



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Diseño y fabricación de modelo interactivo de estructuras para
uso docente mediante fabricación aditiva*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Jose Luis Espinosa Espada

DIRECTORES: Arturo González Gil
Andrés Suárez García

CURSO ACADÉMICO: 2022-2023

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Diseño y fabricación de modelo interactivo de estructuras para
uso docente mediante fabricación aditiva*

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Cuerpo General

UniversidadeVigo

RESUMEN

Numerosos estudios han demostrado las ventajas que tiene para los alumnos asistir a clases prácticas, ya que posibilita asimilar los conceptos básicos de las asignaturas de forma experimental. En los centros universitarios en los que se imparten asignaturas del ámbito de la ingeniería y arquitectura se realizan montajes de estructuras reticuladas empleando modelos interactivos. En la asignatura de “Teoría de Estructuras y Construcciones Industriales” que se cursa en el CUD-ENM se hace uso de unos kits de piezas que simulan ser estructuras parecidas a edificios y puentes. De esta forma, el alumno puede interactuar con los elementos comprobando por sí mismo como se comportan estas estructuras.

Estos kits a menudo son caros y presentan deformaciones permanentes con el paso del tiempo, por lo que es de interés diseñar y fabricar un modelo interactivo aprovechando las ventajas que ofrece la fabricación aditiva.

Se desarrolla un conjunto de piezas a partir de un análisis de los ya existentes. El desarrollo consiste en un proceso iterativo de diseño, fabricación y revisión que se repite hasta obtener un producto apto. La finalidad de este proyecto es obtener un modelo interactivo que pueda ser fabricado en las instalaciones del CUD-ENM.

PALABRAS CLAVE

Docencia, Proceso iterativo, Fabricación aditiva, Estructura, Diseño.

AGRADECIMIENTOS

El Trabajo de Fin de Grado es uno de los hitos que significa el fin de la etapa en la Escuela Naval Militar. Es momento de acordarse y agradecer a todas aquellas personas que me han apoyado durante estos años.

Mis primeras palabras de agradecimiento quiero que sean para mi familia por haber estado siempre presente y haberme ayudado en todo lo que he necesitado. En especial quiero acordarme de mi madre por haberme dado la educación que he recibido desde la infancia motivándome siempre a sacar lo mejor de mí, ya que sin su esfuerzo nunca hubiese llegado al lugar en el que estoy hoy.

También quiero dar las gracias a mis abuelos, quienes han sido para mí una fuente de inspiración para elegir la carrera de las armas.

No puedo olvidar a mi otra familia de Moaña, quienes me han apoyado día tras día durante los últimos dos años en la Escuela Naval Militar. Sobre todo, a mi pareja Aida quien ha sido y es un pilar fundamental.

Finalmente, agradezco a los profesores del Centro Universitario de la Defensa por habernos dedicado su tiempo, en especial a mis tutores del Trabajo de Fin de Grado.

CONTENIDO

Contenido	1
Índice de Figuras	3
Índice de Tablas.....	6
1 Introducción y objetivos.....	7
1.1 Contextualización.....	7
1.2 Motivación	8
1.3 Objetivos	8
1.4 Metodología	9
2 Estado del arte	11
2.1 Modelos interactivos para realizar montaje de estructuras	11
2.1.1 Mola Estructural	11
2.2 Otros modelos interactivos.....	13
2.2.1 Modelos interactivos de barras y elementos de unión	13
2.2.2 Modelos interactivos formados por la unión de placas	16
2.2.3 Conclusiones obtenidas de los diferentes modelos interactivos	16
2.3 Impresión 3D.....	17
2.3.1 Reseña histórica	17
2.3.2 Modelado por deposición fundida (FDM)	18
2.3.3 Estereolitografía (SLA)	19
2.3.4 Estereolitografía en máscara (MSLA)	20
2.3.5 Sinterización selectiva por láser (SLS).....	21
2.3.6 Fusión por haz de electrones (EBM)	21
2.3.7 Procesamiento digital de luz (DLP).....	22
3 Materiales y métodos.....	23

3.1 Metodología	23
3.2 Software de diseño	24
3.2.1 Reseña histórica de los programas de diseño	24
3.2.2 Autodesk Inventor como herramienta de diseño	25
3.3 Resina.....	25
3.3.1 Impresora de resina	25
3.3.2 Software necesario para fabricar piezas con resina	27
3.3.3 Variedad de resinas disponibles.....	28
3.4 Filamento	29
3.4.1 Impresora de filamento	29
3.4.2 Software necesario para fabricar piezas con filamento	31
3.4.3 Variedad de filamentos disponibles.....	33
4 Definición de requisitos y desarrollo.....	35
4.1 Selección del método de unión empleado y definición de requisitos	35
4.1.1 Requisitos de la esfera	35
4.1.2 Requisitos barra	36
4.2 Diseños preliminares.....	36
4.2.1 Primer diseño	36
4.2.2 Segundo diseño	38
4.2.3 Tercer diseño	43
4.2.4 Cuarto diseño	47
4.3 Selección del diseño final	60
5 validación del modelo interactivo obtenido	62
5.1 Montaje de estructuras	62
6 Conclusiones y líneas futuras	65
6.1 Conclusiones	65
6.2 Líneas futuras	66
7 Bibliografía.....	67
Anexo I: Implicaciones Sociales, y/o Económicas, y/o Ambientales	70
Anexo II: Reflexiones Éticas y Sociales	72
Anexo III: Planos.....	73

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1. Diagrama de flujo del proceso iterativo empleado en el desarrollo del producto final (Fuente: Elaboración propia)	9
Figura 2-1. Ejemplo de montaje realizado [4] (Fuente: Mola Estructural)	11
Figura 2-2. Estructura con piezas triangulares que transforman el nudo articulado en nudo fijo (Fuente: Mola Estructural)	12
Figura 2-3. Kit Estructural Mola 2 [4] (Fuente: Mola Estructural)	12
Figura 2-4. Kit Estructural Mola 2 [4] (Fuente: Mola Estructural)	12
Figura 2-5. Kit estructural Mola 3 [4] (Fuente: Mola Estructural)	13
Figura 2-6. Kit de piezas Zometool [5] (Fuente: Zometool)	13
Figura 2-7. Kit de piezas Beicarín [6] (Fuente: Beicarín)	14
Figura 2-8. Kit de piezas Geomag [7] (Fuente: Geomag)	14
Figura 2-9. Kit de piezas TinyLand [8] (Fuente: TinyLand)	15
Figura 2-10. Kit de piezas Flexistick [9] (Fuente: Flexistick)	15
Figura 2-11. Kit de piezas Magnatile [10] (Fuente: Magnatile)	15
Figura 2-12. Kit de piezas Magformers [11] (Fuente: Magformers)	16
Figura 2-13. Proceso de ‘Photoesculpture’ [12]	17
Figura 2-14. Mapa topográfico sobre placas de cera [13]	17
Figura 2-15. Impresora 3D Makerbot [16]	18
Figura 2-16. Impresora Reprap [16]	19
Figura 2-17. Impresora 3D SLA (estereolitografía) [17]	20
Figura 2-18. Relación entre el tiempo de impresión y el tamaño de un cubo en mm² [17]	20
Figura 2-19. Pieza fabricada mediante SLS [16]	21
Figura 2-20. Impresora por haz de electrones [16]	22
Figura 2-21. Impresora de procesamiento digital por luz [18]	22
Figura 3-1. Diagrama de flujo que indica la metodología a seguir en el desarrollo del TFG (Fuente: Elaboración propia)	23
Figura 3-2. Sistema Sketchpad [19]	24
Figura 3-3. Ejemplo de ensamblaje realizado con Autodesk Inventor	25
Figura 3-4. Impresora Creality LD-002H [21]	26
Figura 3-5. Interfaz de trabajo del software Chitubox	28
Figura 3-6. Resina estándar celeste [24]	28
Figura 3-7. Resina azul transparente [24]	29
Figura 3-8. Resina flexible [25]	29
Figura 3-9. Artillery Sidewinder X1 [26]	30

Figura 3-10. Esfera sobre cama de impresión y desplegable que muestra los ajustes a configurar (Fuente: Elaboración propia)	32
Figura 3-11. Vista previa en Cura (Fuente: Elaboración propia)	33
Figura 3-12. Filamento PETG negro [28].	34
Figura 4-1. Primer diseño de la esfera (Fuente: Elaboración propia).....	37
Figura 4-2. Semiesfera con salientes (Fuente: Elaboración propia).....	37
Figura 4-3. Ensamble de dos semiesferas (Fuente: Elaboración propia)	38
Figura 4-4. Segundo diseño de la esfera (Fuente: Elaboración propia)	39
Figura 4-5. Esfera 30 mm impresa mediante FDM con fallo de impresión en la parte superior (Fuente: Elaboración propia)	39
Figura 4-6. Esfera 30 mm impresa mediante SLA con resina estándar celeste (Fuente: Elaboración propia)	40
Figura 4-7. Barra con saliente (Fuente: Elaboración propia)	41
Figura 4-8. Barra con extremo cilíndrico (Fuente: Elaboración propia)	41
Figura 4-9. Barra 2 impresa mediante FDM (Fuente: Elaboración propia)	42
Figura 4-10. Esfera 60 mm impresa mediante FDM con fallo de impresión en la parte superior (Fuente: Elaboración propia)	44
Figura 4-11. Esfera 60 mm impresa mediante FDM (Fuente: Elaboración propia).....	44
Figura 4-12. Esfera 60 mm impresa mediante SLA. (resina estándar)	45
Figura 4-13. Barra 3 impresa mediante FDM (Fuente: Elaboración propia)	46
Figura 4-14. Cuarto diseño de la esfera (Fuente: Elaboración propia).....	47
Figura 4-15. Parte crítica de la esfera del cuarto diseño (Fuente: Elaboración propia)	48
Figura 4-16. Esfera de 45mm impresa mediante SLA (Fuente: Elaboración propia)	49
Figura 4-17. Esfera 45mm representada en el <i>software</i> que se usa para configurar los parámetros de impresión (Fuente: Elaboración propia)	49
Figura 4-18. Prueba de impresión con resina flexible. de dos esferas representadas en el <i>software</i> de uso previo a la impresión (Fuente: Elaboración propia)	50
Figura 4-19. Fallo de impresión esferas de resina flexible (Fuente: Elaboración propia)	50
Figura 4-20. Esfera de 45 mm impresa mediante SLA (Fuente: Elaboración propia)	51
Figura 4-21. Esfera de 45 mm impresa mediante FDM (Fuente: Elaboración propia).....	51
Figura 4-22. Diseño de la barra de prueba (Fuente: Elaboración propia)	52
Figura 4-23. Barra de prueba impresa mediante SLA (Fuente: Elaboración propia).....	53
Figura 4-24. Cabeza de la barra 4 con forma de tronco de cono (Fuente: Elaboración propia).....	54
Figura 4-25. Barras de diseño 4 sobre base de impresión, orientadas diagonalmente para evitar que salgan de la superficie de impresión (Fuente: Elaboración propia)	54
Figura 4-26. Barras de diseño 4 impresa mediante SLA (Fuente: Elaboración propia).....	55
Figura 4-27. Barras de diseño 4 impresa mediante SLA (Fuente: Elaboración propia).....	56
Figura 4-28. Barra de diseño 4 impresa mediante FDM (Fuente: Elaboración propia).....	57

Figura 4-29. Cabeza de la barra 4 para la estructura de filamento (Fuente: Elaboración propia)....	57
Figura 4-30. Barra de diseño 4 impresa mediante FDM, con modificación en el extremo para permitir una correcta unión (Fuente: Elaboración propia).....	58
Figura 4-31. Soporte de la estructura (Fuente: Elaboración propia)	58
Figura 4-32. Soporte de la esfera fabricado mediante SLA (Fuente: Elaboración propia)	60
Figura 4-33. Soporte de la esfera fabricado mediante FDM (Fuente: Elaboración propia)	60
Figura 5-1. Nave industrial formada por diferentes pórticos (Fuente: Página web de la empresa de construcción de naves industriales “Gilva”)	63
Figura 5-2. Pórtico formado con las piezas de resina (Fuente: Elaboración propia)	63
Figura 5-3. Puente de cerchas (Fuente: Página web revista digital de arquitectura).....	64
Figura 5-4. Puente de cerchas construido con el kit desarrollado (Fuente: Elaboración propia).....	64

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1. Métodos de unión (Fuente: Elaboración propia).....	16
Tabla 3-1. Especificaciones técnicas Creality LD-002H [21].....	27
Tabla 3-2. Especificaciones técnicas Artillery Sidewinder X1 [26]	31
Tabla 4-1. Características de la esfera (Fuente: Elaboración propia).....	36
Tabla 4-2. Características de la esfera 2 (Fuente: Elaboración propia).....	38
Tabla 4-3. Parámetros impresión esfera 2 mediante FDM (Fuente: Elaboración propia).....	39
Tabla 4-4. Parámetros impresión esfera 2 mediante SLA (Fuente: Elaboración propia).....	40
Tabla 4-5 Características de la barra 2 (Fuente: Elaboración propia)	42
Tabla 4-6. Parámetros impresión barra 2 mediante FDM (Fuente: Elaboración propia)	42
Tabla 4-7. Características de la esfera 3 (Fuente: Elaboración propia).....	43
Tabla 4-8. Parámetros impresión esfera 3 mediante FDM (Fuente: Elaboración propia).....	43
Tabla 4-9. Parámetros impresión esfera 3 mediante SLA (Fuente: Elaboración propia).....	45
Tabla 4-10. Características de la barra 3 (Fuente: Elaboración propia)	46
Tabla 4-11. Parámetros de impresión de la barra 3 mediante FDM (Fuente: Elaboración propia) .	46
Tabla 4-12. Características de la esfera 4 (Fuente: Elaboración propia).....	47
Tabla 4-13. Parámetros de impresión esfera 4 (Fuente: Elaboración propia)	48
Tabla 4-14. Parámetros de impresión de la esfera 4 impresa mediante FDM (Fuente: Elaboración propia)	52
Tabla 4-15. Características de la barra de prueba (Fuente: Elaboración propia)	53
Tabla 4-16. Parámetros de impresión de la barra de prueba (Fuente: Elaboración propia)	53
Tabla 4-17. Características de la barra 4 (Fuente: Elaboración propia)	55
Tabla 4-18. Parámetros de impresión de la barra 4 impresa mediante SLA (Fuente: Elaboración propia)	55
Tabla 4-19. Parámetros de impresión de la barra 4 impresa mediante FDM (Fuente: Elaboración propia)	56
Tabla 4-20. Soportes de la estructura (Fuente: Elaboración propia)	58
Tabla 4-21. Parámetros de impresión de los soportes de la estructura para impresora SLA (Fuente: Elaboración propia).....	59
Tabla 4-22. Parámetros de impresión de los soportes de la estructura para impresión FDM (Fuente: Elaboración propia).....	59
Tabla 5-1. Precio del kit fabricado mediante SLA (Fuente: Elaboración propia).....	62

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Contextualización

Definir que es aprender y cuál es la mejor forma de hacerlo ha sido siempre un reto para el ser humano. Platón, fue uno de los primeros autores en mostrar su inquietud sobre este campo. En su obra “Menón” que data del año 420 a.C. se plantea preguntas sobre cómo adquirimos conocimientos, cuál es la fuente del conocimiento o qué debemos hacer para aprender algo nuevo:

“Entiendo, Menón lo que dices... Arguyes que el hombre no puede inquirir acerca de lo que sabe, más tampoco de lo que ignora, porque si sabe, no tiene razón de inquirir lo que ya sabe; y si no, no puede hacerlo, puesto que no conoce la propia materia sobre la que ha de investigar”

El uso de clases prácticas como técnica de aprendizaje es de vital importancia para que el alumno pueda asimilar los conceptos que se imparten de forma teórica. En los centros en los que se cursan estudios superiores de ingeniería estas sesiones ofrecen al alumno la posibilidad de reforzar lo aprendido, afianzar conocimientos de manera interactiva y desarrollar habilidades de investigación y resolución de problemas [1]. En la enseñanza de ingeniería, el dominio de los conceptos y principios básicos es de vital importancia para adquirir los conocimientos. En ocasiones los métodos tradicionales de enseñanza, basados en la exposición de diapositivas, provocan que los estudiantes pierdan la concentración durante las clases y acaben memorizando el temario para aprobar la asignatura sin llegar a comprender y asimilar los conceptos que se imparten. Esta deficiencia en la educación perjudica al alumno, ya que dificulta la comprensión de futuras asignaturas, el desarrollo de trabajos posteriores e incluso su desempeño en la vida laboral.

Numerosos estudios han demostrado que realizar prácticas en el laboratorio permite mejorar la capacidad de aprendizaje de los alumnos mejorando ciertas habilidades cognitivas como; el pensamiento crítico, resolución de problemas, aplicación, análisis y síntesis. Uno de los estudios que demuestran esto es “*The role of laboratory experiences in teaching and learning of science*”, publicado por la revista “*American Journal of Physics*” en 1998 [2]. Este estudio afirma que las experiencias de laboratorio son una forma eficaz de comprensión de la materia.

El artículo “*An impact of simulation labs on engineering students’ academic performance*” publicado en la revista “*Journal of Engineering, Design and Techonlogy*” [3] confirmó la mejora de rendimiento entre los alumnos que asistían a los laboratorios de simulación en su artículo. Su trabajo de investigación tenía como propósito conocer el impacto académico que tendrían los laboratorios de simulación en una carrera de ingeniería. Para ello se seleccionaron 270 estudiantes que fueron divididos en dos grupos. Por un lado, estaban los primeros 135 a quienes no asistieron a ningún laboratorio y por otro los 135 restantes quienes acudieron a los laboratorios de simulación. El análisis comparativo que se

realizó con posterioridad confirmó que los que asistían a dichas clases mejoraban su rendimiento en diferentes parámetros como el análisis de problemas, la síntesis y la evaluación de resultados. De esta forma se encontró una relación directa entre el rendimiento académico y la aplicación práctica de la materia.

En los grados que tienen relación con la ingeniería y la arquitectura se hace uso de modelos físicos que ayudan a comprender los conceptos básicos y mejorar el diseño de estructuras complejas. En el grado de ingeniería mecánica que se imparte en el Centro Universitario de la Defensa (CUD-ENM) se realizan clases prácticas en los laboratorios con el fin de desarrollar las habilidades anteriormente mencionadas. No es suficiente con realizar un estudio de estructuras reticulares, con nudos rígidos y articulados, empleando herramientas *software* de análisis. Además, es necesario hacer uso de modelos tangibles que permitan a los alumnos un aprendizaje eficiente y eficaz.

Concretamente en la asignatura de “Teoría de Estructuras y Construcciones Industriales”, el aprendizaje experimental del alumnado está basado en el montaje de estructuras que permiten al alumno familiarizarse con la asignatura y asimilar los conceptos en profundidad. En las sesiones de laboratorio de esta asignatura que se imparte a los alumnos de cuarto curso del CUD-ENM, se hace uso del modelo interactivo fabricado por “Mola Estructural” [4]. Esta herramienta presenta una serie de inconvenientes que se tratarán de resolver durante el desarrollo del Trabajo de Fin de Grado (TFG) mediante un proceso iterativo de diseño, impresión 3D y revisión de los resultados obtenidos hasta desarrollar un modelo propio.

1.2 Motivación

Como queda recogido en la guía docente “el objetivo de la asignatura es dotar al alumno de los conocimientos básicos para el análisis y el diseño de los elementos y sistemas estructurales más frecuentes en las construcciones industriales”.

La teoría de estructuras analiza la capacidad de resistir cargas sin que se deformen. Por este motivo hacer uso de modelos interactivos que simulen estructuras reales facilita el proceso de enseñanza. Sin embargo, la oferta de estos productos es escasa y los precios de estos kits son bastante elevados.

El CUD-ENM cuenta en sus instalaciones con dos modelos interactivos diferentes que usan los alumnos en las sesiones de laboratorio para el desarrollo de las prácticas y que son de gran utilidad para cumplir con la función docente del profesorado. Estos kits no son perfectos y presentan una serie de inconvenientes como la deformación que sufren las piezas, las limitaciones estructurales que presentan o su fragilidad, lo que nos lleva a buscar alternativas.

La necesidad del TFG se basa en la obtención de un modelo interactivo que cumpla con una serie de requisitos estructurales y dimensionales que lo hagan adecuado para complementar los modelos actuales. Además, debe ser apto para su uso en sesiones de laboratorio. Conseguir un kit mucho más económico y que se pueda fabricar en las instalaciones del CUD-ENM permitirá aprovechar las ventajas que nos ofrece la impresión 3D.

1.3 Objetivos

El objetivo principal del TFG es diseñar y fabricar manera interactiva estructuras para hacer uso de ellas en las sesiones prácticas del CUD-ENM y que sea fabricado mediante impresión 3D. Para llegar a desarrollar el producto final se deben ir alcanzando una serie de objetivos parciales que se mencionan a continuación:

- El modelo fabricado debe estar formado por barras, que simulen ser vigas y pilares, y por nudos que hagan de enlace entre estos dos elementos. La estructura no debe centrarse únicamente en la unión de piezas, también tiene que simular ser una estructura real que permita analizar de forma experimental las deformaciones que sufre.

- Una vez montada la estructura tiene que poder apoyarse correctamente para que esté estable en la superficie de apoyo simulando ser un apoyo articulado fijo.
- Las piezas se deben elaborar haciendo uso de la fabricación aditiva. De esta forma se pueden almacenar los archivos en un dispositivo de memoria para que imprimirlos a posteriori tantas piezas como se necesiten. Así, se llevarán a cabo montajes de estructuras más complejas.

