



universidad
de león



Escuela de Ingenierías

Industrial, Informática y Aeroespacial

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

Trabajo de Fin de Grado

MEJORAS EN UNA IMPRESORA 3D SLA DE CERÁMICAS
TÉCNICAS PARA OPTIMIZAR EL APROVECHAMIENTO DEL
MATERIAL Y LA ACCESIBILIDAD DURANTE LA
PREPARACIÓN DE LA FABRICACIÓN

IMPROVEMENTS IN A TECHNICAL CERAMICS SLA 3D
PRINTER TO OPTIMIZE MATERIAL AND ACCESSIBILITY
DURING MANUFACTURING PREPARATION

Autor: Sergio Rodríguez Murciego
Tutora: Sara Giganto Fernández
Cotutora: Susana Martínez Pellitero

(Septiembre, 2023)

UNIVERSIDAD DE LEÓN
Escuela de Ingenierías Industrial, Informática y
Aeroespacial

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA
Trabajo de Fin de Grado

ALUMNO: Sergio Rodríguez Murciego

TUTOR: Sara Giganto Fernández, Susana Martínez Pellitero

TÍTULO: Mejoras en una impresora 3D SLA de cerámicas técnicas para optimizar el aprovechamiento del material y la accesibilidad durante la preparación de la fabricación

TITLE: Improvements in a technical ceramics SLA 3D printer to optimize material and accessibility during manufacturing preparation

CONVOCATORIA: Septiembre, 2023

RESUMEN: La fabricación aditiva SLA en cerámicas técnicas es una técnica puntera. La Unidad de Fabricación e Impresión 3D (UFI3D) de la Universidad de León dispone de una impresora 3D SLA modelo 3DCeram C900 Flex. Sin embargo, al ser una máquina reciente, se han detectado sistemas con margen de mejora. En particular, en este trabajo se abordan dos de ellos:

Uno de ellos corresponde al sistema de alimentación de material, pues, independientemente del tamaño de la pieza a fabricar, la cama de impresión (300x100 mm o 300x300 mm) debe llenarse de material. Esto es un inconveniente, pues se utilizan grandes cantidades de material, el cual es una pasta cerámica muy costosa y difícil de limpiar y de reciclar. Para solucionar este problema, se realizan propuestas de diseño en base a dos premisas diferentes: en primer lugar, propuestas de soluciones que el fabricante podría implementar y, en segundo lugar, propuestas totalmente reversibles que sean viables de realizar sin modificar ni la máquina ni el software. Tras analizar las diferentes propuestas, se selecciona como más adecuada la fabricación de un depósito de alimentación modular, que permite reducir el ancho de la cama de impresión efectivo de 300 mm a 180 y 120 mm, con el correspondiente ahorro de material y tiempo de limpieza.

El otro problema que se trata en este trabajo corresponde al bloqueo de las puertas de la máquina durante la etapa de preparación de la impresión 3D. El software de la máquina obliga a cerrar las puertas durante la realización de las operaciones previas a la fabricación, impidiendo de esta forma el acceso del operario al interior. Sin embargo, esta acción no debería ser obligatoria ya que no supone riesgo y hace más tediosa la preparación de la máquina. Por ello, se aborda el diseño y la fabricación de un útil de sujeción del sensor, que permita mantener la puerta abierta durante la etapa previa a la fabricación. Para diseñar este útil, se hace uso de herramientas de ingeniería inversa y softwares

de diseño, y se proponen y estudian diferentes propuestas. Finalmente, se fabrica la propuesta seleccionada mediante una impresora 3D de extrusión de material y se verifica su funcionamiento en la máquina SLA.

ABSTRACT: SLA additive manufacturing in technical ceramics is a cutting-edge technique. The Manufacturing and 3D Printing Unit (UFI3D) of the University of León has a SLA 3D printer model 3DCeram C900 Flex. However, being a recent machine, systems with room for improvement have been detected. In particular, this work addresses two of them:

One of them corresponds to the material feeding system, as regardless of the size of the part to be manufactured, the printing bed (300x100 mm or 300x300 mm) must be filled with material. This is a drawback, since large amounts of material are used, which is a very expensive ceramic paste that is difficult to clean and recycle. To solve this problem, design proposals are made based on two different premises: firstly, proposals for solutions that the manufacturer could implement, and secondly, totally reversible proposals that are feasible to carry out without modifying either the machine or the software. After analysing the different proposals, the manufacturing of a variable size feeding tank was selected as the most appropriate, which allows the width of the effective printing bed to be reduced from 300 mm to 180 and 120 mm, with the corresponding savings in material and cleaning time.

