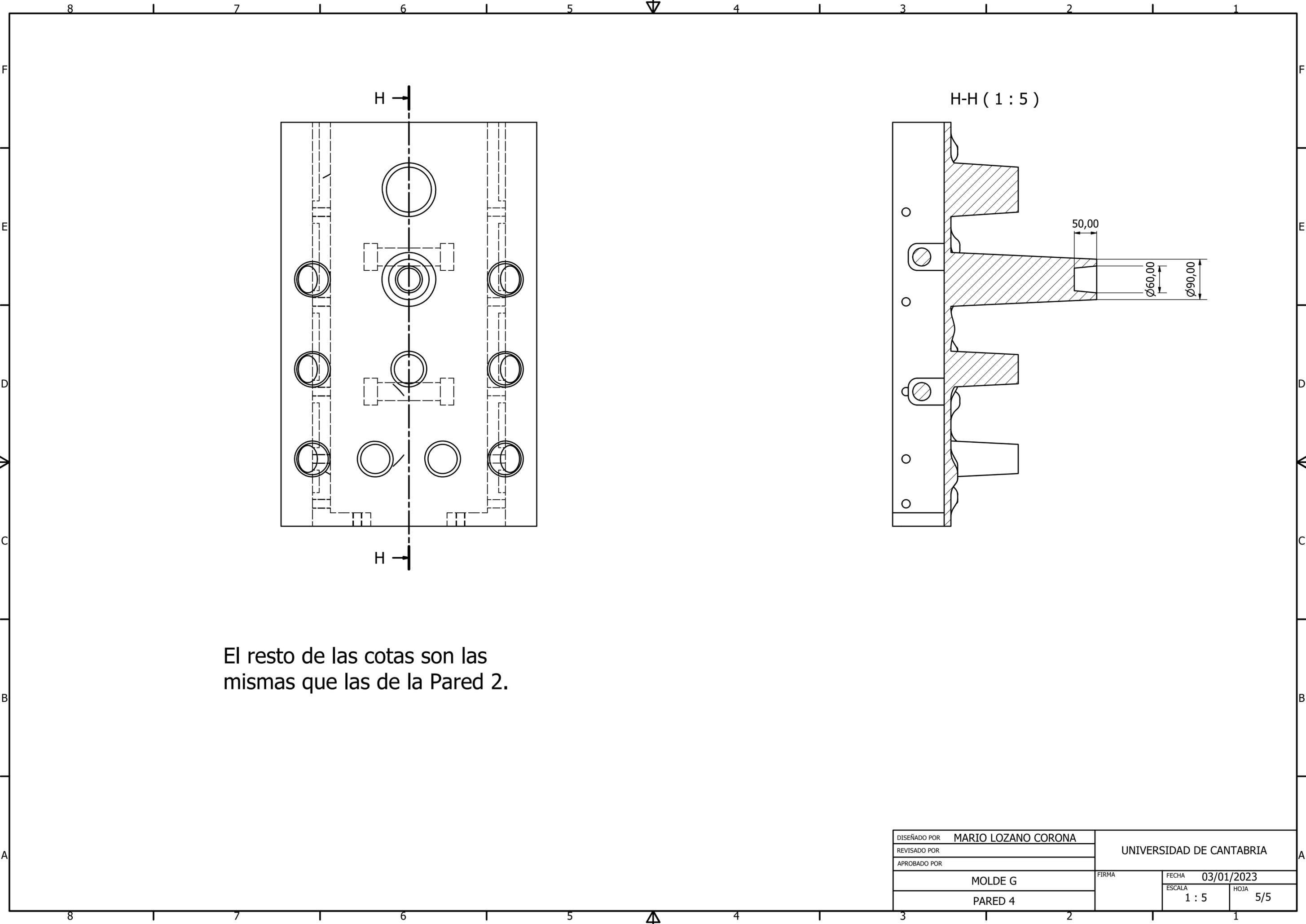


DISEÑADO POR	MARIO LOZANO CORONA	UNIVERSIDAD DE CANTABRIA	
REVISADO POR			
APROBADO POR			
MOLDE G		FIRMA	FECHA 03/01/2023
PARED 2		ESCALA 1:5	HOJA 3/5