Además, se deben cumplir otros objetivos secundarios de menor relevancia, pero que son de utilidad en el desarrollo del TFG:

- Conocer las tolerancias de las piezas fabricadas mediante impresión 3D. Para conseguir buenos resultados de fabricación que mejoren la calidad del producto final.
- Avanzar en el conocimiento de la fabricación 3D enfrentando los problemas que se presentan y resolviéndolos de la manera más adecuada.

Para conseguir cumplir todos estos objetivos se siguen escrupulosamente el procedimiento que veremos a continuación.

1.4 Metodología

Para llegar a alcanzar el producto final se siguen una serie de pasos que se irán explicando y desarrollando, son los siguientes:

- Análisis de la oferta en el mercado de los modelos interactivos de estructuras. Para tener un conocimiento de las diferentes opciones existentes y analizar las similitudes y diferencias entre ellos.
- Selección del método de unión que se empleará en nuestras piezas basado en los que se usan en los kits vistos anteriormente.
- Una vez en este punto comienza el proceso iterativo explicado en la Figura 1-1. Se diseña la pieza, se imprime (con filamento y con resina) y se revisa. Si no cumple con los requisitos se vuelve a la fase de diseño. Sin embargo, si cumple con los requisitos se selecciona como producto final el conjunto de piezas cuyo material (resina o filamento) sea más adecuado para el montaje de la estructura.

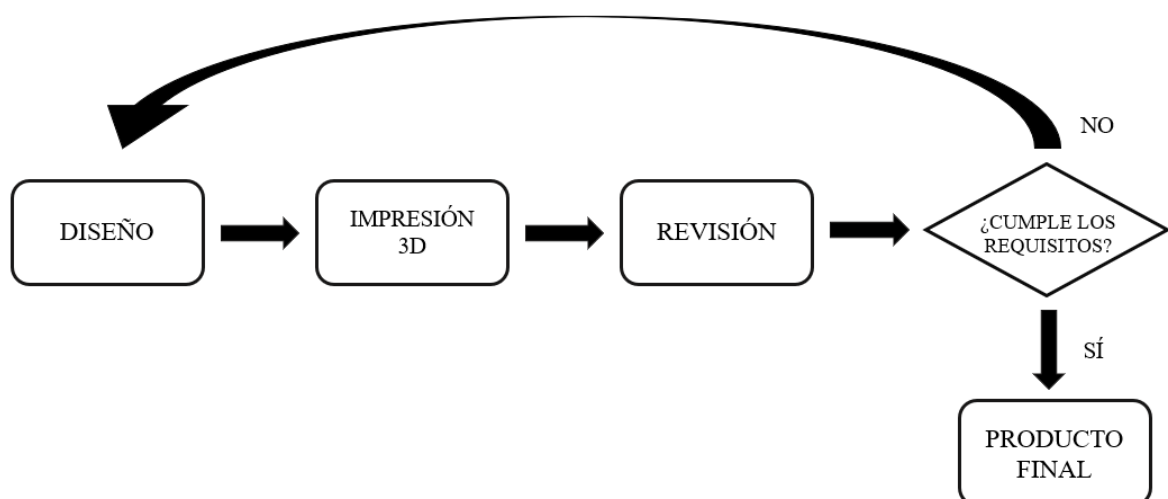


Figura 1-1. Diagrama de flujo del proceso iterativo empleado en el desarrollo del producto final (Fuente: Elaboración propia)

- En último lugar, se lleva a cabo la validación y análisis de los resultados y se exponen unas conclusiones sobre el proyecto.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Modelos interactivos para realizar montaje de estructuras

2.1.1 *Mola Estructural*

Actualmente es el modelo estructural que se usa en los laboratorios del CUD-ENM. Fue diseñado por Márcio Sequeira, en su etapa de estudiante de Arquitectura. Mola Estructural es una herramienta muy empleada en centros de formación de estudios superiores, su uso es habitual en carreras como; ingeniería civil, industrial, o arquitectura. El kit cuenta con un conjunto de elementos modulares e imanes con las que se pueden construir diferentes combinaciones de uniones para construir sistemas estructurales, como se puede ver en la Figura 2-1.

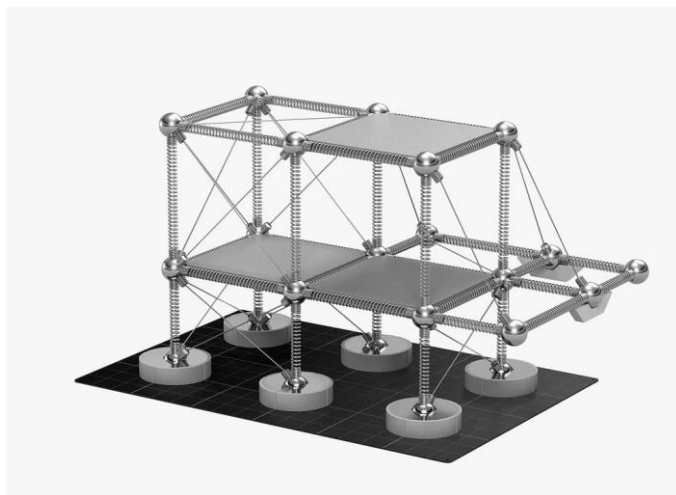


Figura 2-1. Ejemplo de montaje realizado [4] (Fuente: Mola Estructural)

El modelo interactivo cuenta con unas piezas con forma de muelle que simulan ser vigas o pilares, están imantadas en sus extremos para permitir la unión con las esferas. También hay alambres para crear arriostramientos en las estructuras que permiten transferir la tensión y dispersar la carga. Además, existe la posibilidad de convertir los nudos articulados en fijos haciendo uso de unas piezas triangulares [ver Figura 2-2]. En último lugar, este modelo cuenta con piezas cilíndricas de apoyo [4].

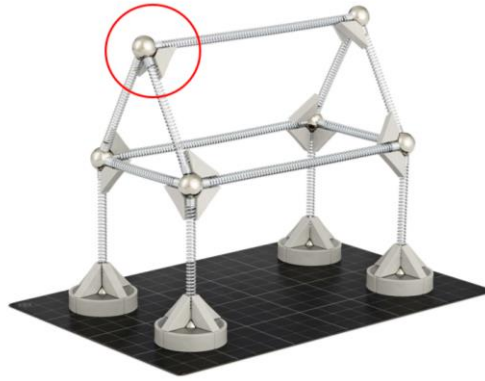


Figura 2-2. Estructura con piezas triangulares que transforman el nudo articulado en nudo fijo (Fuente: Mola Estructural)

Actualmente están en venta 3 modelos diferentes:

- Kit Estructural Mola 1

Es el modelo más económico que se puede adquirir. El pack de la Figura 2-3 tiene un coste de 179 \$.



Figura 2-3. Kit Estructural Mola 2 [4] (Fuente: Mola Estructural)

- Kit Estructural Mola 2

El modelo de la Figura 2-4 es el intermedio, se puede comprar el kit de en la página web por 189 \$. Cuenta con algunas piezas más que el anterior, por lo que se pueden conseguir estructuras algo más complejas.



Figura 2-4. Kit Estructural Mola 2 [4] (Fuente: Mola Estructural)

- Kit Estructural Mola 3

Es el más sofisticado, su precio es el más elevado de todos. Está a la venta por 199 \$. Como se puede ver en la Figura 2-5 con este modelo se puede construir un puente. El coste de comprar los 3 modelos por separado es de 567 \$, no obstante, es posible adquirir el pack de los 3 con un coste de 529 \$.



Figura 2-5. Kit estructural Mola 3 [4] (Fuente: Mola Estructural)

Todos estos kits son muy parecidos entre ellos. La diferencia de precio se debe a que los más caros contienen mayor número de piezas

2.2 Otros modelos interactivos

Tras haber realizado una investigación exhaustiva sobre productos similares al kit Mola Estructural que se pudieran emplear en grados de ingeniería mecánica de otras universidades se llega a la conclusión de que la oferta de estos productos es bastante limitada. Los modelos interactivos disponibles en el mercado son limitados. No obstante, existen una gran variedad de juegos infantiles con características muy similares a las de este kit. En estos se utilizan barras y diferentes elementos de unión (bolas imantadas, esferas con orificios y piezas con forma de estrella) que permiten configurar una amplia gama de estructuras. A continuación

2.2.1 Modelos interactivos de barras y elementos de unión

- **Zometool**

Es una empresa dedicada a la venta de kits de piezas de construcción [ver Figura 2-6] . Las barras que emplean se introducen en las esferas para conseguir la unión entre sus elementos formando nudos. Al ser estos elementos longitudinales demasiado cortos no permiten analizar las deformaciones a las que está sometida la estructura. Además, la estructura no tiene ningún tipo de soporte que permita simular un apoyo articulado fijo [5].

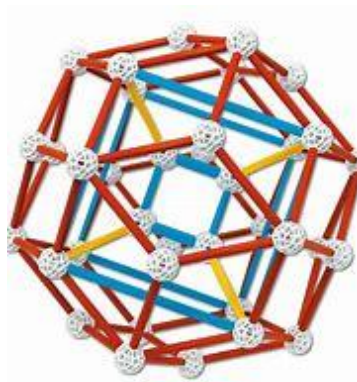


Figura 2-6. Kit de piezas Zometool [5] (Fuente: Zometool)

- Beicarín

Beicarín es un juego infantil que permite realizar montaje de estructura haciendo uso de dos tipos de piezas, barras y esferas imantadas. Al unir estos elementos entre sí se pueden crear estructuras reticulares. No obstante, las barras no son lo suficientemente largas como para apreciar deformaciones experimentalmente [ver Figura 2-7] y al igual que en el kit anterior no existen piezas de apoyo [6].

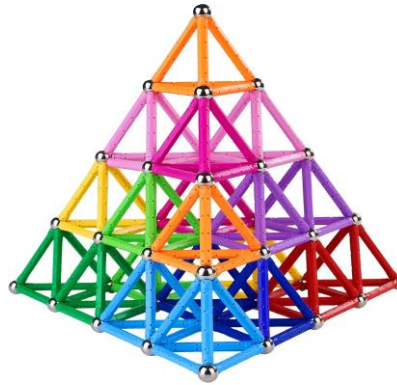


Figura 2-7. Kit de piezas Beicarín [6] (Fuente: Beicarín)

- Geomag

Es similar al kit de pizas Beicarín, visto anteriormente. Está formado por barras y esferas imantadas como se puede ver en la Figura 2-8. La unión de sus elementos permite construir estructuras reticulares a partir de la unión de sus piezas. La longitud de las barras no es la suficiente como para poder analizar experimentalmente el comportamiento de la estructura. Este kit tampoco cuenta con piezas de apoyo que permitan sostener las estructuras elaboradas [7].

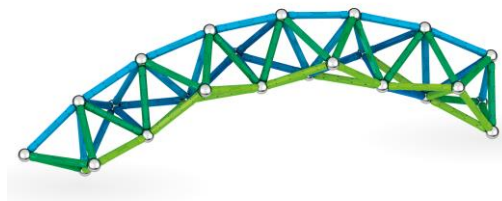


Figura 2-8. Kit de piezas Geomag [7] (Fuente: Geomag)

- Tinyland

Este kit de piezas está formado por barras y figuras esféricas con orificios [ver Figura 2-9], al igual que Zometool. Los elementos que componen este juego infantil se unen introduciendo las barras en los orificios de la esfera, lo que da lugar a la posibilidad de elaborar estructuras con nudos reticulados. En este caso las barras son largas y finas (esbeltas), lo que permite analizar experimentalmente las deformaciones y esfuerzos a los que se somete la estructura. Sin embargo, no cuenta con una pieza que permita realizar un apoyo firme sobre la superficie y que simule ser un apoyo articulado.



Figura 2-9. Kit de piezas TinyLand [8] (Fuente: TinyLand)

- Flexistick

Este kit cuenta con una serie de barras y elementos de unión [ver Figura 2-10]. Las barras al igual que en el modelo anterior son lo suficientemente largas y finas. La principal diferencia que tiene con kit TinyLand es que la pieza que se usa para unir las barras no es una esfera, es un elemento de silicona con forma de estrella en la que se introducen los elementos longitudinales para crear los nudos de la estructura. Al igual que en todos los vistos anteriormente este conjunto tampoco cuenta con los elementos de apoyo [9].

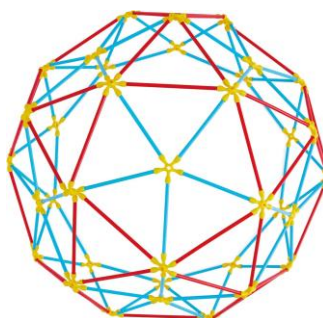


Figura 2-10. Kit de piezas Flexistick [9] (Fuente: Flexistick)

- Magnatile

Este conjunto de piezas es parecido al anterior como se puede ver en la Figura 2-11, su principal diferencia está en que se pueden emplear piezas cuadrangulares además de las triangulares. Por lo tanto, no se pueden simular estructuras de nudos rígidos o articulados. Tampoco existe la posibilidad de apoyar la pieza a la superficie con una pieza específica para esto [10].



Figura 2-11. Kit de piezas Magnatile [10] (Fuente: Magnatile)

2.2.2 Modelos interactivos formados por la unión de placas

- Magformers

Es un conjunto de piezas triangulares y cuadrangulares con las que se pueden crear diferentes formas geométricas. Como podemos ver en la Figura 2-12 con este tipo de piezas el número de construcciones a realizar sería limitado. Además, el uso docente no sería el más adecuado ya que no se pueden realizar estructuras con nudos fijos o articulados que simulen ser construcciones similares a puentes o edificios [11].



Figura 2-12. Kit de piezas Magformers [11] (Fuente: Magformers)

2.2.3 Conclusiones obtenidas de los diferentes modelos interactivos

Los modelos interactivos que se encuentran disponibles en el mercado suelen ser juguetes infantiles, que presentan ciertas similitudes en los métodos de unión que emplean como se puede ver en la Tabla 2-1.

Métodos de unión	
Zometool	Esfera con orificios en los que se introducen las barras
Beicarín	Imanes esféricos de polo opuesto al imán del extremo de la barra
Magformers	Imanes en las aristas de las piezas
Magnatile	Imanes en las aristas de las piezas
Geomag	Imanes esféricos de polo opuesto al imán del extremo de la barra
Tiny Land	Esfera con orificios en los que se introducen las barras
Flexistick	Uniones en forma de estrella con extremos de silicona

Tabla 2-1. Métodos de unión (Fuente: Elaboración propia)

Por una parte, hemos comprobado como la oferta de kits formados por barras unen sus elementos empleando tres métodos diferentes de unión; piezas imantadas, esferas con orificios en la que se introduce la barra y pieza de silicona con forma de estrella. Algunos de estos tienen las barras demasiado cortas, lo que imposibilita su uso docente. Sin embargo, otras sí que tienen barras largas y finas que permiten emplearlas en las sesiones prácticas, pero presentan ciertos inconvenientes como la falta de apoyos.

Por otra parte, existen modelos interactivos formados por placas imantadas en sus extremos que permiten realizar montaje de estructuras. Estas piezas pueden ser útiles para realizar ciertas partes de la

estructura, pero no tienen barras que se unan entre sí formando estructuras reticulares que simulen ser puentes o edificios.

2.3 Impresión 3D

2.3.1 Reseña histórica

Aunque la impresión 3D parezca una tecnología novedosa y reciente tiene su origen en 1861. El parisino Françoise Willemé, quien se dedicó a la fotografía y a la escultura patentó un proceso llamado “*Photoesculpture*” [ver Figura 2-13]. Este proceso consistía en instalar 24 cámaras de fotografía alrededor de un domo de vidrio. De esta forma consiguió una imagen de alta precisión del objeto fotografiado a partir de las vistas parciales de cada una de las cámaras que tomaban imágenes del interior del domo [12].

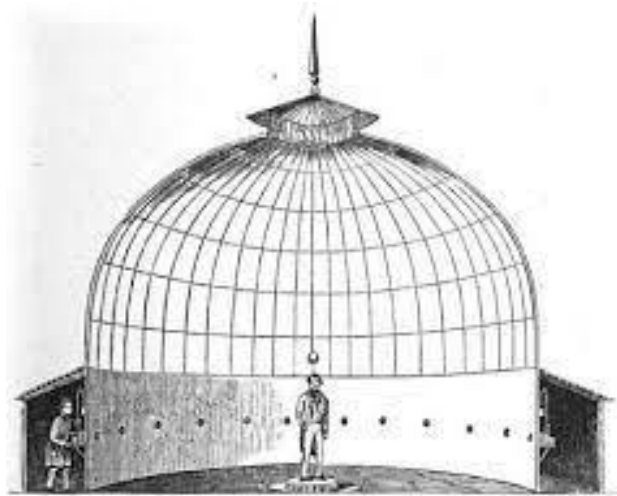


Figura 2-13. Proceso de ‘Photoesculpture’ [12]

Esta técnica no consistía en crear ningún objeto mediante fabricación aditiva, pero es de interés mencionarlo ya que fue el primer paso de esta nueva tecnología.

En 1892 Joseph E. Blather presentó la primera patente de prototipado rápido llamada “*Manufacture of contour relief maps*”. El método consistía en imprimir las líneas de nivel de un mapa topográfico sobre una serie de placas de cera [ver Figura 2-14]. Las secciones resultantes se cortaban, apilaban y alisaban para formar el modelo de relieve tanto positivo como negativo. En último lugar, se situaba un mapa de papel impreso entre las formas positivas y negativas a modo de prensa para crear el mapa en relieve [13].



Figura 2-14. Mapa topográfico sobre placas de cera [13]

En 1980 el japonés Hideo Kodama, miembro del Instituto Municipal de Investigaciones industriales de Nagoya desarrolló la primera tecnología de impresión 3D. Consistía en exponer un polímero fotoendurecible a rayos UV, cuyo área de exposición era controlado mediante un patrón de máscara.

Kodama no llegó a comercializar su impresora 3D por no cumplir los plazos para presentar la especificación completa de la patente [14].

La “Oficina de Patentes de Estados Unidos” otorgó a Chuck Hull la primera patente de impresión 3D. La impresora desarrollada utiliza luz láser ultravioleta para endurecer los líquidos sensibles a la luz, esta tecnología se conoce como estereolitografía (SLA) y hoy en día sigue siendo un proceso de impresión muy utilizado [15].

En 1989 se registraron varias patentes por partes de diferentes desarrolladores por lo que se consiguió un gran avance en este campo. Los principales fueron los siguientes;

- Sinterización por láser (SLS); Patentado por Carl Deckard, proceso por el que se funde un polvo de plástico mediante una luz láser de alta potencia. La luz láser forma estructuras sólidas sinterizando partículas de polvo.
- Modelado por deposición fundida (FDM); Patentado por Scott Crump. Consiste en depositar capas de plástico fundido a través de una boquilla a elevada temperatura que funde el material creando una pieza capa a capa.

Esta tecnología ha avanzado a pasos agigantados hasta nuestros días permitiendo crear piezas empleando una gran variedad técnicas y haciendo uso de una amplia gama de materiales. El desarrollo de esta herramienta ha permitido reducir el precio las impresoras 3D haciéndolas asequibles a particulares.

2.3.2 Modelado por deposición fundida (FDM)

El modelado por deposición fundida es la tecnología más común en impresión 3D ya que es la más simple de las posibilidades. Utiliza diferentes plásticos como el acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) o el ácido poliláctico (PLA).

Este tipo de impresoras utilizan un motor de impresión basado en las coordenadas cartesianas para crear los objetos. Hay varios tipos de impresión FDM, dos de las más comunes son el estilo *Makerbot*, que emplea un cabezal de impresión X e Y de plano fijo y una cama de impresión en el eje Z. [ver Figura 2-15] [16].



Figura 2-15. Impresora 3D Makerbot [16]

El otro estilo es el *Reprap* [ver Figura 2-16]. En estas máquinas tenemos el eje X de plano fijo, el eje Y que se controla moviendo la cama de impresión y el Z que se logra moviendo el sistema del cabezal verticalmente.

En ambas impresoras el cabezal funciona de la misma manera, es un tubo metálico con un calefactor por el que pasa el filamento. El material se derrite y se aplica presión lo que provoca que el plástico se extruya a través de la boquilla. La primera capa se deposita sobre la cama de impresión creando la base

del objeto, las siguientes capas se irán depositando sobre la anterior consiguiendo que se fusionen entre ellas gracias a las propiedades del plástico empleado. Según la resolución del objeto que se desee imprimir se emplearán más o menos capas, es decir, puede que un objeto de 10 cm de altura tenga 300 capas o 900. Un número más elevado de capas implica que el tiempo de impresión sea mayor. Cabe destacar que la resolución de la pieza también estará limitada por la boquilla de la impresora, no se pueden realizar detalles de 0,5 mm si el ancho de la boquilla es de 1 mm [16].

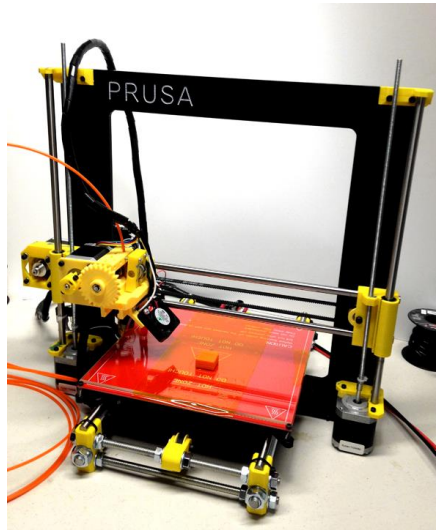


Figura 2-16. Impresora Reprap [16]

Los *softwares* de las impresoras FDM tienen capacidad de crear soportes para permitir construir ciertos objetos. Estos soportes se hacen de tal forma que no adquieran la misma resistencia de la pieza para que se puedan eliminar fácilmente al acabar de imprimirla. Los soportes deben ser los mínimos imprescindibles, ya que esto supone un consumo de material que llevará a un aumento de coste. Además, al separar el soporte de la pieza quedan imperfecciones, por lo que hay que tratar que estos defectos no queden a la vista o no repercutan negativamente en el uso.