The other problem addressed in this work corresponds to the blocking of the machine doors during the preparation stage of 3D printing. The machine's software forces the doors to be closed during operations prior to manufacturing, thus preventing the operator from accessing the interior. However, this action should not be mandatory since it does not pose a risk and makes preparing the machine more tedious. For this reason, the design and manufacture of a sensor holding tool that allows the door to be kept open during the pre-manufacturing stage is addressed. To design this tool, reverse engineering tools and design software are used, and different proposals are proposed and studied. Finally, the selected proposal is manufactured using a material extrusion 3D printer and its operation is verified in the SLA machine.

Palabras clave: Mejoras, fabricación aditiva, CAD, ingeniería inversa

Firma del alumno:

VºBº Tutora:

VºBº Cotutora:

Sergio Rodríguez Murciego

Sara Giganto Fernández

Susana Martínez Pellitero

Índice de contenido

Índice de contenido	4
Índice de figuras	6
Índice de tablas.....	9
Acrónimos.....	10
Agradecimientos.....	11
1 Introducción	12
1.1 PROCESO SLA CON CERÁMICAS TÉCNICAS	13
1.2 IMPRESORA 3DCERAM C900 FLEX	15
1.2.1 ETAPAS EN LA FABRICACIÓN SLA CON CERÁMICAS	17
2 Objetivos y Metodología	20
2.1 SISTEMA DE ALIMENTACIÓN	22
2.1.1 FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE ALIMENTACIÓN ACTUAL	24
2.2 MEJORA DE LA ACCESIBILIDAD A LA MÁQUINA DURANTE LA PREPARACIÓN PREVIA A LA FABRICACIÓN	26
3 Diseño de un sistema de alimentación	28
3.1 PROPUESTA DE DISEÑO DE UN SISTEMA CON PISTÓN Y APERTURA VARIABLE ..	28
3.2 PROPUESTA DE DISEÑO DE UN SISTEMA DE INYECCIÓN DE MATERIAL	30
3.3 DISEÑO DE UN DEPÓSITO SIMILAR AL ORIGINAL POR MEX.....	33
3.4 DISEÑO DE UN DEPÓSITO DE CAPACIDAD MODULAR.....	35
4 Diseño del útil de accesibilidad a la máquina durante la preparación de la impresión 40	
4.1 INGENIERÍA INVERSA DEL ÚTIL DISPONIBLE	40
4.2 PRIMERA PROPUESTA DE ÚTIL DE SUJECIÓN	46

4.3	SEGUNDA PROPUESTA DE ÚTIL DE SUJECIÓN	51
5	Fabricación de las propuestas	53
5.1	SELECCIÓN DEL MATERIAL PARA LAS PIEZAS FABRICADAS POR MEX.....	53
5.2	ÚTIL DE SUJECIÓN PARA LA PIEZA DE LA PUERTA	56
5.3	SISTEMA DE ALIMENTACIÓN	60
6	Conclusiones.....	61
	Bibliografía.....	63
	Anexos	65
	ANEXO A: PRESUPUESTOS	66
	ANEXO B: PLANOS DE DISEÑO DEL DEPÓSITO MODULAR	69
	ANEXO C: PLANO DEL ÚTIL DE SUJECIÓN DE LA PIEZA DE LA PUERTA.....	70