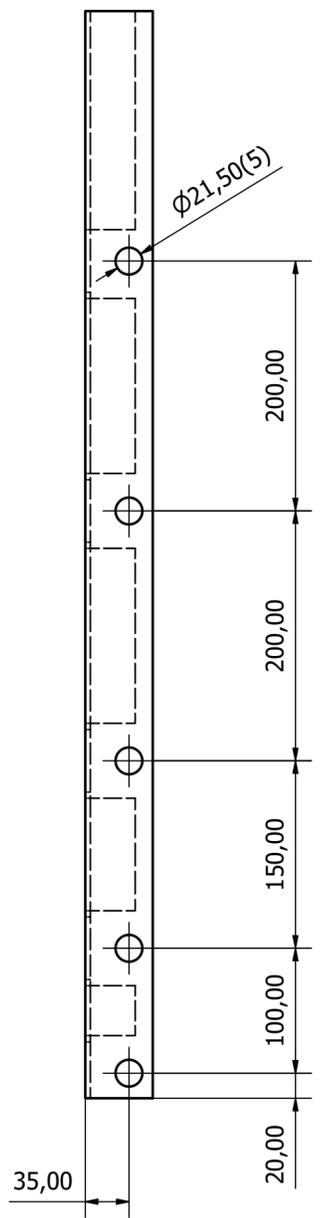
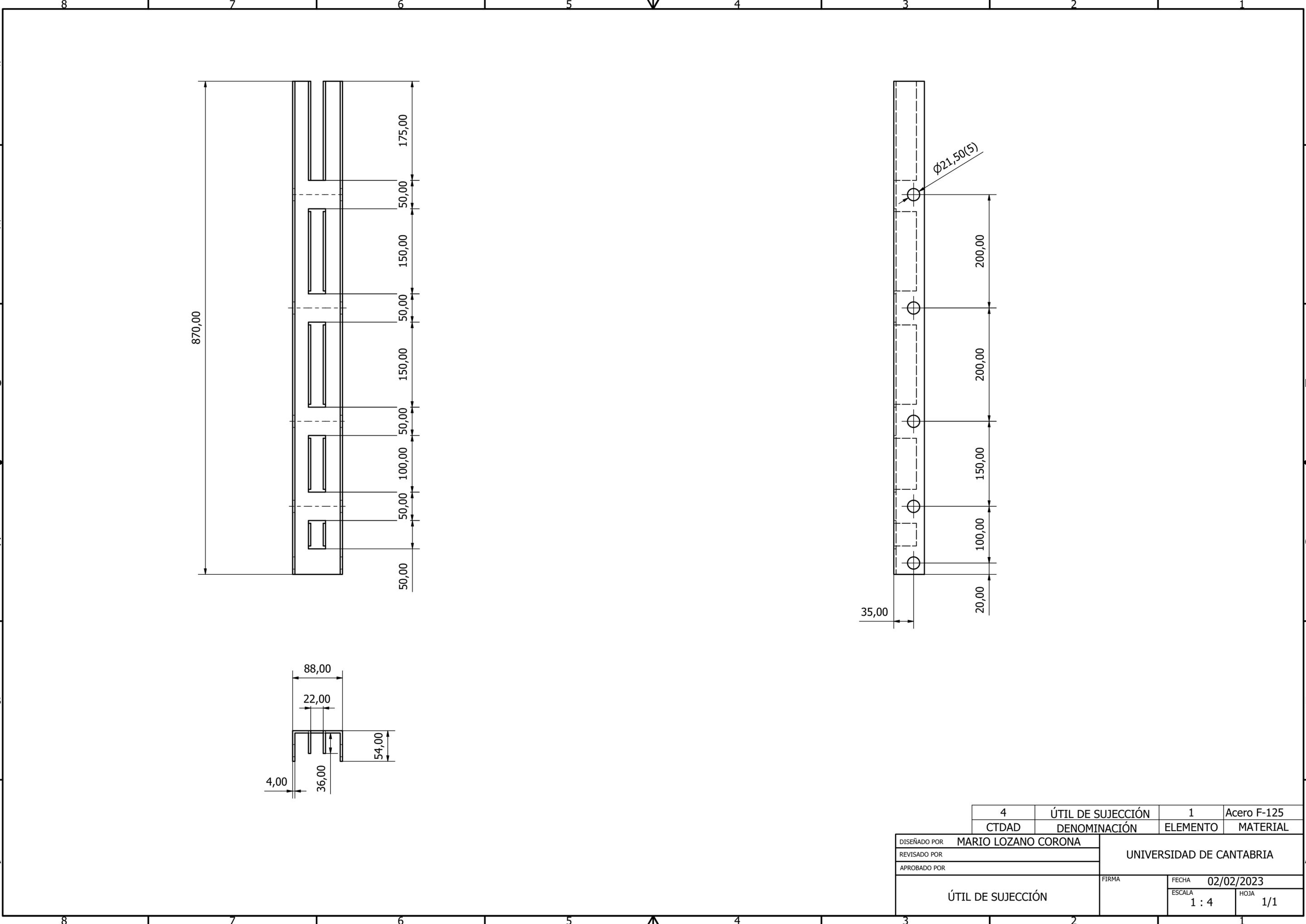
El resto de las cotas son las mismas que las de la Pared 1.