2.3.3 Estereolitografía (SLA)

La estereolitografía es un método de impresión 3D que emplea una resina sensible a la luz y al láser. La impresora contiene una resina en el cuerpo y tiene una placa de construcción, ver Figura 2-17. Esta se mueve hacia arriba y hacia abajo dentro de la resina. El material solidifica cuando se expone a la luz UV o al láser. Las impresoras de SLA construyen la pieza sobre la base de impresión que por lo general se encuentra en la parte superior de la impresora y baja para sumergirse en la resina. A medida que se forman las capas la base de impresión asciende [17].

La impresión SLA tiene las siguientes ventajas sobre la FDM:

- Proporciona más soporte para las piezas.
- Se puede alcanzar un nivel de detalle elevado, aunque está limitado por la cristalización de la resina.
- Se pueden alcanzar una resolución de 0,02 mm altura de capa.
- La resolución no está limitada por el ancho de la boquilla.

No obstante, también tiene algunas limitaciones:

- La resina está disponible en un número muy limitado de colores. Suelen ser claros, blancos y translúcidos.
- Presentan problemas de tolerancias dimensionales que varían en función del tipo de resina.

- La limitación más importante es que la mayoría de los proveedores de impresoras crean su propia resina, diseñada para que solidifique con las longitudes de onda que tienen sus máquinas. Esto hace muy difícil que sean compatibles resinas de una marca con impresoras de [17].

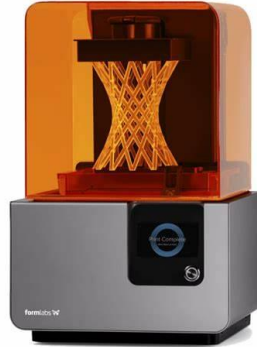


Figura 2-17. Impresora 3D SLA (estereolitografía) [17]

2.3.4 Estereolitografía en máscara (MSLA)

La estereolitografía en máscara no es más que una modificación de la SLA. Su principio de funcionamiento es el mismo, el fotocurado de la resina producido por la fuente de luz. La diferencia fundamental entre ambos métodos es que en la MSLA se trazan las capas gracias a que el rayo láser utilizado posee una fuente de luz ultravioleta de mayor tamaño y luego se enmascaran haciendo uso de una pantalla LCD.

Aunque esta tecnología no está tan desarrollada como la estereolitografía ofrece ciertas ventajas como:

- Reducción en los tiempos de fabricación [ver Figura 2-18].
- La resolución horizontal no se basa en el diámetro del láser como en las impresoras SLA, depende de la resolución de la pantalla LCD. [17]

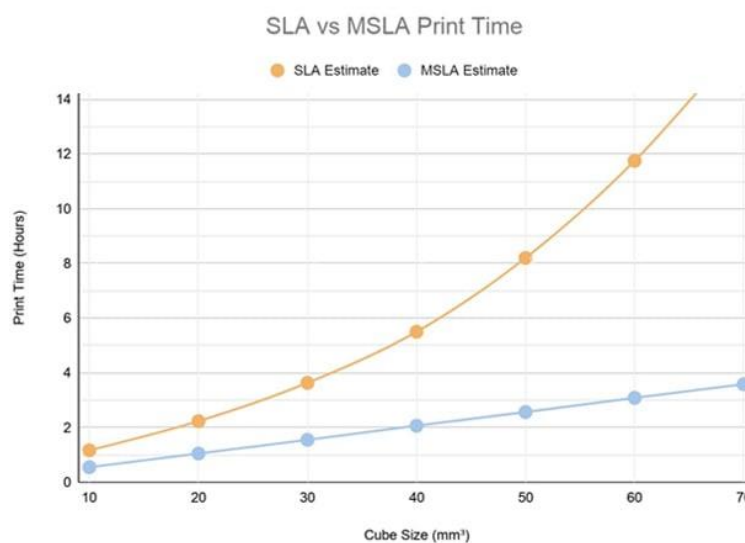


Figura 2-18. Relación entre el tiempo de impresión y el tamaño de un cubo en mm^3 [17].

2.3.5 Sinterización selectiva por láser (SLS)

Es el tipo de impresión más caro que se usa habitualmente. Esta tecnología de impresión es muy parecida al SLA ya que utiliza láseres para solidificar un material depositado en la impresora. La principal diferencia es que en el SLS el material de impresión es un polvo y se utilizan láseres de alta energía en lugar de luz ultravioleta. Estos láseres consiguen fusionar secciones selectivas de un polvo. Las capas de polvo se van depositando sobre la capa anterior, ya sinterizada. Las impresiones se completan capa a capa al igual que en las impresoras anteriores.

Gracias al SLS se pueden construir geometrías muy complejas [ver Figura 2-19]. Además, se puede emplear cualquier material que se pueda pulverizar y fusionar con calor, como los termoplásticos, el aluminio o el titanio. Las piezas fabricadas con esta tecnología son casi tan resistentes como las piezas de fundición sólida [16].

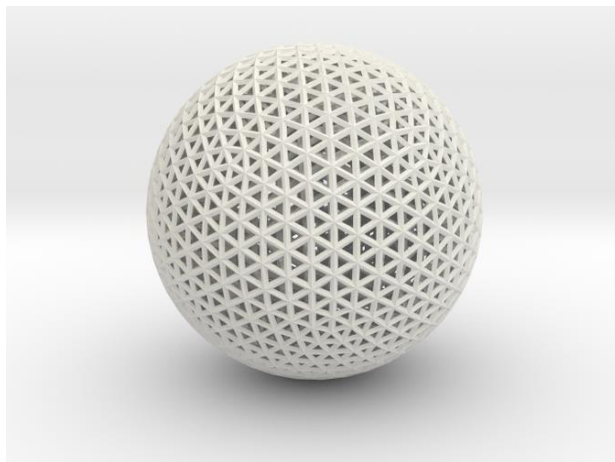


Figura 2-19. Pieza fabricada mediante SLS [16]

Al igual que en la estereolitografía la altura de capa y la resolución vienen determinadas por la resolución del polvo que se fusiona, con un promedio de 0,1 mm de altura de capa, por lo que se consigue un buen acabado superficial.

2.3.6 Fusión por haz de electrones (EBM)

Es una tecnología muy similar a la vista en el punto anterior, al igual que en el SLS en la fusión por haz de electrones se utiliza un lecho de polvo. Su principal diferencia radica en la fuente de calor utilizada. Este sistema hace uso de un haz de electrones para fabricar la pieza, mediante fundición de polvo metálico. La pieza en 3D se crea al fusionar selectivamente este polvo. En la Figura 2-20 podemos ver una sección de una impresora por fusión de haz de electrones [16].

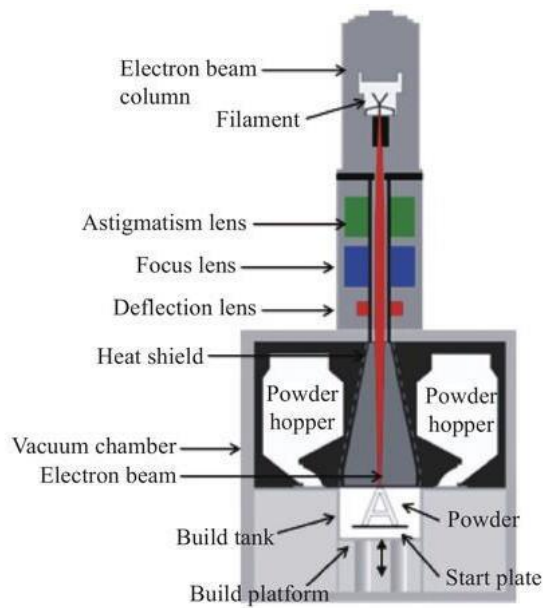


Figura 2-20. Impresora por haz de electrones [16]

2.3.7 Procesamiento digital de luz (DLP)

Es un tipo de fotopolimerización en el que se usa un proyector de video para curar resinas fotosensibles. Esta tecnología consigue unos tiempos de impresión más cortos que el SLA ya que se expone toda el área de fabricación a la luz UV, en lugar de un único punto como ocurre con el láser. Este tipo de impresoras funcionan en sentido ascendente y tienen situado el proyector en la parte inferior como podemos ver en la Figura 2-21. La bandeja es de un material transparente para permitir que la luz UV se pueda transmitir y así curar la capa de resina que se encuentra almacenada en el depósito. Se consigue un acabado superficial de alta calidad y bordes más definidos [18].

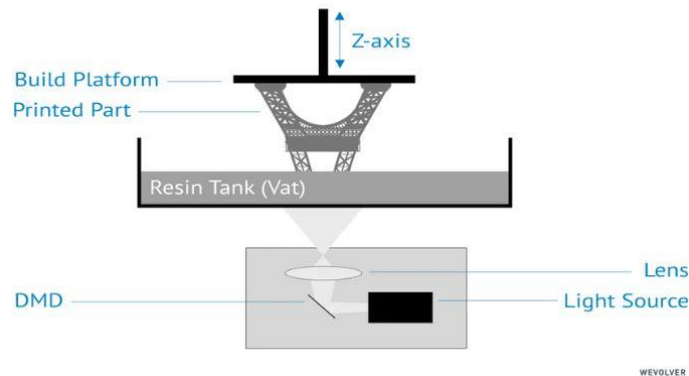


Figura 2-21. Impresora de procesamiento digital por luz [18].

3 MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Metodología

Todas estas tecnologías nos ofrecen la posibilidad de crear piezas usando diferentes métodos de fabricación. Para el desarrollo del TFG se hará uso de la impresión 3D mediante FDM y SLA, lo que nos permitirá escoger el material del que estará hecho el modelo interactivo. Esta decisión dependerá de algunos aspectos como; el precio, calidad del encaje entre piezas o acabado superficial.

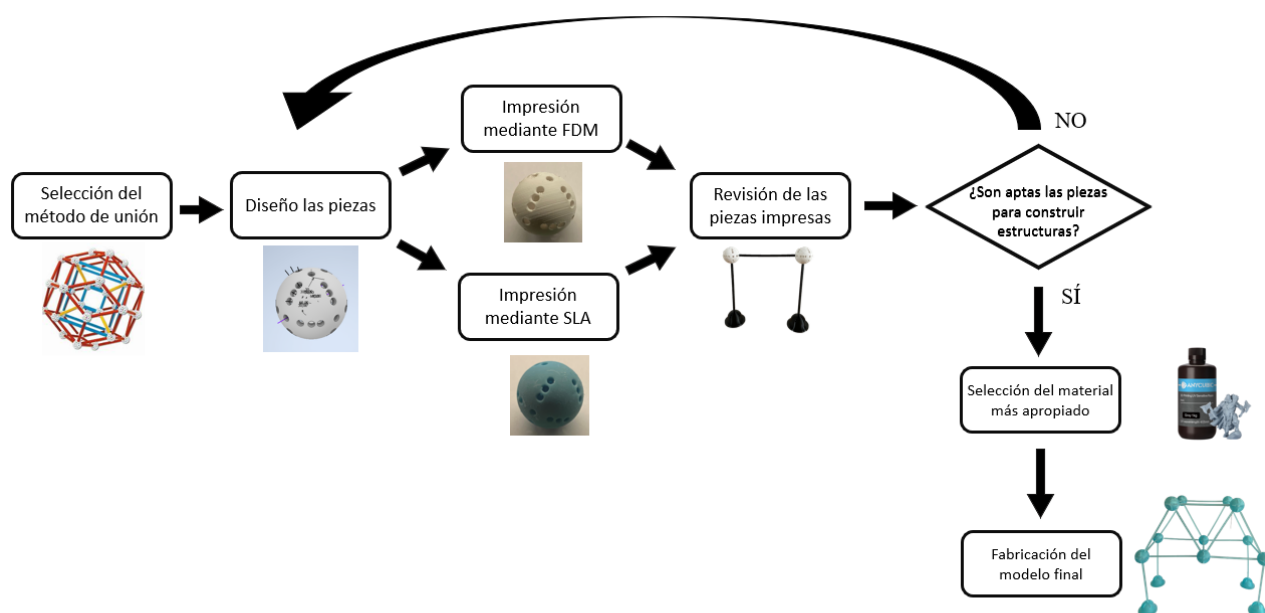


Figura 3-1. Diagrama de flujo que indica la metodología a seguir en el desarrollo del TFG (Fuente: Elaboración propia)

Como se puede ver en el diagrama de flujo, indicado en la Figura 3-1, durante el desarrollo del TFG se sigue una serie de pasos ordenados que permiten alcanzar los objetivos planteados inicialmente. Se explican a continuación:

- El primer paso consiste en seleccionar cual es el método de unión más apropiado, esta decisión está basada en los modelos interactivos que se han expuesto con anterioridad.
- En la segunda etapa, comienza el proceso iterativo que se repetirá tantas veces como sea necesario para obtener un producto de calidad. La primera parte de este proceso consiste en diseñar las piezas haciendo uso de herramientas *software*.
- Una vez diseñadas las piezas se fabrican mediante FDM y SLA en las impresoras 3D. Para realizar cada pieza es necesario hacer uso de un *software* específico para cada tipo de tecnología de impresión.
- El siguiente paso consiste en revisar que las piezas son adecuadas para realizar el montaje de estructuras reticulares con nudos fijos o articulados que simulen ser edificios y puentes.
- Una vez llegados a este punto hay que tomar la decisión de volver a diseñar unas piezas nuevas o si por lo contrario las piezas diseñadas son oportunas para crear el modelo.
- Si se toma la decisión de usar las piezas fabricadas para el producto se debe escoger el material con el que se van a fabricar las piezas (resina o filamento).
- Finalmente se fabrican todas las piezas necesarias para fabricar una estructura reticular de cierta complejidad.

3.2 Software de diseño

Las herramientas de *software* de diseño 3D permiten crear modelos tridimensionales virtualmente. Son empleados en diferentes industrias, principalmente en la arquitectura y el diseño industrial. Con estos programas de diseño *Computer Aided Design* (CAD) se pueden crear ensamblajes tridimensionales y realizar simulaciones de esfuerzos. Ofrecen una gran variedad de posibilidades para crear y modificar piezas. Incluye herramientas que permiten realizar; extrusión, revolución, orificios, modelado por superficies, modelado por mallado, etc. Además de esto, generan documentación técnica automáticamente, agilizando el proceso de producción.

Son herramientas muy empleadas por arquitectos, diseñadores industriales e ingenieros ya que ahorran tiempo y permiten crear productos de alta calidad.

3.2.1 Reseña histórica de los programas de diseño

En 1962 Ivan Sutherland creó el sistema de “*Sketchpad*”. El desarrollo de esta aplicación sentó las bases de los gráficos interactivos por ordenador. Con el uso de un teclado y un lápiz óptico se puede seleccionar, situar y dibujar conjuntamente una imagen representada en la pantalla. El sistema conseguía establecer una clara distinción entre el modelo representado en la estructura de datos y el dibujo que se veía en la pantalla, ver Figura 3-2. [19]



Figura 3-2. Sistema Sketchpad [19]

No fue hasta el año 1965 cuando se comenzó a comercializar con un precio de 500.000 \$. Pero la difusión de los programas de diseño fue gracias a AutoCAD creada por varios fundadores, entre estos destaca John Walker. Se consiguió producir un programa CAD con un coste inferior a 1000 \$.

3.2.2 Autodesk Inventor como herramienta de diseño

Este software de diseño asistido por computadora (CAD) permite realizar el diseño mecánico del producto en 3D. Además, se pueden llevar a cabo simulaciones, visualizar la geometría y generar la documentación apropiada. Gracias a la posibilidad de integrar datos bidimensionales y tridimensionales en un único entorno se puede representar el producto virtualmente antes de su construcción para evitar gastos innecesarios. Inventor tiene la capacidad de realizar dibujos computarizados en el formato adecuado para esto (DWG estándar), gracias a las herramientas de modelado paramétrico y la capacidad de traducción multi-CAD.

Autodesk Inventor es un *software* con el que se pueden crear piezas definiendo sus características y operaciones, que están basadas en bocetos. También es posible producir bocetos en distintas ubicaciones del espacio de trabajo utilizando planos. Este método permite hacer correcciones sobre los bocetos y las características de la pieza cuando está ya muy avanzada, corrigiéndose el resto de la pieza de forma automática sin necesidad de tener que retroceder al primer paso. Una vez están todas las piezas del producto acabadas se realiza el ensamblaje de las piezas añadiendo restricciones entre superficies, planos, aristas, puntos y ejes. Este método permite trabajar de forma muy intuitiva, lo que facilita el uso de la aplicación por parte del usuario. [20]

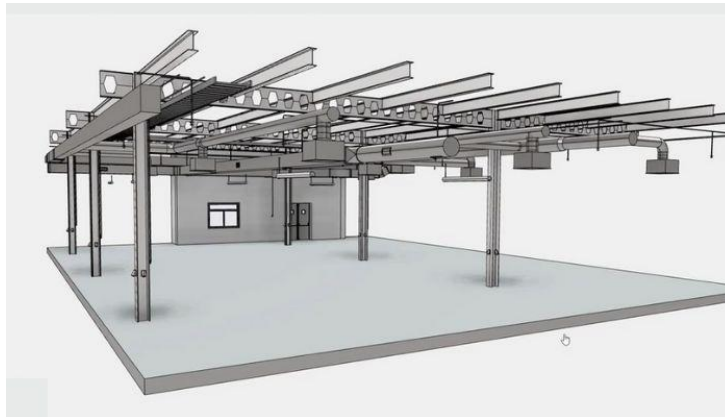


Figura 3-3. Ejemplo de ensamblaje realizado con Autodesk Inventor

Autodesk Inventor es una de las herramientas de *software* más empleadas para crear piezas 3D. Como se ha mencionado anteriormente se emplea para crear prototipos que se pueden visualizar fácilmente y se permite realizar simulaciones. Esta herramienta tiene la capacidad de producir modelos mallados adecuadamente que se pueden exportar a formatos válidos para realizar impresiones con 3D.

3.3 Resina

3.3.1 Impresora de resina

Exista una gran variedad de impresoras de resina en el mercado, lo que hace que una sea mejor que la otra es la calidad de la impresión. No obstante, el tamaño de la cama de impresión también es de vital importancia ya que permite realizar un mayor número de piezas en menos tiempo. Para imprimir las piezas diseñadas se hace uso de la impresora Creality LD-002H [ver Figura 3-4].



Figura 3-4. Impresora Creality LD-002H [21].

Esta máquina ofrece un gran volumen de impresión (130 x80 x160mm) por lo que podremos imprimir varias piezas simultáneamente. Gracias a la estabilidad y la precisión en el eje z puede realizar movimientos suaves que le permiten conseguir buenos acabados superficiales. La LD-002H cuenta con una unidad de filtrado de aire con carbón activo que evita que se desprendan los vapores nocivos generados por la resina, que además pueden ser incómodos debido a su mal olor. Sus especificaciones técnicas quedan recogidas en la Tabla 3-1 [21].

Características	Especificaciones
Tecnología	Sistema LCD UV
Pantalla	Táctil 2K HD LCD de 3.5 pulgadas
Fuente de luz	Luz UV
Longitud de onda de resina	405 nm
Tipo de pantalla de resina	LCD monocromo
Resolución de pantalla X	2560 píxeles
Resolución de pantalla Y	1620 píxeles
Resolución	51 micrómetros
Velocidad Máxima	59,98 mm/h (varía en función del material)
Nivelación	Manual
Volumen Total	221 x 221 x 403
Peso Neto	7 kg
Peso Bruto	9 kg
Consumo de Energía	72 W
Filtro HEPA	Sí
Pantalla táctil	Sí
Conexión tipo	USB
Precisión de altura de capa	0,003 – 0,005 m
Material	Resina LCD/DLP fotosensible
Laminador	Chitubox

Tabla 3-1. Especificaciones técnicas Creality LD-002H [21]

3.3.2 Software necesario para fabricar piezas con resina

Existen diferentes herramientas de *software* que traducen los archivos exportados del programa de diseño CAD al formato que acepta la máquina (de .stl a .ctb). Uno de estos programas es “Chitubox”.

Este tipo de archivos es el que recibe la impresora 3D para su impresión. En el caso del *software* Chitubox es únicamente para impresión con resina, es decir para fabricar mediante tecnología SLA o estereolitografía.

Una vez se ha diseñado la pieza en Autodesk Inventor y se ha exportado al formato adecuado se importa la pieza a este programa, donde se presenta apoyada sobre la base de impresión. Una vez aquí el programa nos permite seleccionar la marca y modelo de la impresora que se va a utilizar, el tipo de resina y otros parámetros de fabricación como el número de capas inferiores, la altura de capa o el tiempo

de curado de cada capa. Además, el *software* tiene la capacidad de crear los soportes para la pieza de forma manual o automática facilitando el trabajo.

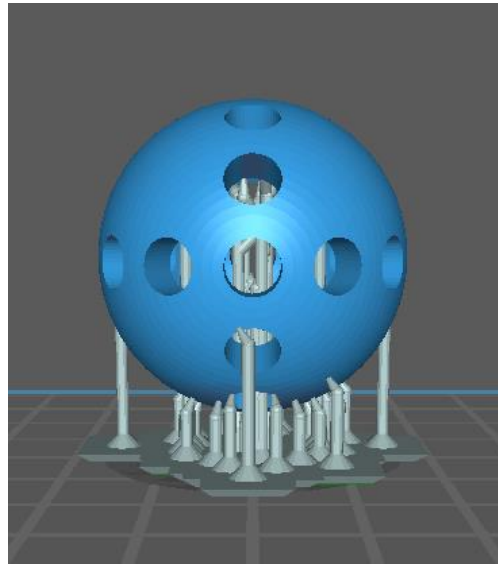


Figura 3-5. Interfaz de trabajo del software Chitubox

Una vez hemos terminado de ajustar todos los parámetros el programa nos ofrece información relativa al tiempo de fabricación, el peso de la pieza y la cantidad de resina que se va a consumir para llevar un recuento de material [22].