Índice de figuras

Figura 1.1: Proceso de fabricación aditiva mediante extrusión de material. Fuente: [1]...	12
Figura 1.2: Formato STL en función de la cantidad de puntos. Fuente: [5].	13
Figura 1.3: Fotopolimerización en cuba. Fuente: [6].	14
Figura 1.4: Pasta con base de alúmina usada en este proceso. Fuente: Elaboración propia.	16
Figura 1.5: Horno de <i>debinding</i> de la UFI3D. Fuente: Elaboración propia.	18
Figura 1.6 : Piezas finalizadas de alúmina fabricadas por SLA de cerámicas técnicas del muestrario de la UFI3D. Fuente: Elaboración propia.	19
Figura 2.1: Diagrama de flujo de la metodología. Fuente: Elaboración propia.	21
Figura 2.2: Cama de impresión de 300x100 (acero mecanizado) con ejes dibujados. Fuente: Elaboración propia.	22
Figura 2.3: Depósito de PLA fabricado anteriormente. Fuente: Elaboración propia.	23
Figura 2.4: Depósito fuera de la máquina. Fuente: elaboración propia.	24
Figura 2.5: Placa de aluminio y ranura por donde sale la pasta.	25
Figura 2.6: Sistema de esparcimiento detrás de la posición de la cama con la cuchilla B2 bajada. Fuente: Elaboración propia.	25
Figura 2.7: A la izquierda, pieza de la puerta. A la derecha, electroimán en la máquina. Fuente: Elaboración propia.	26
Figura 2.8: Electroimán y pieza de la puerta unidos con bridas. Fuente: Elaboración propia.	27
Figura 3.1: Dibujo de concepto de un depósito con apertura variable de ranura. Fuente: Elaboración propia.	29
Figura 3.2: Dibujo de concepto de un sistema de alimentación por inyección de material. Fuente: Elaboración propia.	30
Figura 3.3: Dibujo de concepto de sistema de alimentación presurizado con peso guiado. Fuente: Elaboración propia.	31
Figura 3.4: Sistema de inyección de material con válvula común para todos los inyectores, similar al propuesto. Fuente: [12]	32

Figura 3.5: Los 3 pistones que elevan la base del depósito. La distancia entre los dos exteriores es de 220mm. Fuente: Elaboración propia.	37
Figura 3.6: Diseño de depósito modular. Fuente: Elaboración propia.	37
Figura 3.7: Ensamblaje del de la base del depósito (PTFE) con su adaptador (Aluminio anodizado de rojo). Fuente: Elaboración propia.	38
Figura 4.1: Ajuste de los parámetros del escáner. Fuente: Elaboración propia.	41
Figura 4.2: Escaneando la pieza. Fuente: Elaboración propia.	41
Figura 4.3: Nube de puntos final obtenida (vista isométrica superior(izquierda) y inferior (derecha)). Fuente: Elaboración propia.	42
Figura 4.4: Regiones obtenidas y alineamiento de los planos. Fuente: Elaboración propia.	43
Figura 4.5: <i>Mesh sketch</i> (rosa) y <i>sketch</i> (azul). Fuente: Elaboración propia.	43
Figura 4.6: Operación de extrusión con <i>mesh sketch</i> . Fuente: Elaboración propia.	44
Figura 4.7: Modelo 3D de la pieza de la puerta. Fuente: Elaboración propia.	44
Figura 4.8: Modelado del electroimán. Fuente: Elaboración propia.	45
Figura 4.9: Ensamblaje de las piezas en su posición en la máquina. Electroimán en rojo, pieza de la puerta en gris. Fuente: Elaboración propia.	45
Figura 4.10: Modelo aproximado del útil de sujeción por fricción (verde). Fuente: Elaboración propia.	46
Figura 4.11: Simplificación de cálculos usando 2 vigas en voladizo. Fuente: Elaboración propia.	47
Figura 4.12: Sección que se desplaza, a la izquierda y a la derecha, en rojo. Fuente: Elaboración propia.	48
Figura 4.13: Cálculo del momento de inercia de la sección. Fuente: [19].	49
Figura 4.14: Primer diseño del útil sujeto por gravedad. Fuente: Elaboración propia.	52
Figura 5.1: Experimento con probetas de PETG, sumergidas en agua (izda.) y en etanol (dcha.). Fuente: Elaboración propia.	54
Figura 5.2: Resultados del experimento sobre la estabilidad química y dimensional del PETG. Fuente: Elaboración propia.	55
Figura 5.3: Impresora 3D MEX Ultimaker 3. Fuente: Elaboración propia.	57

Figura 5.4: Preparación de la fabricación del primer prototipo de soporte sujeto por fricción. Fuente: Elaboración propia. 58

Figura 5.5: Primer prototipo de útil de sujeción por fricción. Fuente: Elaboración propia.58

Figura 5.6: Preparación de la fabricación del primer prototipo del soporte sujeto por gravedad y restricción de movimientos. Fuente: Elaboración propia. 59

Figura 5.7: Preparación de la fabricación del útil final. Fuente: Elaboración propia. 60

Figura 6.1: Foto del útil en su posición. Fuente: Elaboración propia. 61

Índice de tablas

Tabla 3.1: Propiedades del PC-PTFE. Fuente: [15]	34
Tabla 5.1: Propiedades del PETG. Fuente: [18]	56