DISEÑADO POR	MARIO LOZANO CORONA	UNIVERSIDAD DE CANTABRIA	
REVISADO POR			
APROBADO POR			
MOLDE G		FIRMA	FECHA 03/01/2023
PARED 3		ESCALA 1:5	HOJA 4/5



El resto de las cotas son las mismas que las de la Pared 2.

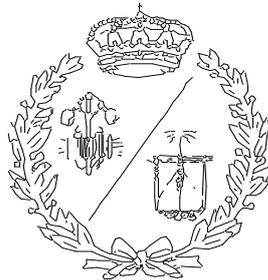
DISEÑADO POR	MARIO LOZANO CORONA	UNIVERSIDAD DE CANTABRIA	
REVISADO POR			
APROBADO POR			
	MOLDE G	FIRMA	FECHA 03/01/2023
	PARED 4	ESCALA 1 : 5	HOJA 5/5



4	ÚTIL DE SUJECCIÓN	1	Acero F-125
CTDAD	DENOMINACIÓN	ELEMENTO	MATERIAL
DISEÑADO POR MARIO LOZANO CORONA		UNIVERSIDAD DE CANTABRIA	
REVISADO POR			
APROBADO POR			
ÚTIL DE SUJECCIÓN		FIRMA	FECHA 02/02/2023
		ESCALA 1 : 4	HOJA 1/1

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN**

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Proyecto Fin de Grado

**DOCUMENTO III. PLIEGO DE
CONDICIONES**

**Autor: Mario Lozano Corona
Febrero – 2023**

INDICE DEL PLIEGO

1 OBJETO DEL PLIEGO	135
2 CONDICIONES GENERALES	136
2.1 CONDICIONES LEGALES	136
2.2 CONDICIONES ADMINISTRATIVAS	136
2.3 CONDICIONES FACULTATIVAS	136
2.4 CONDICIONES ECONÓMICAS	137
3 CONDICIONES TÉCNICAS PARTICULARES	138
3.1 CONDICIONES DE MATERIALES Y EQUIPOS	138
3.2 CONDICIONES DE EJECUCIÓN	138
3.3 CONDICIONES DE USO	138
3.4 TRABAJOS DEFECTUOSOS	138

1 OBJETO DEL PLIEGO

El presente pliego de condiciones establece los requisitos generales y condiciones necesarias para poder realizar la ejecución del proyecto desarrollado de manera correcta, así como las pautas técnicas y económicas para evitar posibles errores durante su realización.

El proyecto en cuestión es el diseño y fabricación de un molde realizado mediante impresión 3D de PLA que sirva para elaborar arrecifes artificiales de mortero.

Este documento especificará las condiciones técnicas, facultativas, económicas, administrativas y legales para tener en cuenta durante la realización del proyecto.