3.3.3 Variedad de resinas disponibles

Las resinas las usaremos en la impresora disponible en el CUD-ENM. Este material tiene una serie de derivados que presentan diferentes propiedades mecánicas. Los usados para la fabricación de las piezas son los siguientes:

- Resina estándar

Son las más utilizadas para crear prototipos que se imprimen de forma rápida. Es un material muy genérico al que se le puede dar una gran variedad de usos. Su empleo suele estar orientado a fabricar; miniaturas, prototipos, elementos decorativos, aparatos de uso doméstico, etc. [23].

Es el tipo de resina en el que se puede encontrar un catálogo de marcas más amplio y en bastantes colores como la mostrada en la Figura 3-6. Se puede emplear en impresoras SLA y DLP. Es un material bastante suave y su postprocesado es sencillo. El precio es de 32 €/kg [23].

Se emplearán diferentes resinas para fabricar piezas y se escogerá finalmente la más apropiada para fabricar el modelo.



Figura 3-6. Resina estándar celeste [24]

También se hace uso de otras resinas estándar con las mismas características, pero de otros colores [ver Figura 3-7].



Figura 3-7. Resina azul transparente [24]

- Resina flexible

Este tipo de resina tiene un coste bastante superior a la resina estándar debido a las propiedades que presenta. Es un material que imita las propiedades del caucho y se utiliza principalmente para imprimir piezas que pueden comprimirse o doblarse con facilidad [23].

Las resinas flexibles tienen un acabado superficial de calidad y son bastante suaves. Sus propiedades mecánicas se asimilaran a las de la goma [23].

El precio del bote de 500g [ver Figura 3-8] es de 57,99 €/kg, por lo tanto un kg de material supondrá un gasto de 115,98€ [25].



Figura 3-8. Resina flexible [25].

3.4 Filamento

3.4.1 Impresora de filamento

La impresora Artillery 3D Sidewinder es una impresora de Modelado por deposición fundida (FDM) de buena calidad capaz de realizar piezas con un nivel de detalle elevado en un tiempo reducido. La rapidez a la que se calienta la cama de impresión y lo silenciosa que es imprimiendo hacen que sea una de las más destacadas en el mercado. Las medidas de la impresora quedan recogidas en la Figura 3-9 [26].

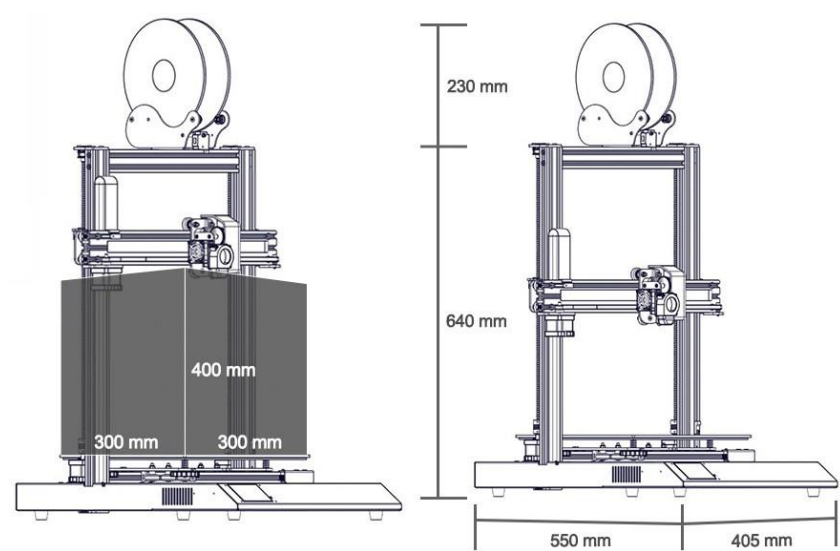


Figura 3-9. Artillery Sidewinder X1 [26]

Las especificaciones técnicas de la impresora son las indicadas en la Tabla 3-2.

Características	Especificaciones
Volumen de trabajo	300 x 300 x 400 mm
Resolución de la capa	0,1 mm-0,35 mm
Velocidad de construcción	60 mm/s-150 mm/s
Superficie de impresión	Cerámica de vidrio
Número de extrusores	1
Diámetro del filamento	1,75mm
Materiales compatibles	PLA, ABS, PLA Flexible, PETG
Calibración	Manual
Tecnología de impresión	FDM
Resolución XYZ	X-0,05 mm, Y-0,05 mm, Z-0,1 mm
Tipo de boquilla	Volcano
Diámetro de la boquilla	0,4 mm
Temperatura de la boquilla	180 °C-240 °C
Tiempo de calentamiento de la cama	80 °C en menos de 2 minutos
Ruido de impresión	<70dBA
Consumo de energía	100-240 V y 600 W máximo
Controlador de paso a paso	MKS G en L
Peso de la impresora	14 kg
Dimensiones de la impresora	550 x 540 x 270 mm

Tabla 3-2. Especificaciones técnicas Artillery Sidewinder X1 [26]

3.4.2 Software necesario para fabricar piezas con filamento

Este software se empleará como paso previo a la impresión en filamento. Al igual que en el *software* “Chitubox” este programa traduce los archivos de diseño CAD en otro cuyo formato es compatible con la máquina de impresión.

Esta herramienta recibe el nombre de “Cura”. Fue desarrollado por David Braam en 2014 y más tarde fue adquirido por la empresa Ultimaker. El programa tiene una gran popularidad entre los usuarios de impresoras ya que, es de código libre, se puede usar en 15 idiomas, se puede descargar para todos los sistemas operativos y aunque pertenece a la empresa de impresoras Ultimaker se puede configurar para cualquier otra máquina de impresión. Estas razones lo convierten en una de las herramientas de *software* de laminación más usados en la actualidad.

“Cura” tiene diferentes configuraciones en función del nivel de conocimiento del usuario, por lo que será una buena opción para quién está empezando a crear piezas y también para quien quiere alcanzar un alto nivel de detalle en sus diseños. Al abrir la aplicación se debe seleccionar la impresora con la que se va a trabajar y se presenta la cama de la impresora. Una vez aquí se selecciona la pieza que se va a imprimir importándola en el formato correspondiente (.stl) y queda representada en la cama de impresión, donde se puede rotar la pieza sobre cualquiera de los tres ejes y mover en las tres direcciones. Una vez aquí debemos seleccionar los parámetros de impresión, en función del nivel seleccionado tendremos más o menos detalles a nuestra elección. La elección correcta de los parámetros de impresión es de vital importancia ya que repercutirá en la calidad de la pieza, su resistencia, la cantidad de material empleado y el tiempo de impresión. Los niveles que se pueden seleccionar son los siguientes:

- Básico. Permite configurar algunos parámetros como la altura de capa, la adhesión, la estructura de soporte, la temperatura de la boquilla o la velocidad de impresión.
- Avanzado. Además de ofrecer la posibilidad de elegir los parámetros básicos se pueden modificar hasta 400 parámetros de impresión como el porcentaje de relleno, el patrón de relleno permite seleccionar diferentes velocidades de impresión para depositar material más despacio en el perímetro de la pieza mejorando así su acabado superficial y otras más que permitirán obtener una pieza de calidad con un bajo coste y tiempos reducidos.
- Experto. Esa configuración alcanza un nivel de detalle bastante alto, permitirá elegir parámetros como el ancho de capa en las capas iniciales, variar la temperatura de la refrigeración, seleccionar diferentes velocidades para los detalles de menor tamaño, etc. Este modo no será de interés ya que la mejoría que proporciona a la pieza no es la suficiente como para dedicarle el tiempo que requiere seleccionar parámetros de menor importancia.

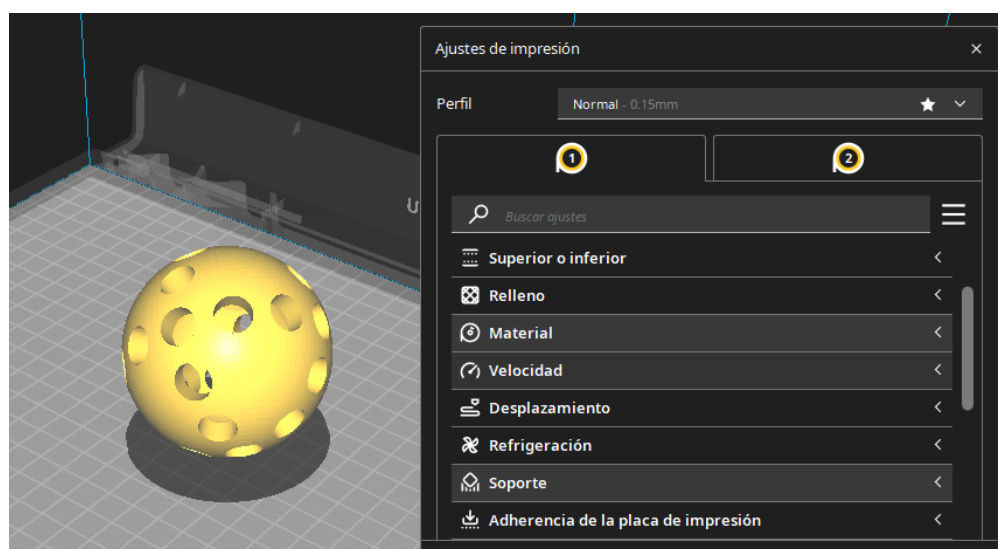


Figura 3-10. Esfera sobre cama de impresión y desplegable que muestra los ajustes a configurar (Fuente: Elaboración propia)

En resumen, para imprimir las piezas configuraremos los parámetros en modo avanzado ya que permite realizar un gran número de ajustes sin llegar a entrar en un nivel de profundidad que no interesa para nuestras piezas [ver Figura 3-10].

Una vez ajustados todos los parámetros se segmenta la pieza y se puede ver en la cama de impresión como quedaría la pieza final. Se representa en diferentes colores cada tipo de trazado, el relleno de la pieza, el perímetro y los soportes. De esta forma el usuario puede reconocer con facilidad que se va a imprimir y donde y así decidir si quiere modificar algún parámetro [ver Figura 3-11].

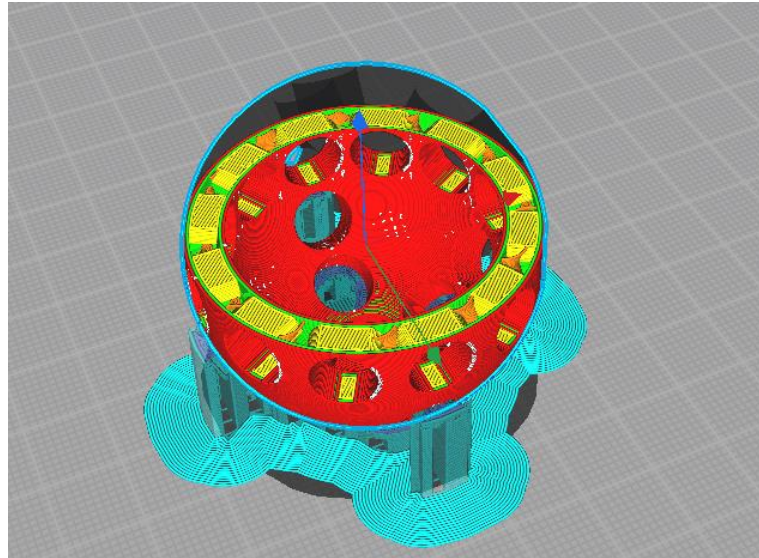


Figura 3-11. Vista previa en Cura (Fuente: Elaboración propia)

3.4.3 Variedad de filamentos disponibles

El filamento de impresión es un material utilizado en la fabricación aditiva. Suele estar hecho de polímeros como el ABS o el PLA. Se alimenta a través de un extrusor que lo derrite y lo deposita en las capas para crear un objeto tridimensional. Los filamentos vienen en diferentes diámetros y colores, y su calidad puede afectar la precisión y la durabilidad de la impresión.

- PETG

El PETG (*Polyethylene Terephthalate Glicol*) es un material comúnmente empleado en impresoras 3D de filamento. Es un poco más caro que otros filamentos, pero tiene mejores propiedades. Las principales ventajas por las que se emplea este material son; la facilidad para imprimir presenta buenas propiedades mecánicas de dureza y resistencia a impactos, es uno de los filamentos más transparentes que existen, no emite olores al exterior durante la impresión 3D y es más flexible que el ABS o el PLA [27].

Sin embargo, pueden aparecer hilos durante la impresión y su temperatura de reblandecimiento no es tan alta como la de otros materiales [27].

Es un material muy útil para piezas en las que se requiera una buena resistencia a impactos y cierta flexibilidad [27].

Para imprimir una pieza con este tipo de material podemos seleccionar muchos parámetros, pero los más comunes son los siguientes; temperatura de impresión entre 220 °C y 250 °C, temperatura de la cama caliente 70 °C y se debe disminuir la potencia del ventilador de la capa.

El PETG empleado es el de la marca “WINKLE” [ver Figura 3-12], se puede adquirir en su página web por 18,63 €/kg y está disponible en diferentes colores [28].



Figura 3-12. Filamento PETG negro [28].

4 DEFINICIÓN DE REQUISITOS Y DESARROLLO

4.1 Selección del método de unión empleado y definición de requisitos

Una vez vistas las diferentes posibilidades para configurar nuestro kit de piezas en el apartado 2.2 se decide que el modelo esté formado por barras, esferas y unos soportes que simulen ser vigas, pilares, nudos y apoyos. Para cumplir con el objetivo de fabricar este modelo y que se le pueda dar uso docente. Las barras y los nudos se unirán entre sí al introduciendo las piezas longitudinales en los orificios con los que contarán las esferas, es decir, mediante apriete. En el diseño de las piezas se debe tener en cuenta que su tamaño y forma permite que se fabriquen en ambas impresoras, tanto SLA como FDM.

Se usa el *software* Autodesk Inventor [ver apartado 3.2.2] para realizar el diseño de las piezas, ya que este programa es el que se usa CUD-ENM y con el que los alumnos están más familiarizados.

4.1.1 Requisitos de la esfera

La esfera del kit se debe diseñar rigurosamente teniendo en cuenta una serie de condiciones que hagan de ella un elemento apropiado para el modelo. Los requisitos son los que se explican a continuación:

- No debe ser muy pequeña. Es necesario que el tamaño de la esfera permita al usuario manejarla con facilidad y no sea muy laborioso encajar las barras. Además, un tamaño muy reducido no permitiría crear suficientes orificios.
- Tampoco debe ser excesivamente grande. Un tamaño excesivo no permitiría almacenarlo de forma cómoda. Supondría un encarecimiento del coste ya que se usaría demasiado material y los tiempos de impresión serían mayores.
- Empleo de un material suficientemente resistente. La esfera puede llegar a soportar esfuerzos ocasionados por la unión de diferentes barras. Además, debe ser resistente a posibles caída y golpes que sufran los elementos para evitar que se rompan con facilidad
- Buen acabado superficial, para permitir que las barras entren y salgan de los orificios cómodamente. Aquí estará la principal dificultad ya que tenemos que evitar que los elementos longitudinales salgan de la esfera indeseadamente.

En resumen, debemos seleccionar un material económico y resistente para la fabricación de este elemento y hay que tratar de diseñar una esfera pequeña pero que permita hacer el mayor número de orificios posibles para conseguir el mayor número de combinaciones de estructuras.

4.1.2 Requisitos barra

Las barras serán los elementos que permitan construir nuestra estructura y las que soporten los esfuerzos de compresión, tracción, torsión, flexión y pandeo. Para llevar a cabo estas piezas debemos atender a los siguientes requisitos de diseño:

- La longitud de las barras no debe ser muy pequeña. Sería necesario imprimir muchas para conseguir una estructura lo suficientemente grande para ser analizada. Es necesario que la longitud del modelo sea de un tamaño manejable, además de esta forma no desperdiciaremos tiempo ni material.
- El material de construcción debe soportar los esfuerzos antes mencionados. Por lo tanto, es necesario que sea capaz de resistir adecuadamente a las cargas que se aplican.
- Buen acabado superficial. Es una cualidad que debe tener tanto la esfera como la barra ya que esto determinará la calidad de la unión.
- Las barras deben ser esbeltas, es decir que es delgado y alargado en relación con u sección transversal.

4.2 Diseños preliminares.

Antes de empezar a producir un gran número de barras y esferas se prueba a imprimir el diseño realizado. A partir de este se hacen mejoras que permitan mejorar la calidad del producto. Entre las mejoras a aplicar estarán principalmente las siguientes:

- Modificar el tamaño de los elementos.
- Fabricar la pieza con otro material. La finalidad de este cambio es buscar un mejor acabado superficial o permitir la unión barra y esfera.
- Aumento o disminución del número de orificios en la esfera.

En las tablas que se muestran a continuación quedan recogidos los parámetros más básicos a tener en cuenta a la hora de imprimir una pieza mediante fabricación aditiva. Cabe destacar que hay otros muchos de los que dependen parámetros como el acabado superficial o el tiempo de impresión y no se muestran en estas tablas que están a modo de esquema visual.

4.2.1 Primer diseño

4.2.1.1 Esfera

En el primer diseño realizado [ver Figura 4-1] se construye una semiesfera con las características de la Tabla 4-1. Se hace con esta forma con el fin de facilitar su fabricación mediante impresión FDM. Apoyando la cara plana sobre la cama de la impresora se evitaría construir soportes, los cuales provocarían un empeoramiento del acabado superficial, un mayor coste al usar más material y un mayor tiempo de fabricación.

Características	Descripción
Diámetro de la esfera	20 mm
Diámetro del orificio	4 mm
Orificios	16 orificios separados 45°
Grosor de la esfera	3 mm

Tabla 4-1. Características de la esfera (Fuente: Elaboración propia)

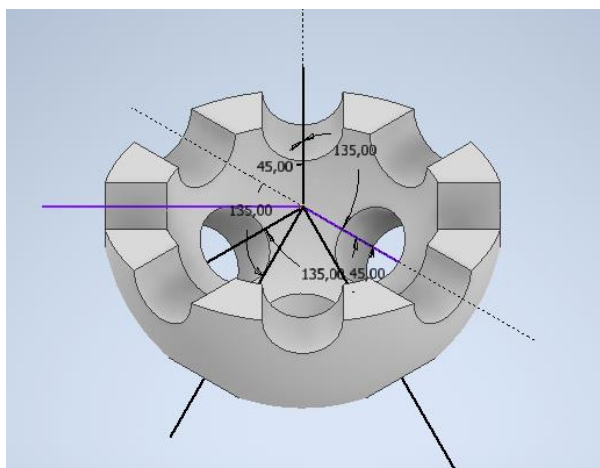


Figura 4-1. Primer diseño de la esfera (Fuente: Elaboración propia)

Para construir cada esfera necesitaríamos dos semiesferas. Se podrían unir mediante adhesivos lo suficientemente resistentes para soportar los esfuerzos de tracción entre estas caras. El principal inconveniente de unir ambas partes es ajustar de forma muy precisa ambas superficies. La solución a este problema reside en diseñar un saliente y un entrante simétricos entre sí [ver Figura 4-2] que permita encajar ambas partes para que a la hora de unir las dos semiesferas el ajuste sea exacto, como queda representado en el ensamble de la Figura 4-3.

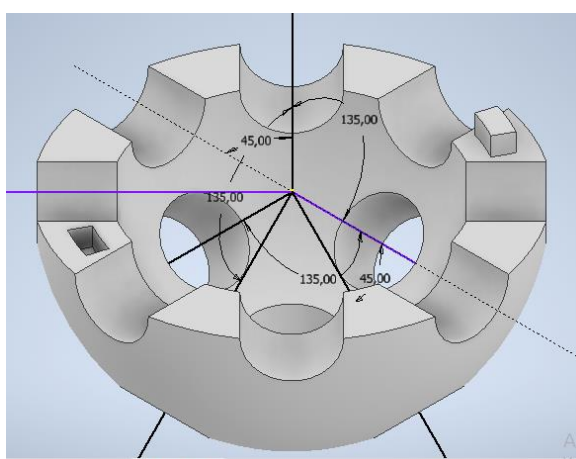


Figura 4-2. Semiesfera con salientes (Fuente: Elaboración propia)

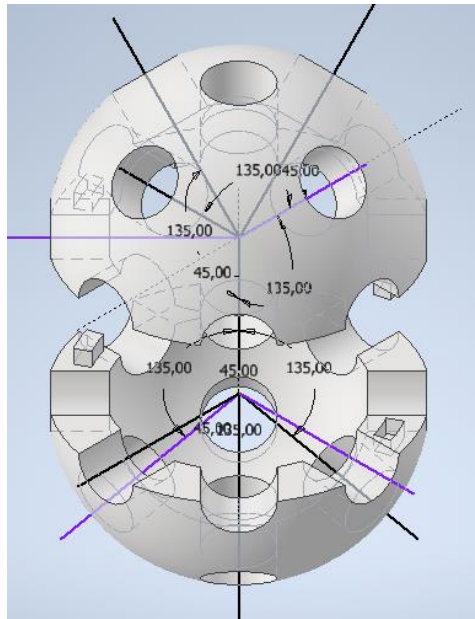


Figura 4-3. Ensamble de dos semiesferas (Fuente: Elaboración propia)

Esta esfera al tener un diámetro tan reducido no permite instalar más orificios, por lo que las construcciones estarán limitadas a crear formas cuadrangulares o triángulos equiláteros. Además, debido a su reducido tamaño las barras podrían estar en contacto unas con otras cuando se encajen. Por esta razón se busca diseñar una esfera de mayor tamaño que solucione estos problemas.