Acrónimos

Siglas	Significado en inglés	Significado en castellano
CAD	Computer Aided Design	Diseño asistido por ordenador
CAM	Computer Aided Manufacturing	Fabricación asistida por ordenador
CMC	Ceramic Matrix Composite	Compuestos de matriz cerámica
MEX	Material Extrusion	Extrusión de material
PA	Polyamide	Poliamida
PETG	Polyethylene terephthalate glycol	Tereftalato de polietileno glicol
PLA	Polylactic Acid	Ácido poliláctico
PTFE	Polytetrafluoroethylene	Politetrafluoroetileno
RFID	Radio Frequency Identification	Identificación por radio frecuencias
SLA	Stereolithography	Estereolitografía
STL	Standard Triangulation Language	Lenguaje estándar de triangulación

Agradecimientos

Me gustaría agradecer en este trabajo final de grado a todas las personas que me han apoyado durante esta etapa de mi vida que está llegando a su fin.

Agradecer a mis tutoras, Sara y Susana, por todo el apoyo y el tiempo que me han proporcionado, no solo para este trabajo, sino también por asesorarme en todo lo que viene después, y un sinfín de asuntos más.

También agradecer al resto de compañeros del grupo de investigación TAFI, los que me han tratado excepcionalmente, y han hecho de mis prácticas con ellos una magnífica experiencia, donde he podido aprender cosas que nunca hubiera imaginado.

Por último, agradecer a toda mi familia el apoyo brindado durante estos años, aquellos que han sido un pilar en este trayecto.

Muchas gracias a todos por hacer esto posible.

1 Introducción

Desde que surgieron las primeras técnicas de fabricación aditiva en los años 80, esta ha venido revolucionando el mundo del prototipado, y recientemente la fabricación. Hoy en día se usa en un amplio rango de aplicaciones, desde la industria militar a los más sencillos prototipados.

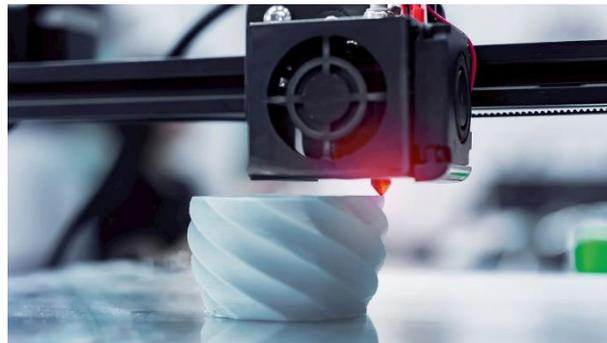


Figura 1.1: Proceso de fabricación aditiva mediante extrusión de material. Fuente: [1].

La fabricación aditiva se comenzó a desarrollar en 1984 por Chuck Hull [2], que desarrolló la tecnología de estereolitografía (SLA), para posteriormente crear 3D Systems en 1986, la primera y una de las principales empresas de fabricación aditiva hasta día de hoy.

También conocida como impresión 3D, es el término general que designa aquellas tecnologías de fabricación que permiten la obtención de modelos físicos a partir de modelos digitales mediante la adición sucesiva de material [3].

La metodología de fabricación es relativamente genérica para todas las técnicas, desde impresoras 3D comunes de extrusión de material (MEX) (técnica de impresión 3D anteriormente designadas como FDM - *Fused Deposition Modeling* - Modelado por deposición fundida), como se observa en la Figura 1.1, a otras menos comunes como la utilizada en este trabajo, SLA de cerámicas.

Los diseños de las piezas a fabricar, normalmente obtenidos usando un programa de diseño asistido por ordenador (CAD), son guardados generalmente en formato STL (Figura 1.2), un formato desarrollado por 3D Systems que guarda modelos tridimensionales en forma de puntos que conforman triángulos, para formar superficies complejas [4].