2 CONDICIONES GENERALES

2.1 CONDICIONES LEGALES

El contrato será realizado a través de un documento privado redactado entre el promotor del proyecto y el constructor, el cual incluirá las condiciones que se hayan acordado entre estos dos agentes. Estas condiciones deberán ser expresadas de forma clara y sin que haya opción a malas interpretaciones.

En los casos en los que el promotor del proyecto y el constructor no lleguen a un acuerdo, el caso será elevado hasta los Tribunales Administrativos.

Además, será de obligado cumplimiento el Real Decreto 1215/1997, decreto en el que se establecen las bases en cuanto a seguridad para los trabajadores.

2.2 CONDICIONES ADMINISTRATIVAS

Para tratar que el proyecto se desarrolle de la manera adecuada se establecerán los documentos necesarios para su elaboración.

- Resumen de todos los cálculos realizados en el proyecto, recogidos en el documento I, Memoria.
- Planos de detalle de los moldes, incluidos en el apartado planos.
- El pliego de condiciones, desarrollado en el presente documento.
- El presupuesto completo del proyecto.

2.3 CONDICIONES FACULTATIVAS

El promotor del proyecto es la persona encargada de impulsar y financiar el proyecto. Se trata del cliente.

El proyectista es la persona que redacta el proyecto, conforme a la normativa técnica y la reglamentación obligatoria.

El director del proyecto se encarga de la dirección y supervisión de las diferentes fases del proyecto. En este caso, la persona responsable de realizar estas tareas es el proyectista.

El constructor es el encargado de realizar la fabricación del molde. Asume contractualmente con el promotor la realización de esta tarea, con medios humanos y materiales. El constructor es responsable de cumplir con lo establecido en la documentación que se le facilite y, además, cumplir con las medidas de seguridad y prevención de riesgos laborales pertinentes.

2.4 CONDICIONES ECONÓMICAS

Este apartado será el que recoja las condiciones de pago de los diferentes trabajos realizados, y las maneras en las que éstos deben realizarse.

El contrato se firmará antes de que comience la ejecución de los trabajos encargados, y será firmado por el promotor y el constructor.

Los pagos deberán efectuarse en los plazos establecidos.

El presupuesto realizado contará con el coste total de fabricación (materiales, suministros, mano de obra, etc.) y con los impuestos correspondientes.

Este presupuesto deberá ser cumplido, es decir, no se podrá superar el coste de éste. En caso de que el presupuesto no se cumpla y los costes sean superiores, si el constructor no realizó ninguna observación previa, el sobre coste será asumido por él.

3 CONDICIONES TÉCNICAS PARTICULARES

3.1 CONDICIONES DE MATERIALES Y EQUIPOS

Para poder comenzar con la ejecución del proyecto, el constructor deberá informar sobre los materiales y equipos que utilizará. Deberá dar a conocer las especificaciones técnicas de la impresora o impresoras con las que llevará a cabo los trabajos, así como la procedencia, calidad y características técnicas del material que utilizará para llevar a cabo la impresión.

Este material no deberá ser utilizado en caso de presentar defectos o en caso de haber superado la vida útil establecida por el fabricante. Además, deberá ser almacenado conforme indique el fabricante.

3.2 CONDICIONES DE EJECUCIÓN

La fabricación de las diferentes paredes del molde serán fabricadas utilizando una impresora 3D de gran formato (FDM).

3.3 CONDICIONES DE USO

En cuanto al uso del producto realizado, es responsabilidad de la persona que lleve a cabo el moldeo o encofrado cumplir con lo establecido en este documento, para un correcto funcionamiento del molde, asegurando de esta manera su vida útil.

3.4 TRABAJOS DEFECTUOSOS

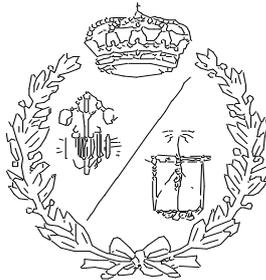
El encargado de la correcta ejecución del proyecto es el constructor. Por esto, será el responsable de cumplir con lo establecido y de la realización del proyecto de manera adecuada.