4.2.2 Segundo diseño

4.2.2.1 Esfera

Se crea un segundo diseño de la esfera con el objetivo de aumentar el número de orificios que hay en la superficie de esta. Para cumplir con este requisito de diseño la pieza debe aumentar el diámetro. Además, se aprovecha para realizar ciertas mejoras como aumentar el grosor de la pieza. Al poner un mayor número de orificios se pueden crear más combinaciones, de esta forma las estructuras no quedan limitadas a cuadrados, cubos o triángulos y pirámides. [ver Tabla 4-2]

Características	Descripción
Diámetro de la esfera	30 mm
Diámetro del orificio	5 mm
Orificios	30 orificios separados 30°
Grosor de la esfera	4 mm

Tabla 4-2. Características de la esfera 2 (Fuente: Elaboración propia)

Como se puede observar en la Figura 4-4 el número de orificios aumenta considerablemente, por lo que se decide imprimir mediante Modelado por deposición fundida (FDM).

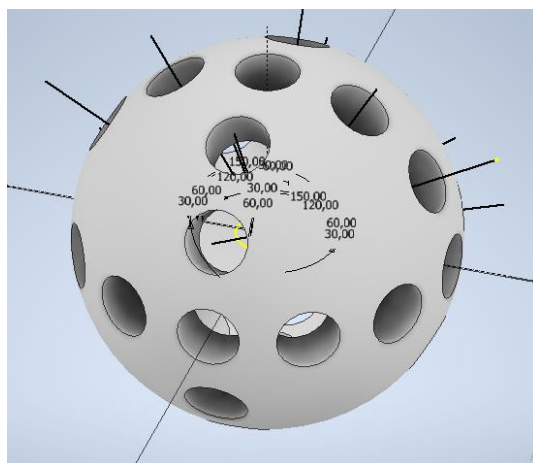


Figura 4-4. Segundo diseño de la esfera (Fuente: Elaboración propia)

Como se puede ver en la Figura 4-5 la fabricación de la esfera falla cuando está finalizando. Se separa la base de la cama debido al soporte reducido que se le había puesto y el extrusor sigue funcionando, creando ese exceso de material depositado en la zona superior.

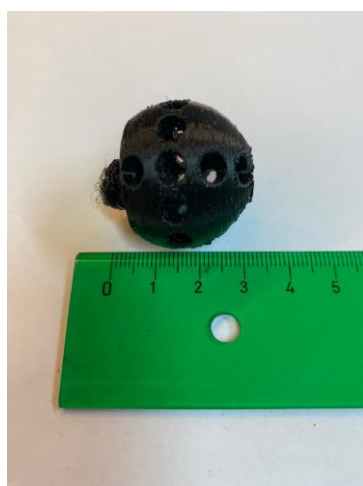


Figura 4-5. Esfera 30 mm impresa mediante FDM con fallo de impresión en la parte superior (Fuente: Elaboración propia)

Los parámetros de impresión que se seleccionaron fueron los siguientes [ver Tabla 4-3].

Parámetros	Valores
Altura de capa	0,1 mm
Soporte	Sí, pero reducido
Ancho de boquilla	0,6 mm
Retracción	3 mm
Tiempo de impresión	1h 02 min
Peso	12 gramos

Tabla 4-3. Parámetros impresión esfera 2 mediante FDM (Fuente: Elaboración propia)

Esta esfera también se fabrica en la impresora SLA usando resina estándar para comparar la calidad de la impresión. Para el caso de las impresoras de resinas los parámetros de impresión que se deben seleccionar difieren de las máquinas de filamentos. En este caso se seleccionan los parámetros que aparecen en la Tabla 4-4.

Parámetros	Valores
Tipo de resina	Estándar color celeste
Altura de capa	0,05 mm
Número de capas inferiores	4
Tiempo de exposición	6 s
Soportes	Sí, externos y en el interior de la esfera
Tiempo de impresión	2 h 15min
Peso	6 gramos

Tabla 4-4. Parámetros impresión esfera 2 mediante SLA (Fuente: Elaboración propia)

En este caso la esfera se imprime correctamente como se puede ver en la Figura 4-6. Además, presenta un buen acabado superficial como consecuencia de haber seleccionado una altura de capa de 0,05 mm. La principal desventaja que tiene este método con respecto al anterior es el incremento del tiempo de fabricación. Para solucionar este problema debemos modificar algunos parámetros como el tiempo de exposición o la altura de cada capa. Se debe tratar de disminuir el tiempo de fabricación lo máximo posible sin sacrificar en exceso la calidad del acabado superficial, por lo que encontrar un equilibrio entre los parámetros será de gran importancia. Otro inconveniente que presenta es la necesidad de introducir soportes en el interior de la esfera. Estos soportes pueden hacer más difícil encajar las barras.

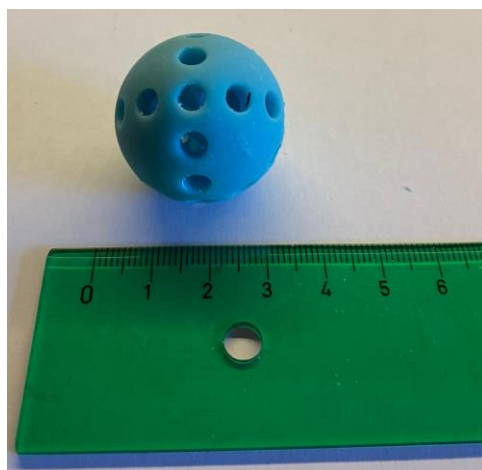


Figura 4-6. Esfera 30 mm impresa mediante SLA con resina estándar celeste (Fuente: Elaboración propia)

4.2.2.2 Barra

El diseño de la barra consistía principalmente en conseguir que esta pudiese entrar fácilmente en los orificios de la esfera y quedase encajada para que no saliese involuntariamente. Para ello se diseñan dos medias barras que posteriormente puedan unirse, al igual que la esfera tienen un saliente y un entrante.

En los extremos de las barras hay unas cabezas que permiten la entrada, pero no la salida como se puede ver en la Figura 4-7.



Figura 4-7. Barra con saliente (Fuente: Elaboración propia)

Este diseño que a priori parecía una buena opción no lo es. Por lo tanto, se descarta el diseño y se opta por hacer algo más simple que permita que quede dentro del orificio de la esfera por apriete como se muestra en el ensamble de la Figura 4-8. Al hacer un encaje así se deberá ajustar al máximo el diámetro de la barra con el del orificio para conseguir una unión de calidad.



Figura 4-8. Barra con extremo cilíndrico (Fuente: Elaboración propia)

La mejoría a esta barra consiste en simplificar la forma de unión, las características son. [ver Tabla 4-5]

Características	Descripción
Longitud de la barra	80 mm
Longitud del extremo de la barra	6 mm
Método de unión	Apriete
Diámetro	7 mm
Diámetro del extremo	5 mm

Tabla 4-5 Características de la barra 2 (Fuente: Elaboración propia)

Finalmente se opta por fabricar esta barra que será la que debe encajar con la esfera anteriormente mencionada. Para imprimir la barra se deciden establecer los parámetros de impresión de la Tabla 4-6. Se imprime verticalmente sobre la cama de impresión, por lo que el extrusor va depositando el filamento haciendo capas con formas cilíndricas. Imprimir la barra en posición provoca que la barra no sea resistente a esfuerzos de flexión, ya que se fractura muy fácilmente. En diseños posteriores la posición con la que se imprime la barra se tiene en cuenta para evitar este problema. La solución es tan simple como fabricar la pieza apoyada sobre la cama de impresión.

Parámetros	Valores
Altura de capa	0,1 mm
Soporte	Sí, muy reducido
Ancho de boquilla	0,6 mm
Retracción	3 mm
Tiempo de impresión	24 min
Peso	6 gramos

Tabla 4-6. Parámetros impresión barra 2 mediante FDM (Fuente: Elaboración propia)

Finalmente, la barra queda impresa como se ve en la Figura 4-9.



Figura 4-9. Barra 2 impresa mediante FDM (Fuente: Elaboración propia)

El modelo impreso se descarta por el reducido tamaño que tiene, podría no ser cómodo para el uso manipularlo y realizar los montajes de las barras. Por este motivo se pretende realizar uno algo más grande que pueda ser más fácil de usar.

4.2.3 Tercer diseño

4.2.3.1 Esfera

El tercer diseño tiene las mismas características que el anterior a excepción de su tamaño. Por lo tanto, se decide realizar la impresión una esfera el doble de grande. Con este nuevo diseño se pretende facilitar la fabricación mediante FDM y realizar un producto más manejable. Las características son las que quedan reflejadas en la Tabla 4-7. Características de la esfera 3

Características	Descripción
Diámetro de la esfera	60 mm
Diámetro del orificio	10 mm
Orificios	30 orificios separados 30°
Grosor de la esfera	8 mm

Tabla 4-7. Características de la esfera 3 (Fuente: Elaboración propia)

Una vez realizado el diseño en el *software* de diseño CAD y tras haber sido configurados los parámetros de impresión [ver Tabla 4-8] se procede a su fabricación mediante fabricación aditiva. La pieza al imprimirse [ver Figura 4-10] vuelve a tener el mismo defecto que el de la Figura 4-5 por lo que se procede a aumentar el tamaño del soporte para evitar que separe de la cama de impresión en la fase final, que como se ha podido observar en dos ocasiones es la más crítica.

Parámetros	Valores
Altura de capa	0,1 mm
Soporte	Sí, reducido
Ancho de boquilla	0,6 mm
Retracción	3 mm
Tiempo de impresión	3 h 24 min
Peso	24 gramos

Tabla 4-8. Parámetros impresión esfera 3 mediante FDM (Fuente: Elaboración propia)

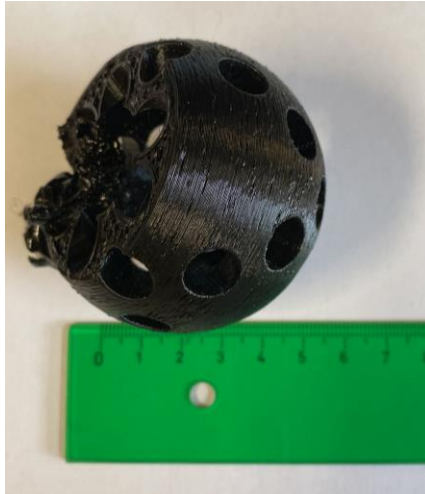


Figura 4-10. Esfera 60 mm impresa mediante FDM con fallo de impresión en la parte superior (Fuente: Elaboración propia)

Aprovechando que se va a realizar una nueva impresión se añade una mejora estética y se opta por usar un filamento de PETG de color rojizo para ver las propiedades que tiene este material. Para este caso se mantienen los parámetros de impresión de la Tabla 4-8, a excepción del tamaño del soporte y el tiempo que aumenta 10 minutos. La pieza se fabrica sin problemas como se puede ver en la Figura 4-11.



Figura 4-11. Esfera 60 mm impresa mediante FDM (Fuente: Elaboración propia)

La pieza fabricada no es totalmente lisa y presenta ciertas rugosidades por lo que se somete a un proceso de lijado y pulido que hacen que la esfera adquiera unas propiedades estéticas de mayor calidad gracias a la suavidad que le da.

Además de fabricar esta esfera con PETG se fabrica nuevamente con resina estándar para volver a comparar ambas piezas. Los parámetros de impresión de la esfera de resina estándar [ver Tabla 4-9] se modifican respecto de los de la esfera del Segundo diseño.

Parámetros	Valores
Tipo de resina	Estándar color celeste
Altura de capa	0,1mm
Número de capas inferiores	4
Tiempo de exposición	6 s
Soportes	Sí, externos y en el interior de la esfera
Tiempo de impresión	2 h 7min
Peso	32 gramos

Tabla 4-9. Parámetros impresión esfera 3 mediante SLA (Fuente: Elaboración propia)

En este caso se han mantenido los soportes tanto exteriores como los ubicados en el interior de la esfera. Para disminuir el tiempo de fabricación se imprime la esfera con una altura de capa de 0,1mm. Al ser la capa el doble de alta que la anterior la impresora realizará la mitad de capas que si se indicase 0,05 mm, lo que implica una disminución del tiempo a la mitad. La esfera finalmente se fabrica cumpliendo con los requisitos establecidos [ver Figura 4-12].

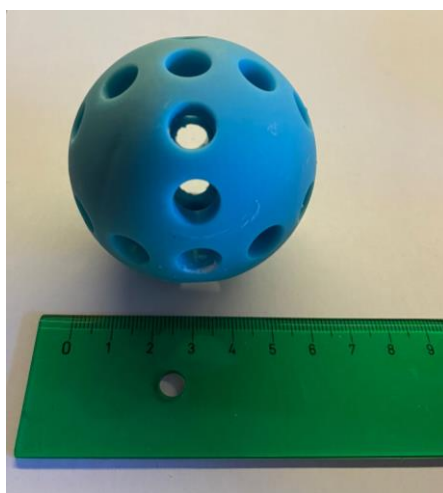


Figura 4-12. Esfera 60 mm impresa mediante SLA. (resina estándar)

Como se puede apreciar en la Figura 4-12 la diferencia de acabado superficial entre esta esfera y la anterior es prácticamente imperceptible, por lo que las próximas impresiones se realizarán con 0,1mm de altura de capa para reducir el tiempo de fabricación a la mitad.

4.2.3.2 Barra

El diseño de la barra en este caso será el mismo que el de la Figura 4-9. Como se aumentó el tamaño de la esfera al doble se le aplicará a la barra la misma operación. Por lo tanto, sus características ahora serán las de la Tabla 4-10.

Características	Descripción
Longitud de la barra	200 mm
Longitud del extremo de la barra	10 mm
Método de unión	Apriete
Diámetro	14 mm
Diámetro del extremo	10 mm

Tabla 4-10. Características de la barra 3 (Fuente: Elaboración propia)

Además, se indican a continuación [ver Tabla 4-11] los parámetros seleccionados en el software para imprimir la barra.

Características	Descripción
Altura de capa	0,2 mm
Soporte	No
Ancho de boquilla	0,6 mm
Retracción	3 mm
Tiempo de impresión	1h 02 min
Peso	27 gramos

Tabla 4-11. Parámetros de impresión de la barra 3 mediante FDM (Fuente: Elaboración propia)

Para evitar que la barra se fracture fácilmente al someterla a esfuerzos de flexión como ocurrió anteriormente se procede a imprimir la barra apoyada horizontalmente sobre la cama de impresión, así se consigue una mayor resistencia a este tipo de esfuerzos. La barra se imprime correctamente como se puede ver en la imagen Figura 4-13. Barra 3 impresa mediante FDM



Figura 4-13. Barra 3 impresa mediante FDM (Fuente: Elaboración propia)

Debido a que las esferas no tienen orificios en 45° no se pueden realizar estructuras con tantas posibilidades. Otro inconveniente que presenta es el excesivo tamaño de las esferas que requieren de mucho material para construirlas y no son tan cómodas de usar por el usuario. Por estas razones principalmente se opta por hacer un nuevo diseño menor que este último pero mayor que el primero y que tenga ángulos de 30, 45 y 60°.

4.2.4 Cuarto diseño

Este diseño busca optimizar el tamaño de las esferas anteriores y establecer más orificios en la superficie de la esfera para construir estructuras reticuladas tridimensionales.

4.2.4.1 Esfera

La pieza se diseña como se puede ver en la Figura 4-14 cumpliendo con los requisitos mencionados anteriormente. Este nuevo diseño implica otras modificaciones como la disminución del diámetro de los orificios para evitar que se solapen entre sí. Las características de la esfera quedan recogidas en la Tabla 4-12. Características de la esfera 4

Características	Descripción
Diámetro de la esfera	45 mm
Diámetro del orificio	5 mm
Orificios	42 orificios separados 30, 45 y 60°
Grosor de la esfera	6 mm

Tabla 4-12. Características de la esfera 4 (Fuente: Elaboración propia)

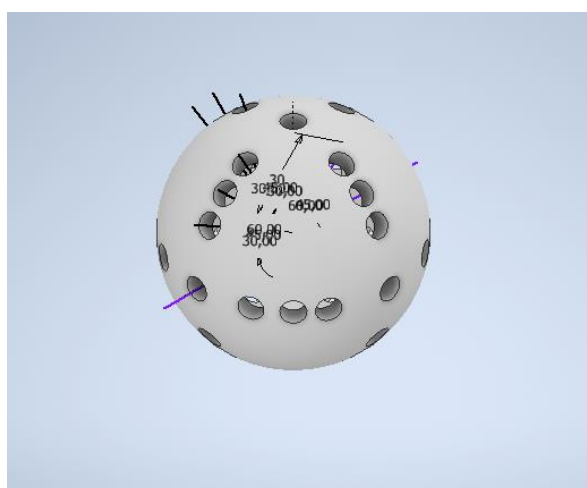


Figura 4-14. Cuarto diseño de la esfera (Fuente: Elaboración propia)

Una de las principales dificultades que se encuentra en el diseño de esta esfera es hacer los orificios lo más grandes posibles sin que se solapen entre ellos. Además, deben tener la suficiente separación entre ellos para evitar que dos barras que se introduzcan en orificios colindantes tengan contacto entre ellas. Otro problema que puede surgir es que al ser tan poca la cantidad de material que hay entre orificios [ver Figura 4-15] la pieza puede fracturar por esta parte.

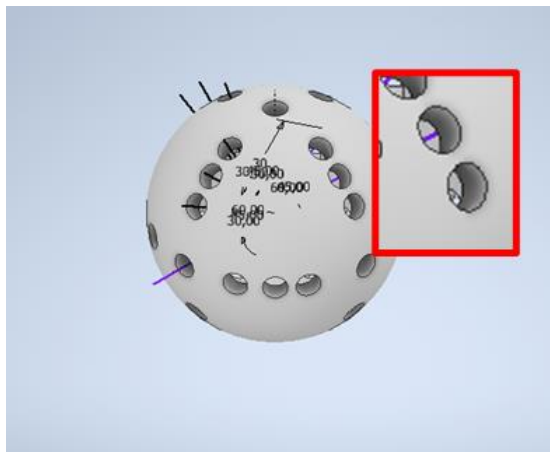


Figura 4-15. Parte crítica de la esfera del cuarto diseño (Fuente: Elaboración propia)

Se fabrica mediante SLA con resina estándar al igual que la anterior. Para ello se seleccionan los parámetros de impresión recogidos en la Tabla 4-13. Parámetros de impresión esfera 4

Parámetros	Valores
Tipo de resina	Estándar color celeste
Altura de capa	0,1 mm
Número de capas inferiores	4
Tiempo de exposición	6 s
Soportes	Sí, externos y en el interior de la esfera
Tiempo de impresión	1 h 39 min
Peso	26 gramos

Tabla 4-13. Parámetros de impresión esfera 4 (Fuente: Elaboración propia)

En este caso la máquina será capaz de fabricar cada esfera en 1h 39min, un tiempo bastante inferior al anterior. Además, al disminuir el tamaño se consigue ahorrar material y por lo tanto disminuir los costes de producción. Como se puede ver en la Figura 4-16 la esfera de resina se imprime correctamente.

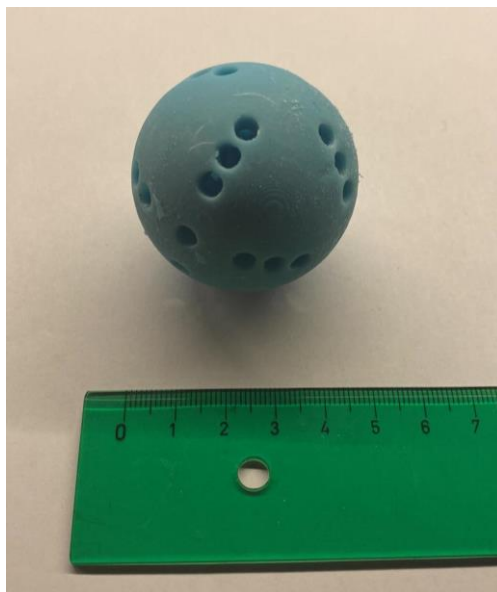


Figura 4-16. Esfera de 45mm impresa mediante SLA (Fuente: Elaboración propia)

La esfera tiene orificios de 5mm de diámetro, lo que dificulta bastante retirar los soportes ubicados en el interior de la esfera. La cantidad de soportes que se crean en el interior es bastante elevada [ver Figura 4-17]. Por lo tanto, esto podría dificultar que las barras entren fácilmente y no colisionen con esta estructura auxiliar.

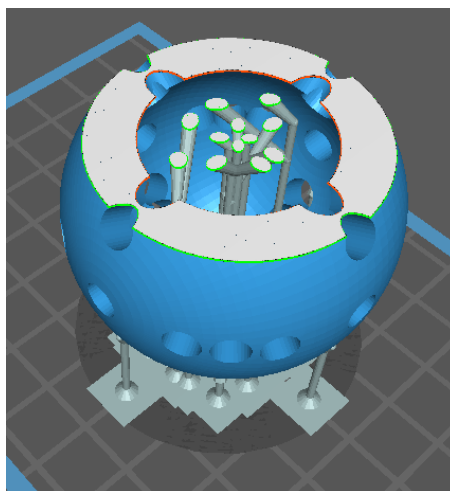


Figura 4-17. Esfera 45mm representada en el software que se usa para configurar los parámetros de impresión (Fuente: Elaboración propia)

Cuando se fabrican las barras para esta esfera se comprueba que no encajan en los orificios, siendo ambos diámetros de 5mm. Esto se debe a una cuestión de dilatación o contracción de las piezas. Durante el proceso de diseño de las barras, que se explica más adelante, [ver 4.2.4.2] se ajusta el tamaño de las barras consiguiendo solventar este problema. Debido a las buenas propiedades que presenta la esfera y a las posibilidades que ofrece se selecciona esta esfera para la fabricación del kit.