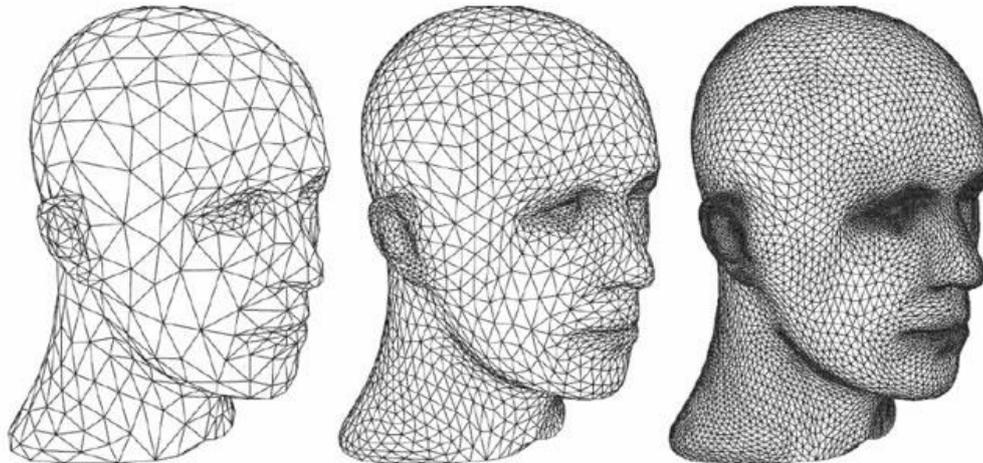


Figura 1.2: Formato STL en función de la cantidad de puntos. Fuente: [5].

Posteriormente, el archivo STL es introducido en un software específico para cada tecnología y máquina, similar a un software de fabricación asistida por ordenador (CAM). Este software, llamado *slicer*, permite ajustar parámetros de capas, velocidades, temperaturas, etc. en función de la tecnología que estemos utilizando y la calidad de las piezas que se vayan a imprimir. El resultado es un archivo específico en códigos ISO que utiliza la impresora para realizar el proceso de impresión.

Este trabajo se va a centrar en uno de los procesos más recientes dentro del campo de la fabricación aditiva, como es el de la impresión 3D con cerámicas técnicas.

1.1 PROCESO SLA CON CERÁMICAS TÉCNICAS

En el proceso SLA de cerámicas técnicas la materia prima es una pasta compuesta de un fino polvo de la cerámica con la que deseamos fabricar y un aglutinante, que es una resina fotopolimerizable (Figura 1.3).

El principio de adhesión del material es mediante la unión por reacción química, concretamente el curado por reacción a la luz ultravioleta de un material fotosensible (aglutinante) que se fotopolimeriza mediante un láser [3]. Es un proceso que se repite capa por capa. Cuando una capa se finaliza de polimerizar según el patrón correspondiente, se añade otra capa de material por medio de una cuchilla que distribuye la pasta homogéneamente sobre la placa de impresión. Posteriormente, el láser vuelve fotopolimerizar de manera selectiva.

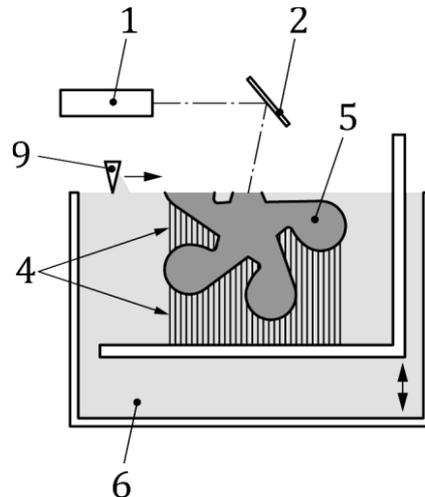


Figura 1.3: Fotopolimerización en cuba. Fuente: [6].

Una vez se acaba la impresión se debe eliminar el aglutinante mediante un proceso de *debinding* o desligado, que consiste en someter a la pieza a altas temperaturas que licuen y evaporen la resina, dejando solamente el material cerámico, sin restos del orgánico, y por lo tanto, con poros donde previamente estaba la resina. Para eliminar los poros y hacer una pieza sólida y resistente, se debe someter a un proceso de sinterizado, que se realiza en otro horno. En este proceso la pieza sufre contracciones diferentes según las direcciones X, Y y Z. Es por ello que se deben considerar este efecto a la hora de diseñar la pieza a fabricar [3]. Los valores de contracción (*shrinkage*) según los diferentes ejes son proporcionados por el fabricante para cada material. Por ejemplo, para la pasta de alúmina, los valores rondan el 17% en el eje X, el 15% en el eje Y, y el 18% en el eje Z.