El constructor deberá disponer de todos los medios necesarios, así como de los materiales acordes a las exigencias, para que el resultado del proyecto satisfaga los requisitos preestablecidos.

En caso de que esto no sea así, será el único responsable, y por tanto deberá asumir las consecuencias y repetir el trabajo conforme a lo acordado.

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN**

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Proyecto Fin de Grado

DOCUMENTO IV. PRESUPUESTO

**Autor: Mario Lozano Corona
Febrero – 2023**

INDICE DEL PRESUPUESTO

1. INTRODUCCIÓN	142
2. COSTE DE LOS MATERIALES	143
3. COSTE DE LOS SUMINISTROS	144
4. COSTE DE LA MAQUINARIA	145
5. COSTE DEL SOFTWARE	146
6. COSTE DEL PERSONAL	147
7. PRESUPUESTO FINAL	148

1. INTRODUCCIÓN

El presente presupuesto contempla los diferentes costes asociados al diseño y fabricación del molde anteriormente descrito.

Se especificarán los costes debidos a los materiales necesarios, la maquinaria y los suministros consumidos durante el proceso de impresión. Además, se tendrán en cuenta los costes de las licencias de software y el tiempo de trabajo del personal necesario.

2. COSTE DE LOS MATERIALES

En este apartado se recogen todos los costes asociados a los materiales necesarios para la fabricación del molde.

En este caso, el único material necesario es el PLA, ya que el molde es producido mediante impresión 3D. Se tendrá en cuenta la cantidad necesaria para realizar las cuatro paredes del molde.

Tabla 1. Cantidad de material necesaria para realizar la impresión.

	Cantidad de material (Kg)
Pared 1	13,39
Pared 2	9,67
Material total (incluyendo las 4 paredes)	46,11

Tabla 2. Presupuesto de los materiales.

MATERIA PRIMA				
MATERIAL	CANTIDAD	UNIDAD DE MEDIDA	PRECIO UNITARIO	SUBTOTAL
PLA	46,112	Kg	20 €	922,24 €
Total				922,24 €

3. COSTE DE LOS SUMINISTROS

En este apartado se recogen todos los costes asociados a los suministros consumidos durante la fabricación del molde.

En este caso, el único suministro que se tendrá en cuenta es la electricidad consumida por la impresora.

Como se puede apreciar en la Tabla 3, el tiempo total necesario para realizar la impresión de las cuatro paredes que compondrán el molde es de 391,97 horas.

Además, en la Tabla 4 pueden verse la potencia de la impresora, parámetro necesario para los cálculos. Para realizar este cálculo, se decidió utilizar las características del modelo BIGREP ONE.

Tabla 3. Tiempos necesarios para realizar la impresión.

	Tiempo total (horas)
Pared 1	113,12
Pared 2	82,87
Tiempo total (incluyendo las 4 paredes)	391,97

Tabla 4. Potencia y energía consumida.

Potencia de la impresora	1,5 Kw
Tiempo de uso de la impresora	391,97 h
Energía consumida	587,95 Kwh

Tabla 5. Presupuesto de los suministros.

SUMINISTROS				
CONCEPTO	CANTIDAD	UNIDAD DE MEDIDA	PRECIO UNITARIO	SUBTOTAL
Electricidad	587,95	Kwh	0,2 €/Kwh	117,59 €

Total	117,59 €
-------	----------

4. COSTE DE LA MAQUINARIA

Para poder llevar a cabo la impresión 3D de las cuatro paredes del molde será necesario tener una impresora 3D, por lo que se deberá estudiar el coste de ésta.

En este caso se tendrá en cuenta el coste debido al uso que se le dé (coste de la amortización y de los mantenimientos), en lugar del coste total de la impresora.

Para realizar el cálculo del coste de la impresora, se decidió utilizar las características del modelo BIGREP ONE. Cabe destacar el precio de venta de esta unidad, el cual asciende hasta los cuarenta mil euros. En la Tabla 6 se pueden apreciar otra serie de características necesarias para el cálculo del presupuesto.

Tabla 6. Datos de la impresora.