Por esta razón y para comparar la diferencia de calidad entre la resina estándar y la flexible se decide construir una esfera con este último material. Se pueden llegar a fabricar dos esferas a la misma vez, ya que tienen el suficiente espacio en la base de impresión como se ve en la Figura 4-18.

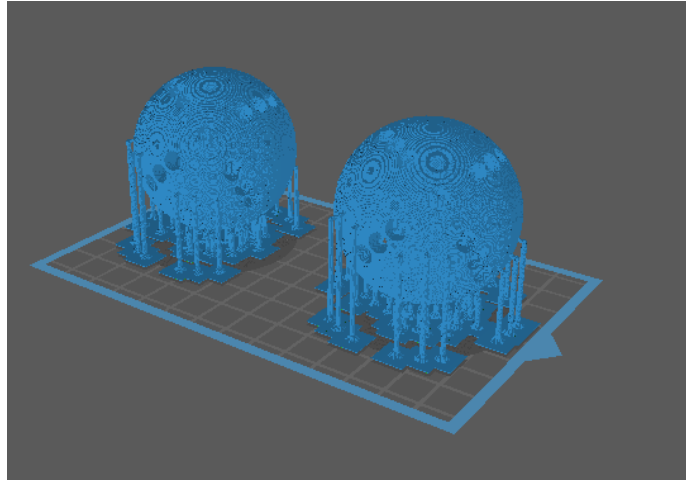


Figura 4-18. Prueba de impresión con resina flexible. de dos esferas representadas en el *software* de uso previo a la impresión (Fuente: Elaboración propia)

Sin embargo, la impresión falla y sobre la base de impresión solo quedan las primeras capas y la parte inicial de los soportes [ver Figura 4-19].

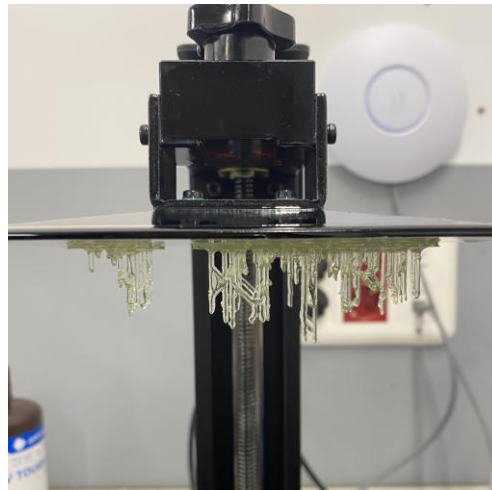


Figura 4-19. Fallo de impresión esferas de resina flexible (Fuente: Elaboración propia)

Tras realizar varias modificaciones de los parámetros de impresión y su posterior impresión no se consigue fabricar la pieza. Por lo tanto, se busca la solución en modificar las características de los soportes como; la forma de contacto, la superficie de contacto entre el soporte y la pieza, el diámetro del soporte, etc. Finalmente se consigue solucionar este problema y se fabrica la esfera de resina flexible. [ver Figura 4-20]



Figura 4-20. Esfera de 45 mm impresa mediante SLA (Fuente: Elaboración propia)

Para este tipo de piezas la resina flexible no es la más adecuada debido a que las propiedades de flexibilidad no se manifiestan en la esfera. Además, este material es bastante más caro que la resina estándar por lo que incrementaría su precio. Otro inconveniente que presenta es la dificultad para limpiar la pieza. Después de realizar varios lavados con alcohol isopropílico al 99 % de concentración la pieza sigue siendo bastante pegajosa, por lo que requiere de un postprocesado muy laborioso y que supone una notable pérdida de tiempo por pieza. Por todas estas razones se decide descartar como material de impresión y se recurre a la resina estándar.

Esta esfera, cuyas características están indicadas en la Tabla 4-12, se fabrica también en filamento [ver Figura 4-21] haciendo uso de la impresora FDM. Así se pretende comparar la calidad de ambas piezas impresas en función de la tecnología de impresión empleada.

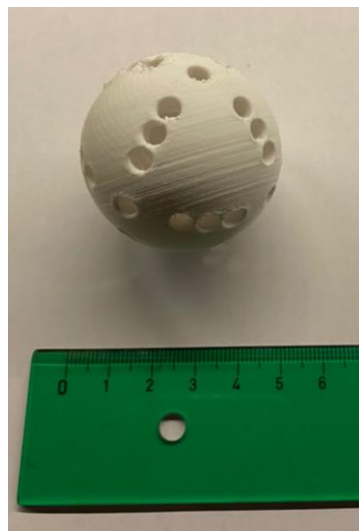


Figura 4-21. Esfera de 45 mm impresa mediante FDM (Fuente: Elaboración propia)

Para la fabricación de esta esfera en filamento se deben seleccionar los parámetros de impresión adecuados. Al haber detalles tan pequeños se deben elegir con cautela para evitar fallos de impresión. Se seleccionan los parámetros indicados en la

Parámetros	Valores
Altura de capa	0,1 mm
Soporte	Sí, pero no necesita en el interior de la esfera
Ancho de boquilla	0,6 mm
Retracción	3 mm
Tiempo de impresión	38 min
Peso	27 gramos

Tabla 4-14. Parámetros de impresión de la esfera 4. impresa mediante FDM (Fuente: Elaboración propia)

Las esferas impresas con estas dimensiones sí que son manejables, se podrían usar correctamente para realizar montajes de estructuras. Esta pieza haría de nudo entre los elementos de los diferentes elementos por lo que la correcta elección del material será de gran importancia para conseguir un kit de piezas de buena calidad. Esta esfera requiere de una barra que la complemente para formar las estructuras que son objeto de estudio y análisis.

4.2.4.2 Barra

La barra que debe encajar en los orificios de la esfera precisa de un diseño sencillo, basado en una superficie circular que se extruye tantos milímetros como se necesiten. Además, se debe diseñar las cabezas de la barra para que encajen perfectamente en las esferas. Las tolerancias de ambos elementos serán muy importantes para conseguir un encaje de calidad.

En primer lugar, se diseña una barra [ver Figura 4-22] de prueba para imprimir mediante SLA. El objetivo de realizar esta primera prueba es crear una pequeña pieza que sirva para comprobar si la barra encaja con la esfera. Además, se ahorra bastante tiempo de impresión ya que no es necesario imprimir la barra por completo.

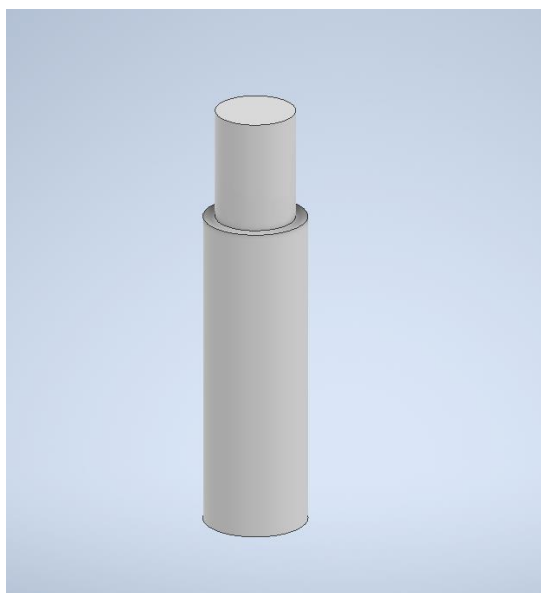


Figura 4-22. Diseño de la barra de prueba (Fuente: Elaboración propia)

Se indican las características de la pieza en la Tabla 4-15

Características	Descripción
Longitud de la barra	20 mm
Longitud del extremo de la barra	5 mm
Método de unión	Apriete
Diámetro	6,5 mm
Diámetro del extremo	5 mm

Tabla 4-15. Características de la barra de prueba (Fuente: Elaboración propia)

Una vez impresa la pieza se introduce en el orificio de la esfera. A pesar de ser el diámetro de la esfera del mismo tamaño que el de la barra no encajan, ya que el diámetro de la cabeza de la barra es algo mayor que el orificio.

Los parámetros de impresión de la barra [ver Figura 4-22] se indican en la Tabla 4-16.

Parámetros	Valores
Tipo de resina	Estándar color beige
Altura de capa	0,1mm
Número de capas inferiores	4
Tiempo de exposición	6s
Soportes	No
Tiempo de impresión	40 min

Tabla 4-16. Parámetros de impresión de la barra de prueba (Fuente: Elaboración propia)

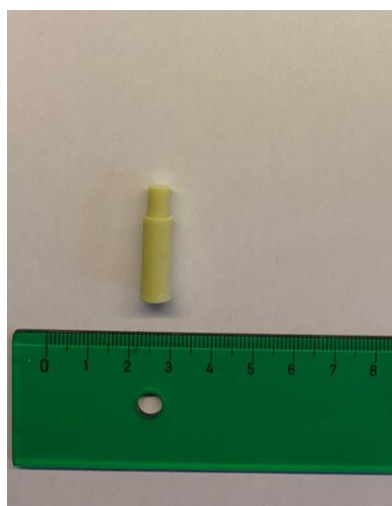


Figura 4-23. Barra de prueba impresa mediante SLA (Fuente: Elaboración propia)

Para conseguir que la barra encaje correctamente se hacen sucesivas impresiones modificando el tiempo de exposición de la resina. Comparando las diferentes barras que se han impreso con diferentes tiempos de exposición se aprecia como algunas son más duras que otras, y por lo general presentan diferencias al tacto. No obstante, todas ellas siguen sin encajar en la esfera.

Para solucionar este problema se decide diseñar varias barras como las anteriores con diferentes diámetros en la parte del encaje cada una. Se fabrican 10 barras con diámetros que van desde los 4,9 mm a los 4 mm, cada uno de 0,1 mm menos que el anterior para conseguir acotar entre que dos dimensiones se encuentra el encaje óptimo. Una vez impresas se prueban todas ellas y se comprueba como las barras de 4,2 mm y la de 4,3 mm son las más adecuadas. Sin embargo, se ve como no en todos los orificios el encaje es exactamente el mismo para la misma barra, ya que las imperfecciones de la impresión hacen que algunos orificios sean algo diferentes a otros. Por esto se decide implementar una modificación que permita que las barras encajen bien en todos los orificios.

Para ello se diseña una barra cuyo cuerpo es exactamente igual al anterior, de forma cilíndrica y de 150 mm de longitud, pero con un encaje con forma de tronco de cono [Figura 4-24].

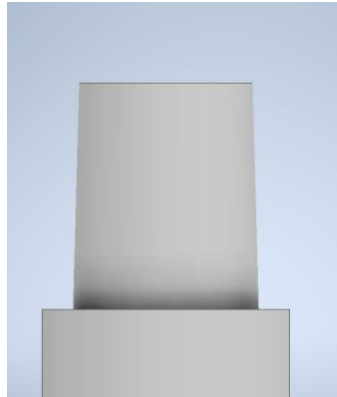


Figura 4-24. Cabeza de la barra 4 con forma de tronco de cono (Fuente: Elaboración propia)

Se imprimen las barras de 150 mm para comprobar que la barra encaja correctamente en la esfera. Por las dimensiones de la barra y las características de la impresora disponible es preciso imprimir la barra en diagonal [Figura 4-25]

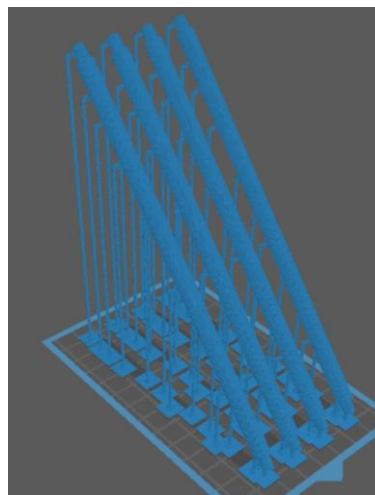


Figura 4-25. Barras de diseño 4 sobre base de impresión, orientadas diagonalmente para evitar que salgan de la superficie de impresión (Fuente: Elaboración propia)

Las características de las barras que se imprimen definitivamente son las que se indican en la Tabla 4-17. De la misma forma, los parámetros de impresión de la barra se indican en la Tabla 4-18.

Características	Descripción
Longitud	150 mm
Longitud del extremo de la barra	6 mm
Método de unión	Apriete
Diámetro	6,5 mm
Diámetro del extremo	5 mm

Tabla 4-17. Características de la barra 4 (Fuente: Elaboración propia)

Parámetros	Valores
Tipo de resina	Estándar color beige
Altura de capa	0,1mm
Número de capas inferiores	4
Tiempo de exposición	6s
Soportes	No
Tiempo de impresión	4h 33 min
Peso	10 gramos

Tabla 4-18. Parámetros de impresión de la barra 4 impresa mediante SLA (Fuente: Elaboración propia)

Como se puede apreciar en la Tabla 4-18 el tiempo de impresión es de más de 4 horas, esto se debe a que hay que imprimir la barra prácticamente vertical para que entre en la superficie del soporte. Es decir, la barra no se puede imprimir en la impresora horizontalmente porque los extremos salen la base de impresión.

Una vez finaliza la impresión se comprueba que dos barras se imprimen correctamente [ver Figura 4-26] y las otras dos presentan algunos defectos [ver Figura 4-27].



Figura 4-26. Barras de diseño 4 impresa mediante SLA (Fuente: Elaboración propia)



Figura 4-27. Barras de diseño 4 impresa mediante SLA (Fuente: Elaboración propia)

Al ver este fallo de impresión que provoca que dos barras de cuatro se hayan impreso incorrectamente se decide volver a realizar otra impresión sin modificar ningún parámetro. El resultado de esta segunda impresión es exactamente el mismo, las dos barras situadas en la misma posición sobre la base de impresión vuelven a presentar los mismos defectos. Se considera entonces que la impresora sufre un pequeño defecto en una zona concreta. La solución a este problema consiste en colocar las piezas fuera de este lugar.

Las dos barras que de la Figura 4-26 encajan perfectamente en todos los orificios de la esfera. Además, al introducirlas en dos orificios contiguos no tocan entre ellas. Por lo tanto, se decide crear el kit de piezas con estas barras y la esfera de la Figura 4-16.

La resina estándar de color beige se acaba y se usa una resina estándar transparente de las mismas características con la que se imprimirá el kit final. En un principio la resina azul debería contraerse en la misma proporción que la beige, pero no es así. Cuando se fabrican las piezas y se vuelven a imprimir estas nuevas barras se comprueba que ha sufrido una mayor contracción y las barras ahora no entran en los orificios. Se vuelven a imprimir unas 10 barras cuyos diámetros de la parte de enganche oscilan entre los 5,5 mm y los 4,6 mm para ver cuál es la que encaja de forma más exacta en los orificios. Se comprueba como ahora con esta resina la barra que mejor se adapta es la de 5,1 mm. Se opta por imprimir todas las barras necesarias con estas características. Estos fenómenos de contracción que como se ha comprobado están presentes siempre deben ser objeto de un futuro estudio, ya que pese a haber información referida en internet, esta es muy escasa y en ocasiones contradictoria.

Para hacer la estructura con las piezas de filamento se imprime también las barras usando este material. Los parámetros de impresión de la estructura de filamento se indican en la Tabla 4-19.

Parámetros	Valores
Altura de capa	0,1 mm
Soporte	Sí, pero reducido
Ancho de boquilla	0,6 mm
Retracción	3 mm
Tiempo de impresión	28 min
Peso	6 gramos

Tabla 4-19. Parámetros de impresión de la barra 4 impresa mediante FDM (Fuente: Elaboración propia)

La barra de filamento se imprime finalmente [ver Figura 4-28]. Como se puede ver el extremo de la barra no se imprime correctamente, esto ocurre en casi todas las barras. La impresora de filamento no

imprime con tanta calidad como la de resina. Al introducir estas barras en las esferas se comprueba que en muchos orificios no encaja correctamente y en otros queda con holgura.



Figura 4-28. Barra de diseño 4 impresa mediante FDM (Fuente: Elaboración propia)

Se decide hacer otra barra similar a esta, pero con los extremos más largos y puntiagudos [ver Figura 4-29]. El objetivo de aplicar esta modificación es conseguir que el extremo encaje bien en todos los orificios de la esfera, ya que unos son más grandes que otros debido a la baja calidad dimensional.

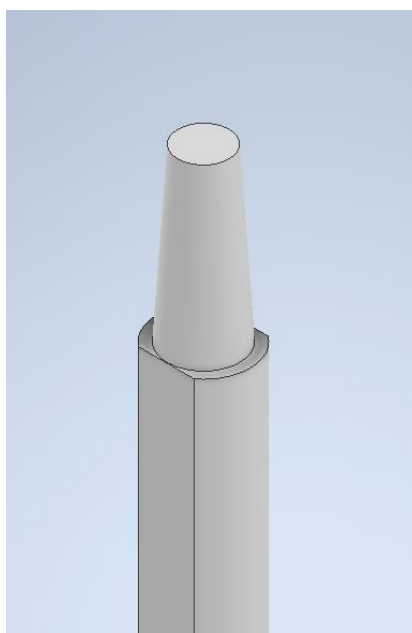


Figura 4-29. Cabeza de la barra 4 para la estructura de filamento (Fuente: Elaboración propia)

En la impresión de esta nueva pieza se usan los mismos parámetros de impresión que en la anterior [ver Tabla 4-19]. Gracias a este cambio se consigue que todas las barras de filamento encajen correctamente en todas las esferas [ver Figura 4-30].



Figura 4-30. Barra de diseño 4 impresa mediante FDM, con modificación en el extremo para permitir una correcta unión (Fuente: Elaboración propia)

4.2.4.3 Soportes de la estructura

Para apoyar la estructura final sobre una superficie lisa se diseñan unos soportes. Estos soportes tienen forma de semiesfera, pero con una base de mayor área que eviten deslizamientos con la superficie de apoyo. Los soportes de la estructura tienen las características de la Tabla 4-20.

Características	Descripción
Diámetro de la semiesfera	45 mm
Diámetro del orificio	5 mm
Orificios	13 orificios separados 15, 30 y 45°
Grosor del soporte	8 mm

Tabla 4-20. Soportes de la estructura (Fuente: Elaboración propia)

Además de contar con estas especificaciones cabe destacar que la base de apoyo es de 65 mm de diámetro para conseguir que haga el mayor contacto posible como se puede ver en la Figura 4-31,

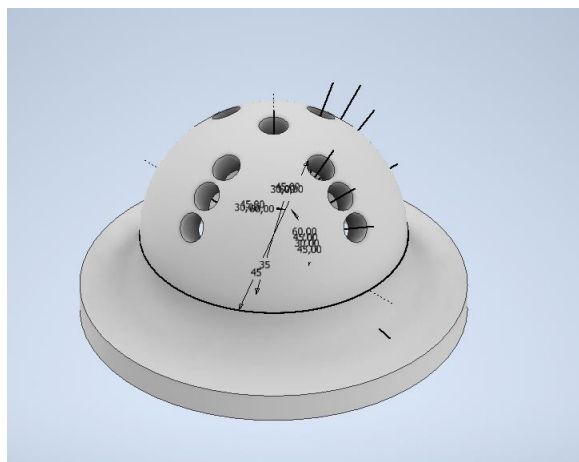


Figura 4-31. Soporte de la estructura (Fuente: Elaboración propia)

Su diseño se hace de la misma forma que la esfera, pero para la parte de la base se crea un perfil redondeado que se revoluciona 360° sobre el eje que pasa por el orificio principal formándose de esta forma la pieza.

Los parámetros de impresión de esta pieza son similares a los de las piezas anteriores, la principal diferencia es que en esta pieza se busca que sea de un peso lo suficientemente grande como para soportar la estructura, a diferencia que en las esferas y las barras donde el objetivo principal era optimizar el peso para reducir de esta forma el consumo de material.

En el caso del soporte fabricado mediante estereolitografía se introducen los parámetros de impresión reflejados en la Tabla 4-21. Y para el caso del soporte creado mediante la impresora de filamento los parámetros de impresión son los que se reflejan en la Tabla 4-22.

Parámetros	Valores
Tipo de resina	Estándar
Altura de capa	0,1 mm
Número de capas inferiores	4
Tiempo de exposición	6 s
Soportes	Sí, en la base
Tiempo de impresión	1 h 36 min
Peso	33 gramos

Tabla 4-21. Parámetros de impresión de los soportes de la estructura para impresora SLA (Fuente: Elaboración propia)

Parámetros	Valores
Altura de capa	0,2 mm
Soporte	Sí, pero reducido
Ancho de boquilla	0,6 mm
Retracción	3 mm
Tiempo de impresión	2 h 58 min
Peso	39 gramos

Tabla 4-22. Parámetros de impresión de los soportes de la estructura para impresión FDM (Fuente: Elaboración propia)

Finalmente, las piezas impresas quedan como se muestra en la Figura 4-32 para el caso del soporte impreso mediante SLA. Para el caso del soporte impreso con FDM la pieza queda como se muestra en la Figura 4-33.

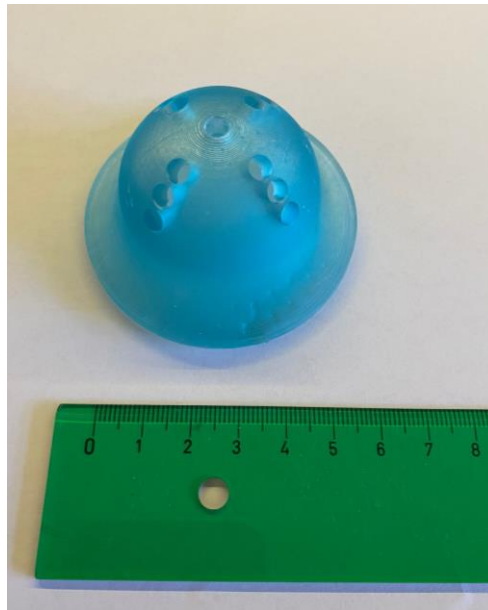


Figura 4-32. Soporte de la esfera fabricado mediante SLA (Fuente: Elaboración propia)



Figura 4-33. Soporte de la esfera fabricado mediante FDM (Fuente: Elaboración propia)

Al comparar estas dos piezas se observa que la de resina presenta un mejor acabado superficial, como suele ser habitual. Además, el soporte de resina se fabrica en un tiempo mucho menor que el de filamento.

Con el diseño y fabricación de estos soportes se da por concluida esta fase.

4.3 Selección del diseño final

Finalmente se opta por fabricar una estructura con las piezas del Cuarto diseño debido al tamaño reducido que presenta y el gran número de orificios con los que cuenta la esfera, lo que permite introducir barras para crear estructuras tridimensionales ofreciendo un gran número de posibilidades y configuraciones. Estas piezas cumplen con uno de los principales objetivos, desarrollar piezas que permitiesen simular estructuras reticulares formadas por vigas, pilares, nudos articulados y apoyos.

El material que se escoge para la elaboración del kit es la resina ya que presenta una serie de ventajas frente al filamento:

- Menor tiempo de impresión. Las piezas fabricadas mediante SLA se hacen en un menor periodo de tiempo que las hechas con FDM.
- Mejor acabado superficial. La suavidad y el buen acabado que tienen las piezas de resina no lo presentan las de FDM. Si se quisiera imprimir una pieza con filamento con un acabado superficial similar aumentaría el tiempo de impresión notoriamente.
- Simplicidad en la selección de los parámetros de impresión. Esta tecnología de fabricación no requiere de un conocimiento tan amplio como el FDM.

No obstante, también presenta algunos inconvenientes:

- La fabricación de cada pieza requiere de un lavado con alcohol isopropílico al 99 % de concentración.
- El mantenimiento de estas impresoras es mayor, ya hay que limpiar con frecuencia la bandeja en la que se deposita la bandeja para eliminar posibles restos sólidos.

En el Anexo III: Planos se recogen indican las cotas de las piezas que forman parte del diseño final.

5 VALIDACIÓN DEL MODELO INTERACTIVO OBTENIDO

Como ya se ha indicado anteriormente se ha escogido el cuarto diseño y el material seleccionado ha sido la resina por las ventajas que tiene frente al filamento. Por lo que se decide imprimir 23 barras, 10 esferas y 4 apoyos que permitan construir diferentes estructuras con fines didácticos. Este kit tiene el número mínimo de elementos que permite construir un puente con cerchas.

Para fabricar este kit es preciso tener acceso a un *software* de diseño CAD (Inventor), al *software* que traduce el formato de los archivos (Chitubox) y a una impresora 3D de SLA. Se puede usar cualquier resina para fabricarlo, en este caso se usa una resina estándar. El precio de fabricación depende del peso de cada pieza y del precio del material [ver Tabla 5-1].

Precio del modelo de resina					
Pieza	Peso (gr)	Precio/ Kg	Precio Unidad (€)	Unidades	Precio de todas las piezas (€)
Esferas	26	32	0,832	10	8,32
Barras	10	32	0,32	23	7,36
Soportes	33	32	1,056	4	4,224
Precio final					19,904

Tabla 5-1. Precio del kit fabricado mediante SLA (Fuente: Elaboración propia)

Teniendo en cuenta el número de piezas a fabricar, el peso de estas y el precio de la resina se calcula que el precio del kit es de 19,90 €.

5.1 Montaje de estructuras

- Pórtico

Los pórticos son estructuras sometidos a diferentes esfuerzos, principalmente la flexión. Es una de las formas más comunes en estructuras [ver Figura 5-1]. Están formados por dos pilares y una viga. Suelen estar fabricados de cemento, hormigón o de perfiles laminados comerciales. Es muy común que las naves industriales estén formadas por varios pórticos unidos entre sí.



Figura 5-1. Nave industrial formada por diferentes pórticos (Fuente: Página web de la empresa de construcción de naves industriales “Gilva”)

Con el kit fabricado se pueden montar pórticos, lo que permite al alumno ver cómo se comporta esta estructura de forma experimental. Las esferas del pórtico simulan los nudos articulados y las barras simulan los pilares y las vigas. Como se puede ver en la Figura 5-2 el conjunto de piezas utilizado cumple con los requisitos de diseño.

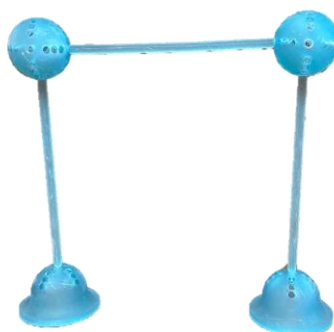


Figura 5-2. Pórtico formado con las piezas de resina (Fuente: Elaboración propia)

- Puente de cerchas

Los puentes de cerchas son estructuras de ingeniería diseñadas para soportar cargas pesadas a través de una combinación de elementos triangulados. Estas estructuras suelen estar hechas de barras de acero conectadas entre sí [ver Figura 5-3]. Este tipo de puentes se fabrican con frecuencia debido a su eficiencia estructural ya soportan mucho peso y pueden ser bastante largos.



Figura 5-3. Puente de cerchas (Fuente: Página web revista digital de arquitectura)

Fabricar un puente con el modelo de estructuras fabricado es muy útil para aplicarlo en el ámbito académico, ya que se está recreando una de las estructuras más típicamente empleadas en el mundo de la ingeniería civil. Por esto es de interés que los alumnos conozcan el funcionamiento de estas estructuras y pueden experimentar con ellas. Estudiar cómo se comportan las barras y los nudos articulados es de gran utilidad.

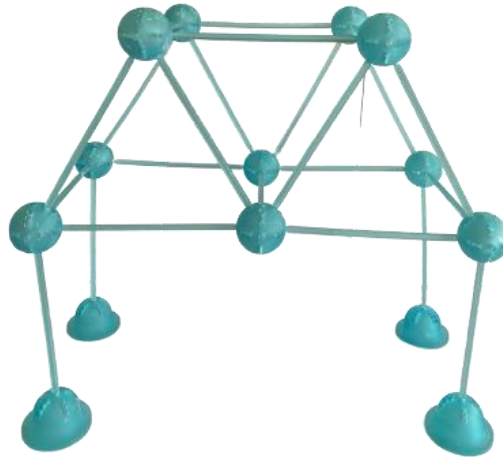


Figura 5-4. Puente de cerchas construido con el kit desarrollado (Fuente: Elaboración propia)

El modelo desarrollado permite al alumno construir un puente de cerchas que simule uno real. Con el kit de la Figura 5-4 se pueden analizar los esfuerzos que soporta la estructura, y las deformaciones que presenta ya que cumple con los requisitos de diseño establecidos.

6 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

6.1 Conclusiones

El principal objetivo del TFG era conseguir diseñar y fabricar un modelo interactivo para uso docente mediante fabricación aditiva. Durante el desarrollo del producto se siguió un proceso iterativo que se repitió varias veces hasta conseguir el principal objetivo. En conclusión:

- Se ha seguido el método definido en el apartado 1.4 para el diseño y desarrollo de las piezas que forman el kit.
- Las piezas que diseñan mediante el *software* CAD pueden no corresponderse exactamente con la pieza fabricada. Esto se aprecia sobre todo en piezas con formas diminutas que requieren de una muy buena precisión dimensional. Cuando se realizan piezas que deben encajar se suelen dar problemas. En el caso de la impresión FDM suelen quedar restos sobre la superficie que no permiten un encaje limpio y exacto, para la impresión SLA se producen fenómenos de contracción que varían en función del material empleado y el tiempo de exposición seleccionado para la impresión.
- La impresión 3D es una tecnología muy arraigada hoy en día. No obstante, es difícil encontrar fuentes de información que indiquen u orienten sobre como seleccionar ciertos parámetros de impresión que permitan que nuestra pieza adquiera la mayor calidad posible.
- La impresión con filamento es una tecnología mucho más limpia que la de resina. En esta última hay que dedicar mucho tiempo a limpiar las piezas, la bandeja de impresión etc.
- Los tiempos de impresión para dos piezas iguales pueden ser muy diferentes. En el caso de la impresión con resina depende principalmente de la altura de cada capa y el del tiempo de exposición, fabricar dos piezas en la misma base de impresión no supone un aumento del tiempo, lo que es una gran ventaja. Para la impresión con filamento este tiempo depende de la velocidad a la que se mueva el extrusor, del porcentaje de relleno que tenga la pieza y de la altura de capa.
- Gracias a las nuevas tecnologías emergentes se pueden desarrollar productos que ayuden al alumnado a asimilar los conceptos básicos de la materia mientras realizan actividades didácticas e interactivas.

El modelo interactivo es de útil para la docencia ya que permite que los alumnos puedan realizar montajes de estructuras reticulares con las piezas que se fabrican. Gracias al gran número de orificios que tiene la esfera y a la disposición de estos se pueden recrear edificios, pórticos y puentes de cerchas entre otras más posibles configuraciones. Por lo tanto, el kit desarrollado permite realizar el montaje de estructuras muy habituales en ingeniería civil y arquitectura.

6.2 Líneas futuras

El objetivo principal ha sido diseñar y construir una estructura mediante fabricación aditiva para uso docente, por ello se ha desarrollado el kit de piezas. Durante la fase de desarrollo han ido surgiendo una serie de imprevistos que se han resuelto sin mayor dificultad, pero han ralentizado el ritmo de trabajo. La fabricación aditiva ofrece un sinnúmero de posibilidades para seguir desarrollando piezas, o perfeccionar las ya existentes. Por lo tanto, existe la posibilidad de continuar trabajando sobre el presente proyecto.

En primer lugar, una propuesta para continuar trabajando sobre el TFG sería la creación de otras figuras que puedan seguir mejorando la estructura. Asimismo, es conveniente probar nuevos métodos como los mencionados en el apartado 2.2. De esta forma se podrían crear elementos similares a la esfera, y que quizás necesiten menos material para fabricarlo. Una pieza de unión similar a la del kit “Flexistick” podría facilitar la unión de las barras. El diseño sería de la misma complejidad y la unión entre la barra y este elemento podría mejorar. Otra opción de interés es conseguir crear una barra con extremos imantados que se unan a bolas como las del modelo “Geomag”.

En segundo lugar, realizar un estudio sobre la contracción de la resina durante la impresión es de gran utilidad. Se puede crear un diseño CAD de un orificio de 10 mm de diámetro y una barra de 10 mm de diámetro también e imprimirlo en numerosas ocasiones variando en cada una de las impresiones algunos parámetros como; el tiempo de exposición, la velocidad de retracción y altura de la capa. Una vez impresas estas piezas se deben medir con un pie de rey o un micrómetro el diámetro de la barra que se ha fabricado y el diámetro del orificio, para así ver qué diferencia se da entre ambas piezas y conseguir encontrar los parámetros que lleven a perfeccionar este problema. Repetir la metodología con diferentes materiales es de utilidad para conocer cómo se comportan los diferentes tipos de resinas y así solucionar este problema para una gama de materiales más amplia. Una vez hechas todas estas pruebas se podrían almacenar todos estos datos en una tabla de Excel y así comparar con gráficas las diferentes contracciones que presentan los materiales al modificar sus parámetros. Crear una base de datos sobre esto y compartirla puede ayudar a solucionar este problema.

En último lugar, se considera de interés la medición de las deformaciones de las barras de forma exhaustiva. Realizar diferentes montajes de estructuras y someterlos a esfuerzos permitiría conocer de forma más exhaustiva cómo se comportan estas piezas. El uso de elementos de medición como relojes comparadores es útil para llevar a cabo este proyecto. Sería conveniente hacerlo con bastantes estructuras hechas de diferentes materiales.

7 BIBLIOGRAFÍA

- [1] P. E. Blosser, «Nasrt,» 2018. [En línea]. Available: <https://narst.org/research-matters/laboratory-in-science-teaching>.
- [2] K. T. & Akpan, «The role of laboratory in science teaching and learning,» *Science Education*, 2017.
- [3] N. V. K. Jasti, «An impact of simulation labs on engineering students' academic performance: a critical Investigation,» *Journal of Engineering, Design and Technology*, 2020.
- [4] M. Sequeira, «Mola Estructural,» 2010. [En línea]. Available: <https://molamodel.com/collections/products>.
- [5] P. Hildebrant, «Zometool,» 2023. [En línea]. Available: <https://www.zometool.com/>.
- [6] Beicarín, «Amazon,» [En línea]. Available: https://www.amazon.es/magn%C3%A9ticos-construcci%C3%B3n-educativos-rompecabezas-almacenamiento/dp/B09KZWRWFD/ref=sr_1_30?__mk_es_ES=%C3%85M%C3%85%C5%BD%C3%95%C3%91&crid=1EUDH49MX7LGR&keywords=magnetix&qid=1675410791&sprefix=magnetix%2Caps%2C203&sr=8-30.
- [7] Geomag, «Geomag,» [En línea]. Available: <https://www.geomagworld.com/es/>.
- [8] Tiny Land, «Amazon,» [En línea]. Available: https://www.amazon.es/Tiny-Land-construcci%C3%B3n-Fortaleza-a%C3%B1os-Juguetes/dp/B09M875VVC/ref=sr_1_1_sspa?adgrpid=1296324645350929&hvadid=81020379415232&hvbmt=be&hvdev=c&hvlocphy=3217&hvnetw=o&hvqmt=e&hvtargid=kw-d-81020530325089%3Aloc-170&hydadcr=23825.
- [9] Flexistick, «Amazon,» [En línea]. Available: https://www.amazon.es/Tiny-Land-construcci%C3%B3n-Fortaleza-a%C3%B1os-Juguetes/dp/B09M875VVC/ref=sr_1_1_sspa?adgrpid=1296324645350929&hvadid=81020379415232&hvbmt=be&hvdev=c&hvlocphy=3217&hvnetw=o&hvqmt=e&hvtargid=kw-d-81020530325089%3Aloc-170&hydadcr=23825.

- [10] Magnatile, «Magnatile,» [En línea]. Available: <https://www.magnatiles.com/>.
- [11] Magformers, «Magformers,» [En línea]. Available: http://magformers.es/ghome/es/products/product_view.asp?PCD=150.
- [12] M. Ramis, «Proyecto Idis,» [En línea]. Available: <https://proyectoidis.org/la-fotocultura-de-francoise-willeme/>.
- [13] F. J. V. S. y. F. J. A. López, «Tecnica Industrial,» [En línea]. Available: <https://www.tecnicaindustrial.es/wp-content/uploads/Numeros/104/5021/a5021.pdf>.
- [14] J. Gaskill, «LARC,» 19 Febrero 2015. [En línea]. Available: <https://larc.cardozo.yu.edu/aelj-blog/61/>.
- [15] A. Brufau, «igus,» 1 Agosto 2019. [En línea]. Available: <https://blog.igus.es/knowledge-base/quien-invento-la-impresora-3d/>.
- [16] J. Griffey, «ALA TechSource,» Julio 2014. [En línea]. Available: <https://www.journals.ala.org/index.php/ltr/article/view/4796/5747><https://www>.
- [17] A. M, «3D natives,» 28 Julio 2022. [En línea]. Available: <https://www.3dnatives.com/es/diferencias-impresion-3d-sla-msla-280720222/#!>.
- [18] A. M., «3D natives,» 17 octubre 2022. [En línea]. Available: <https://www.3dnatives.com/es/impresion-3d-dlp-piezas-caucho-mejoradas-171020222/>.
- [19] Forma Cad Engineering, «FormaCad,» [En línea]. Available: <https://formacad.es/historia-del-cad-y-sus-origenes/>.
- [20] M. G., «3D natives,» 13 junio 2022. [En línea]. Available: <https://www.3dnatives.com/es/que-es-autodesk-inventor-130620222/>.
- [21] «Impresoras 3D,» Crelity, [En línea]. Available: <https://www.impresoras3d.com/producto/creality-ld-002h-lcd/>.
- [22] A. Regidor, «Impresion3daily,» 23 Enero 2020. [En línea]. Available: <https://www.impresion3daily.es/chitubox-el-mejor-slicer-gratuito-para-impresoras-de-resina/>.
- [23] «Impresoras 3D,» 24 mayo 2021. [En línea]. Available: <https://www.impresoras3d.com/guia-sobre-tipos-de-resinas-3d-para-imprimir/>.
- [24] «Anycubic,» [En línea]. Available: https://www.anycubic.es/products/colored-uv-resin-for-photon-series?currency=EUR&utm_medium=cpc&utm_source=google&utm_campaign=Google%20Shopping&gclid=EAIaIQobChMImoyx39is_QIVWOR3Ch3jIAckEAQYBSABEGsKvD_BwE.
- [25] «3DJAKE,» [En línea]. Available: <https://www.3djake.es/formfutura/engineering-lcd-series-flex-82a-resin-clear>.
- [26] «Artillery 3D,» [En línea]. Available: <https://artillery3d.es/artillery-sidewinder-x1/>.
- [27] «3dfils,» [En línea]. Available: <https://www.3dfils.com/es/content/tipos-filamentos-3d.html>.
- [28] «WinkleShop,» [En línea]. Available: <https://winkle.shop/>.

- [29] Alicia, «3Dnatives,» 29 junio 2022. [En línea]. Available: <https://www.3dnatives.com/es/lino3d-fabricacion-aditiva-educacion-29062022/>.
- [30] «SICNOVA,» [En línea]. Available: <https://sicnova3d.com/sectores/tecnologia-3d-medicina/tecnologia-3d-protesis-ortoprotesis/#:~:text=Por%20otra%20parte%2C%20la%20fabricaci%C3%B3n%20aditiva%20%28o%20impresi%C3%B3n,reduce%20los%20tiempos%20de%20estudio%2C%20desarrollo%20y%20producci%C3%B3n..>
- [31] «ALEGALIS,» 10 junio 2015. [En línea]. Available: <https://alegalis.com/impresion-3d-una-revolucion-a-la-industria-de-la-manufactura-o-una-pesadilla-de-propiedad-intelectual/#:~:text=La%20impresi%C3%B3n%203D%20ha%20venido%20a%20revolucionar%20la,la%20fabricaci%C3%B3n%20de%20sus%20productos%20por%20impreso.>
- [32] «inneoditec,» [En línea]. Available: <https://www.inneoditec.com/fabricacion-de-repuestos-con-impresion-3d/>.
- [33] «impresiontresde,» [En línea]. Available: <https://impresiontresde.com/una-nueva-revision-al-impacto-ambiental-de-la-impresion-3d/>.
- [34] «MasContainer,» 26 febrero 2023. [En línea]. Available: <https://www.mascontainer.com/como-los-renders-y-la-impresion-3d-pueden-cambiar-el-mundo-de-la-logistica/>.
- [35] A. M, «3D Natives,» [En línea]. Available: <https://www.3dnatives.com/es/armas-impresas-en-3d-071020202/#!>.
- [36] «I3DTested,» [En línea]. Available: <https://www.impresoras3d.com/producto/petg-i3d-tested-blanco-perla-175-mm/#:~:text=El%20filamento%20PETG%20de%20i3D%20Tested%20proviene%20del,Este%20PETG%20tiene%20un%20peculiar%20tono%20blanco%20perla..>
- [37] «Thingiverse,» [En línea]. Available: <https://www.thingiverse.com/>.

ANEXO I: IMPLICACIONES SOCIALES, Y/O ECONÓMICAS, Y/O AMBIENTALES

La impresión 3D ha tenido un impacto significativo en la sociedad desde su introducción. Esta tecnología ha revolucionado la forma en la que se producen y fabrican diferentes piezas, ya que permite una producción rápida y personalizada. Esta tecnología ha abierto nuevas oportunidades en campos como la medicina, la ingeniería y la arquitectura.

Una de las principales consecuencias que ha tenido la impresión 3D en la sociedad es la introducción de un nuevo concepto, la democratización de la fabricación. Este término hace referencia a la capacidad que han adquirido las personas de poder fabricar sus propias piezas desde casa. Hace unos años la fabricación estaba limitada a grandes empresas con un alto capital que son capaces de producir cualquier artículo. Hoy en día cualquier persona con acceso a una impresora 3D y con conocimientos básicos sobre diseño CAD es capaz de producir piezas y objetos personalizados, aunque las piezas que se pueden fabricar por esta tecnología están limitadas en tamaño y a una pequeña gama de materiales. Esto ha dado lugar a nuevas empresas que con un coste inicial relativamente bajo son capaces de producir piezas para cualquier cliente [29].

Otros aspectos de la sociedad en los que ha influido la impresión 3D es en la medicina, especialmente en la producción de prótesis y dispositivos médicos personalizados. Esta nueva tecnología combinada con el empleo de escáneres 3D permite producir prótesis personalizadas en muy poco tiempo. Estos nuevos avances han mejorado la calidad de vida de las personas, ya que pueden recibir su artículo en menos tiempo [30].

En el campo de la educación la impresión 3D también ha influido notoriamente en el desarrollo de la experimentación y el aprendizaje, ya que la posibilidad de fabricar piezas de una forma tan sencilla hace del diseño, la ingeniería y la fabricación materias más interactivas y prácticas.

Las implicaciones económicas que tiene la implantación de esta nueva tecnología en la sociedad son varias. En primer lugar, la impresión 3D ha revolucionado la industria manufacturera. Los métodos de fabricación más comunes emplean moldes y maquinaria muy costosa que requieren cierto conocimiento para uso, además en ocasiones su manipulación es peligrosa, como en el caso de un torno o una fresadora. Con la impresión 3D se pueden imprimir los objetos con una máquina cuyo manejo no requiere de conocimientos muy avanzados y se puede adquirir a un precio al alcance de cualquier persona. Estas ventajas permiten a las empresas reducir el tiempo de fabricación de los productos, lo que se traduce en un mayor rendimiento y un aumento de la productividad. Además, se pueden fabricar prototipos a un precio muy bajo, lo que permite que las empresas puedan probar sus productos y mejorarlos antes de comercializarlos [31].