BIGREP ONE	
Coste inicial	40000 €
Potencia	1,5 Kw
Vida media	10000 h
Valor residual	1000 €
Horas de uso anual	1000 h
coste revisión anual	500 €

Tabla 7. Presupuesto de la maquinaria.

COSTES DE LA MAQUINARIA		
CONCEPTO	COSTE A LA HORA	SUBTOTAL
Coste de amortización	0,0039	1,53 €
Coste de mantenimiento	0,5	195,98 €
Total		197,51 €

Para el cálculo del coste de amortización y de mantenimiento se han utilizado las siguientes expresiones:

$$\text{Coste amortización} = \frac{\text{Coste de compra} - \text{Valor residual}}{\frac{\text{Vida media}}{\text{Horas de uso anual}}} \quad (1)$$

$$\text{Coste mantenimiento} = \frac{\text{Coste revisión anual}}{\text{Horas de uso anual}} \quad (2)$$

5. COSTE DEL SOFTWARE

A lo largo de la elaboración del proyecto han sido utilizados cuatro softwares diferentes. Éstos han sido Microsoft Office, Autodesk Inventor, Ansys y Ultimaker Cura, por lo que los costes de sus licencias deberán ser tenidas en cuenta.

Tabla 8. Presupuesto de las licencias de software.

SOFTWARE			
LICENCIA	COSTE ANUAL	COSTE PRORRATEADO	SUBTOTAL
ULTIMAKER CURA	0	0,00	0,00 €
ANSYS	36390	2183,40	2183,40 €
AUTODESK INVENTOR	2886	173,16	173,16 €
Microsoft Office	70	4,20	4,20 €

Total	2360,76 €
-------	-----------

Como se puede apreciar en la Tabla 8, el coste de Ultimaker Cura es cero euros, ya que se trata de un software libre.

6. COSTE DEL PERSONAL

El coste debido al personal en este proyecto puede dividirse en dos tipos.

El primero de los tipos es el coste de ingeniería, es decir, coste por el trabajo realizado por un ingeniero en las labores de toma de datos, búsqueda de información e investigación, diseño y simulación. Estas labores son previas a la fabricación del propio molde.

En segundo lugar, pueden apreciarse costes debidos a las labores realizadas por un operario. Estas labores son la preparación del equipo y supervisión del proceso de impresión.

Tabla 9. Costes asociados a ingeniería.

COSTES INGENIERÍA				
MATERIAL	CANTIDAD	UNIDAD DE MEDIDA	PRECIO UNITARIO	SUBTOTAL
Toma de datos	2	Horas	50 €	100 €
Búsqueda de documentación/investigación	15	Horas	50 €	750 €
Horas de diseño	50	Horas	50 €	2500 €
Horas de simulación	35	Horas	50 €	1750 €

Total	5100 €
-------	--------

Tabla 10. Costes asociados a los operarios.

COSTES OPERARIOS				
MATERIAL	CANTIDAD	UNIDAD DE MEDIDA	PRECIO UNITARIO	SUBTOTAL
Preparación y supervisión de la impresión	40	Horas	20 €	800 €

Total	800 €
-------	-------

Tabla 11. Presupuesto del personal.

COSTES PERSONAL				
MATERIAL	CANTIDAD	UNIDAD DE MEDIDA	PRECIO UNITARIO	SUBTOTAL
COSTES INGENIERÍA	102	Horas	50 €	5100 €
COSTES OPERARIOS	40	Horas	20 €	800 €

Total	5900 €
-------	--------

7. PRESUPUESTO FINAL

En este apartado se incluyen todos los costes del proyecto, a modo de resumen.

Tabla 12. Presupuesto final.

PRESUPUESTO	
DESCRIPCIÓN	COSTE
Material	922,24 €
Maquinaria	197,51 €
Suministros	117,59 €
Software	2360,76 €
Personal	5900,00 €
Subtotal	9498,10 €
IVA 21%	1994,60 €
Total	11492,70 €

El coste total del proyecto de diseño y fabricación del molde fabricado mediante impresión 3D de PLA para fabricar arrecifes marinos artificiales asciende a once mil cuatrocientos noventa y dos euros con setenta (11492,70€).