La fabricación de repuestos de piezas mediante impresión 3D es otra aplicación de esta tecnología. Se pueden almacenar archivos de piezas de repuesto de automóviles, barcos, trenes, etc. Estas piezas de repuesto se pueden imprimir en caso de necesitar alguna de ellos y fabricarlo en muy poco tiempo y sin un gasto elevado. La principal ventaja que ofrece esto es la eliminación de almacenes llenos de estanterías con piezas que suponen un gran coste, ya que hay que hacer frente a los pagos de alquiler de las grandes superficies, la luz o cualquier otro gasto [32].

En definitiva, la impresión 3D es una tecnología que está transformando las industrias y tiene una gran implicación económica. Se pueden reducir los costes de producción y los tiempos de espera.

La fabricación aditiva también tiene bastantes implicaciones ambientales, unas positivas y otras negativas. En primer lugar, los materiales que se utilizan resinas compuestas de polímeros altamente contaminante y tóxicos por lo que se deben tratar de forma adecuada para no dañar el medio ambiente. Estas resinas se deben reciclar y no se pueden verter por el fregadero. En el caso de los filamentos como el PETG, ABS o PLA este problema es de más fácil solución ya que se pueden triturar los materiales, fundirse y volver a fabricar otro rollo de filamento a partir de los deshechos generados en la impresión. Hoy en día hay a la venta máquinas de uso personal que son capaces de crear un filamento reciclado a partir de los residuos, como los soportes, que deja la impresión de una pieza.

Las máquinas de impresión 3D consumen energía para funcionar. Deben mantener la cama de impresión caliente, a unos 80°, y la boquilla del extrusor a unos 250°. Esto supone un consumo de energía que a priori podría parecer elevado, pero es bastante más reducido que el que genera una máquina de mecanizado si fabricamos piezas a pequeña escala. Está demostrado que una máquina de inyección de plástico consume más energía que una impresora 3D en caso de fabricar un volumen pequeño de piezas, pero si la cantidad de piezas que se va a fabricar es muy elevada es más eficiente emplear una máquina industrial de inyección de material o mecanizado [33].

Gracias a la base de datos que se puede crear y la posibilidad de compartir a través de todo el mundo los archivos de impresión no es necesario transportar los productos acabados a largas distancias. Simplemente teniendo las máquinas distribuidas en diferentes puntos a lo largo de la geografía se puede imprimir la pieza que se necesite en la máquina más cercana ahorrando gastos de transporte y reduciendo la emisión de dióxido de carbono como consecuencia del transporte. Por lo que se está mostrando una clara tendencia a la creación bajo demanda de piezas [34].

El fácil diseño y la personalización de los productos tiene como consecuencia directa un aumento de la eficiencia y una reducción de los desperdicios, por lo que estos factores también contribuyen positivamente a reducir los residuos. La fabricación de prototipos de productos para aplicar de mejoras es otra causa del bajo impacto medioambiental de esta tecnología ya que no hay que invertir grandes recursos materiales en crear algo parecido al producto final.

En conclusión, la impresión 3D es una tecnología que tiene ventajas e inconvenientes. No obstante, los beneficios que ofrece son bastantes más. Esta nueva forma de fabricar cualquier cosa está al alcance de cualquier persona, no requiere de muchos conocimientos técnicos para saber usarlo y se puede realizar desde casa. No emite muchos residuos, y los que genera se pueden reciclar fácilmente. A nivel industrial se puede generar una amplia gama de piezas con un coste bajo, y lo que es más importante, no se necesita invertir dinero en almacenar las piezas ya que la misma máquina puede hacer la que se necesite. En el campo de la medicina está ofreciendo nuevas alternativas de prótesis personalizadas, que se generan rápido y a bajo coste. Todas estas razones hacen de la impresión 3D una herramienta vital hoy en día y que se sigue desarrollando para avanzar en temas relativos a los tiempos de fabricación, precios y reducción de desperdicios.

ANEXO II: REFLEXIONES ÉTICAS Y SOCIALES

La enseñanza interactiva se refiere a una forma de educación en la que los estudiantes aprender gracias a actividades prácticas que se desarrollan. Esta metodología está cada vez más extendida en los centros de docentes debido a la efectividad que tiene para que los alumnos asimilen los conceptos profundamente y retengan información. Este método de aprendizaje aparte de ser efectivo para comprender la materia aporta otras ventajas.

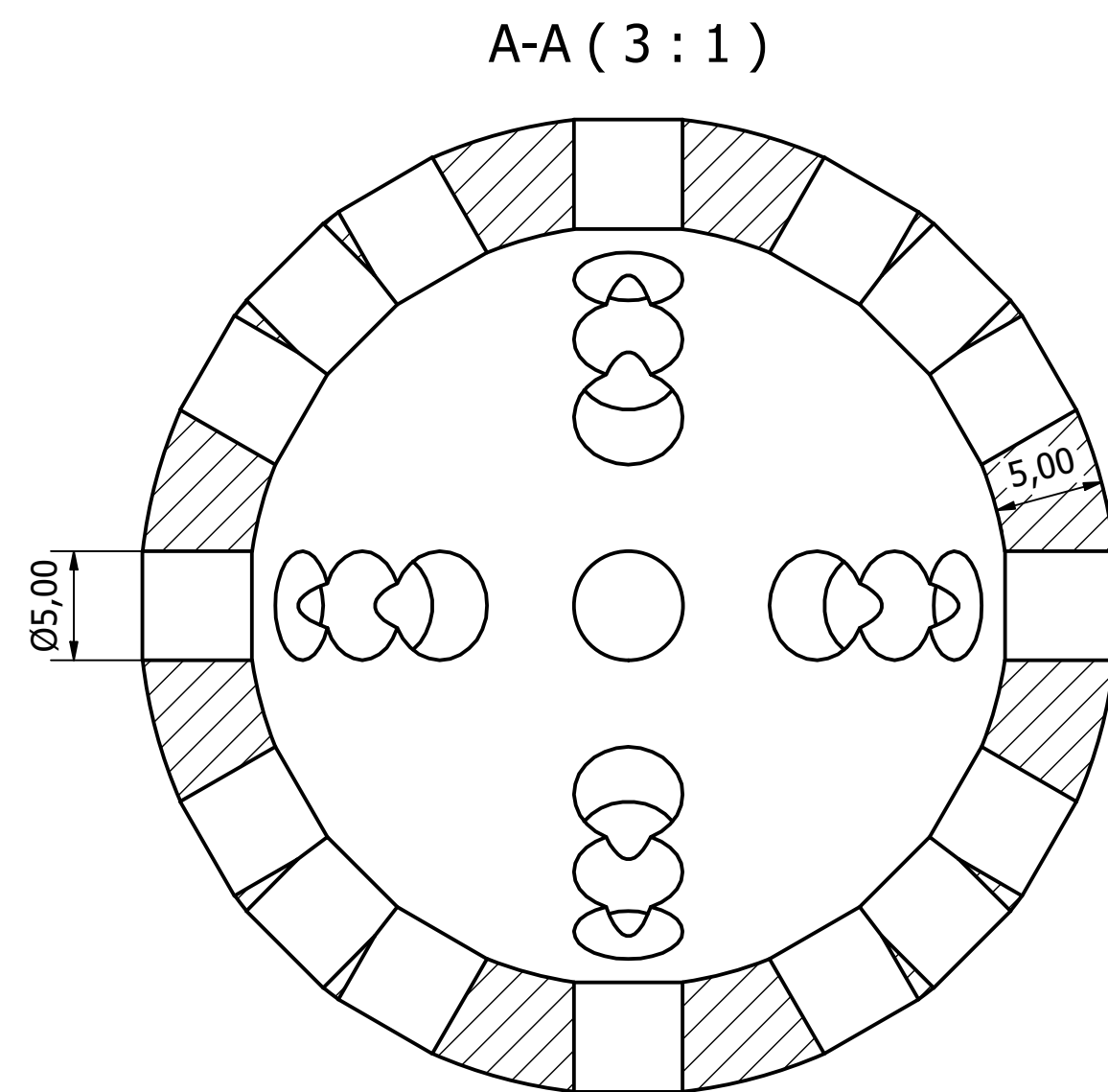
Es de interés mencionar que estas actividades suelen realizarse en grupo fomentando el compañerismo y el trabajo colectivo. Estos valores éticos son de gran relevancia ya que en muchos puestos de trabajo se busca el apoyo mutuo para alcanzar objetivos comunes. No obstante, la enseñanza interactiva puede presentar dificultades a la hora de realizar una evaluación justa. En muchas ocasiones hay una persona que lidera el grupo de trabajo, otros que contribuyen al desarrollo del proyecto y otras que se niegan a hacer nada. No es nada fácil para el profesorado distinguir cada tipo de persona en un grupo de trabajo lo que puede provocar evaluaciones injustas.

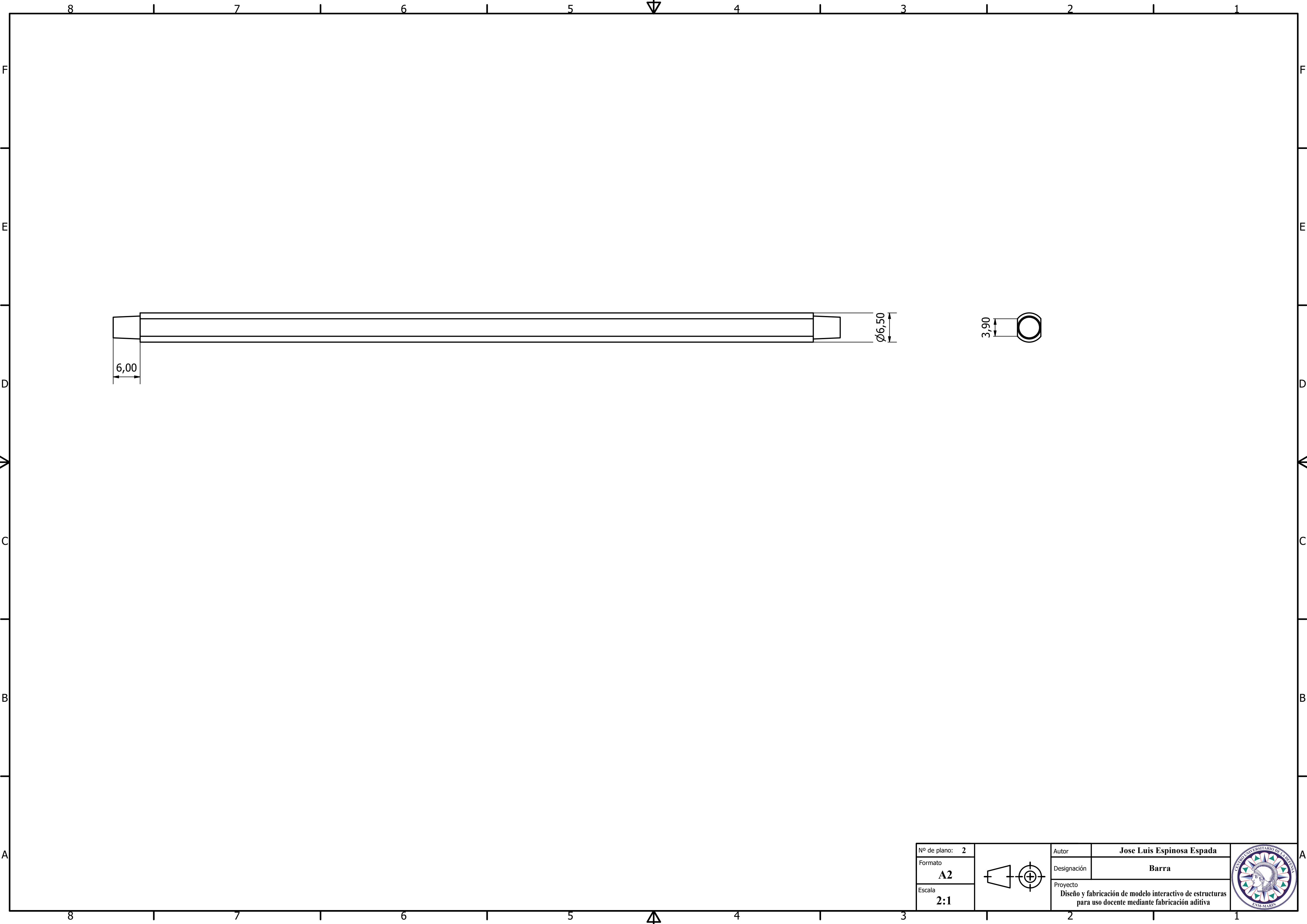
La impresión 3D ha revolucionado la industria manufacturera ya que con estas máquinas se pueden hacer una gran cantidad de objetos de una forma relativamente fácil. Sin embargo, esta tecnología es objeto de una reflexión ética.

En primer lugar, la fabricación aditiva hace posible la copia y el plagio de productos con derechos de propiedad intelectual. Esto presenta un problema para las empresas que ven disminuida la venta de ciertos artículos que se pueden falsificar fácilmente con una impresora 3D. Luchar contra este tipo de infracciones prácticamente imposible ya que hay páginas web en las que se suben públicamente los archivos de impresión. Para duplicar una pieza solo basta con descargar el archivo, pasarlo a un *pen drive* y poner a funcionar la impresora.

En último lugar, con esta tecnología se pueden fabricar armas peligrosas que sean capaces de disparar proyectiles. Esto supone un grave problema de seguridad pública, ya que es muy fácil fabricar un arma y está al alcance de todos. Cody Wilson de nacionalidad americana, lleva subiendo a la red desde el año 2012 archivos de código libre para imprimir armas con fabricación aditiva [35].

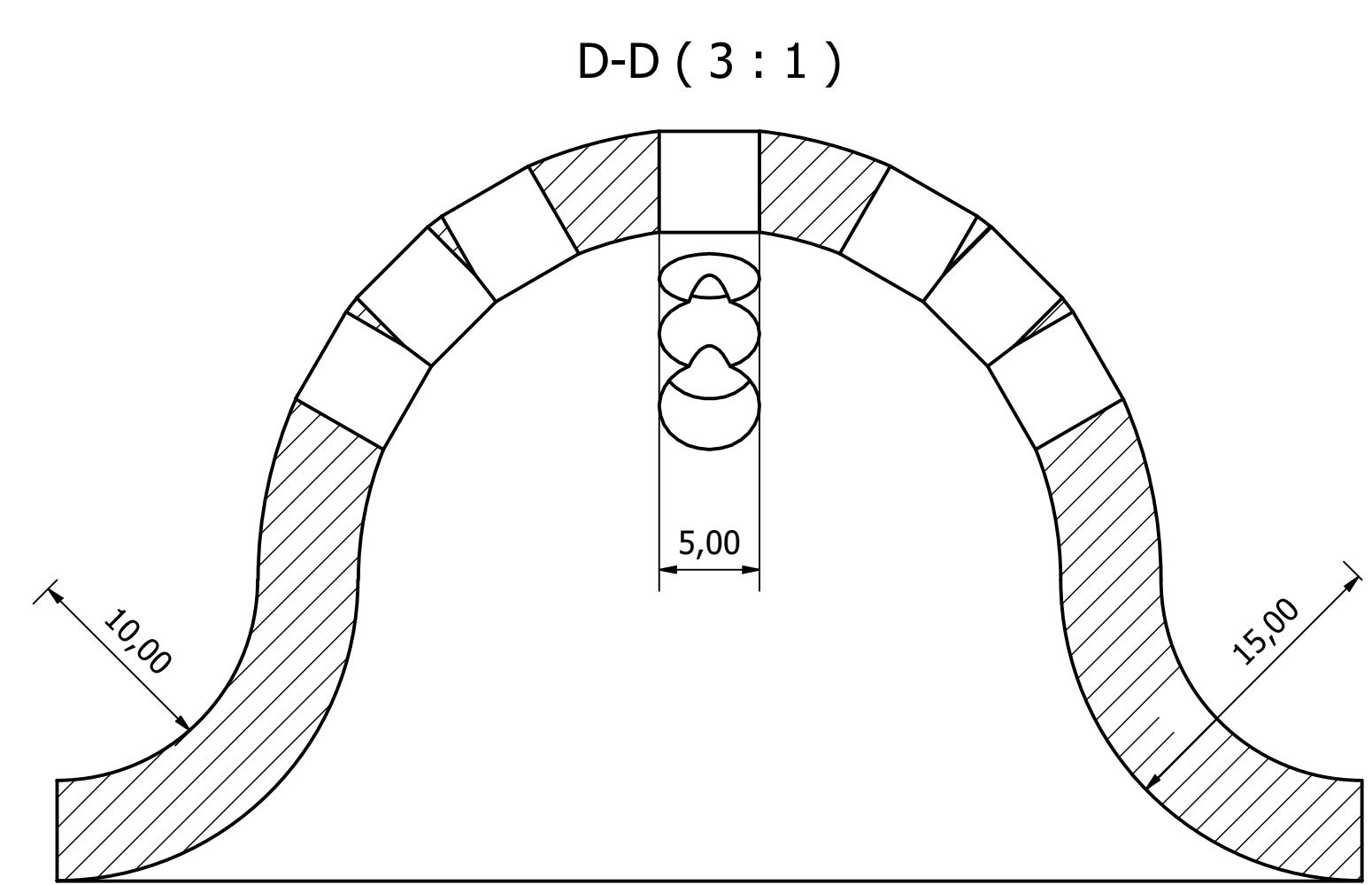
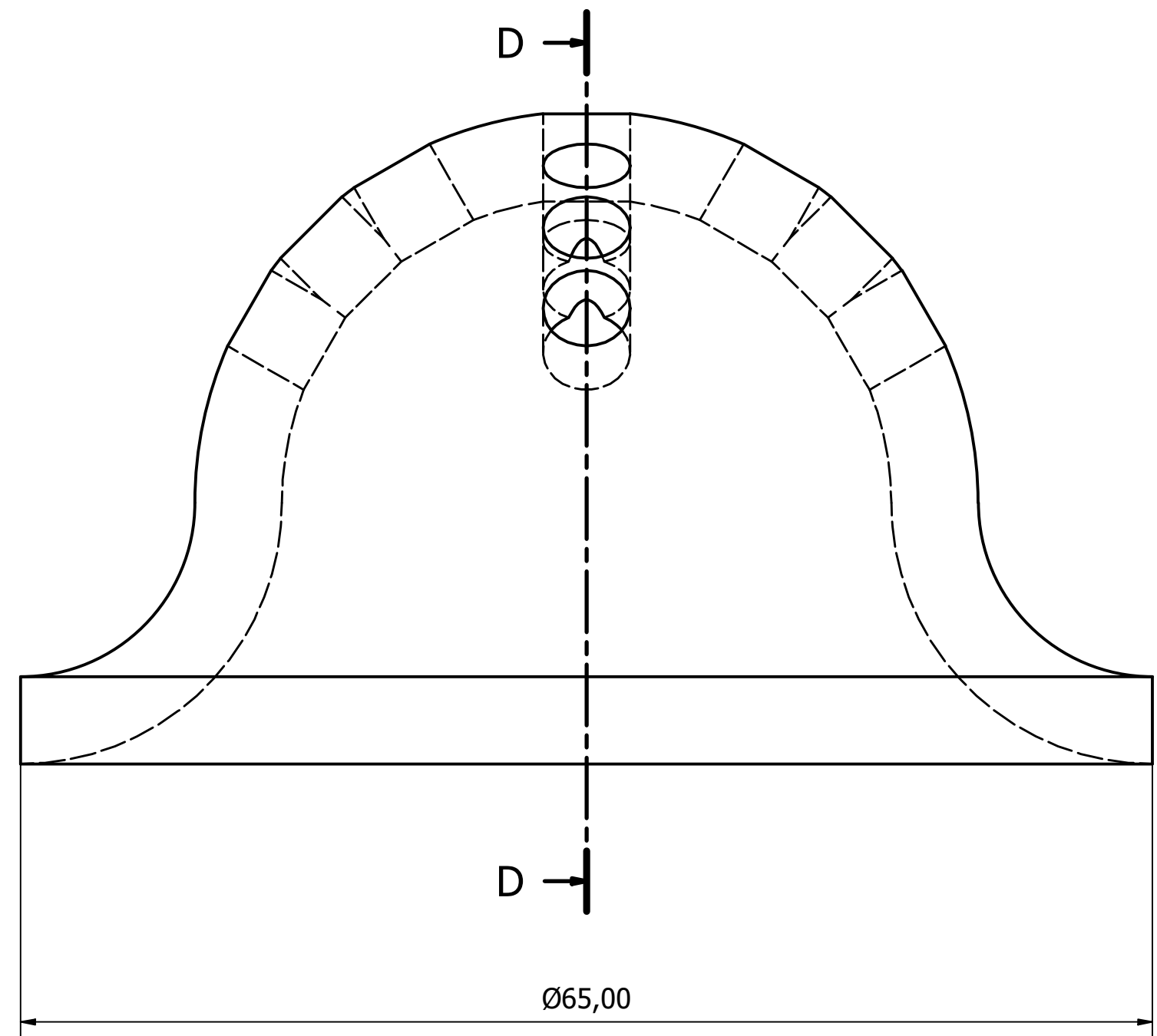
ANEXO III: PLANOS





Nº de plano: 2		Autor	Jose Luis Espinosa Espada
Formato A2		Designación	Barra
Escala 2:1		Proyecto	Diseño y fabricación de modelo interactivo de estructuras para uso docente mediante fabricación aditiva





Nº de plano:	1	Autor	Jose Luis Espinosa Espada
Formato	A2	Designación	Vista seccionada soporte
Escala	3:1	Proyecto	Diseño y fabricación de modelo interactivo de estructuras para uso docente mediante fabricación aditiva