Los usos de esta tecnología pasan por todos aquellos sectores de alto valor añadido donde se necesiten piezas cerámicas con geometrías complejas. Un ejemplo en auge en la actualidad son las pilas de combustibles (de hidrógeno) de tipo SOFC (*Solid Oxide Fuel Cell*), que se fabrican con alúmina (Al_2O_3) o 8YSZ (zirconia (ZrO_2) estabilizada con ytria (Y_2O_3) al 8% en peso molar) como material base. La fabricación de estas mediante fabricación aditiva, ya sea SLA o DLP (*Digital Light Processing*), simplifica en gran medida su fabricación [7].

También se utiliza en sectores más convencionales de la industria de la energía, ya que los materiales cerámicos se utilizan en turbinas de gas y de vapor o componentes de energía nuclear debido a su resistencia a altas temperaturas y su capacidad para soportar

ambientes agresivos, así como en las industrias química y petroquímica por el mismo motivo.

En los sectores militar y aeroespacial, el uso de compuestos de matriz cerámica (CMC) está en auge para el uso en armaduras en vehículos terrestres y personales, como para armaduras térmicas en aviones y cohetes espaciales [8]. Este proceso se puede utilizar para la fabricación de formas complejas y más livianas, y con modelos con fibras continuas en lugar de fibras cortas, con procesos SLA y SLS (*Selective Laser Sintering*) modificados con la extrusión de estas fibras (de aramida y carbono generalmente) en la máquina [9].

Otras aplicaciones interesantes están el campo de la medicina, donde usando la fabricación aditiva con oxicerámicas (zirconia principalmente) se pueden realizar implantes biológicamente inertes a medida, ya sean óseos o dentales [10].

1.2 IMPRESORA 3DCERAM C900 FLEX

La máquina utilizada para la realización del trabajo es la 3DCeram C900 Flex (Figura 1.4), de la empresa y fabricante francesa 3DCeram SINTO, la cual se especializa desde 2001 en técnicas de fabricación aditiva en cerámicas técnicas, principalmente para las industrias militar, biomédica y aeroespacial [11].



Figura 1.4: Impresora 3D SLA de cerámicas técnicas 3DCeram C900 Flex en la Unidad de Fabricación e Impresión 3D (UFI3D) de la ULE. Fuente: Elaboración propia.

Su volumen de impresión es de 300x300x100 mm (x,y,z), y se dispone de camas de impresión de 300x100 mm y 300x300 mm. A pesar de que la cama de impresión es bastante grande, hay limitaciones dimensionales que pueden obligar a reducir el tamaño de las piezas impresas como, por ejemplo:

- El tamaño del horno de *debinding* o desligado, que, debido a su alto precio, puede limitar el tamaño de las piezas a tratar.
- Las contracciones en el proceso de sinterizado, que provocan tensiones internas que generan grietas y fracturas en las piezas. Este problema está hoy en amplia investigación para evaluar posibles soluciones, entre ellas, la limitación de espesores de pared y el uso de soportes especiales.

Las impresiones tienen una resolución de hasta 50 μm (altura de capa), por lo que se pueden obtener con alto nivel de detalle.

Esta máquina permite imprimir mediante el proceso SLA de cerámicas técnicas materiales oxicerámicos, como la zirconia, alúmina (Figura 1.4) o hidroxiapatita, y no oxicerámicos, como pueden ser el nitruro de aluminio, nitruro de silicio, o el carburo de silicio, entre otras. Son pastas con muy alta viscosidad.



Figura 1.4: Pasta con base de alúmina usada en este proceso. Fuente: Elaboración propia.

Los materiales, al presentar estos compuestos orgánicos, poseen fecha de caducidad. Una vez esta es sobrepasada, el material tiende a polimerizar automáticamente, formando

grumos, que, en función del grado de caducidad del material, estropearán las impresiones al ser arrastrados por el sistema de alimentación de la cama (cuchillas que barren).

El problema principal de estas pastas es su elevado precio, que genera unos costes muy grandes de las piezas impresas por esta tecnología.

1.2.1 ETAPAS EN LA FABRICACIÓN SLA CON CERÁMICAS

Para preparar una impresión hay que seguir una serie de pasos más complejos que, por ejemplo, una SLA convencional.

En primer lugar, se debe obtener un archivo STL de las piezas a imprimir, como en cualquier otra tecnología de fabricación aditiva, mediante un programa CAD. A continuación, se introducen los archivos en el programa propio de la máquina.

En este programa propietario de Ceramaker, el cual está configurado por el fabricante para la propia máquina y materiales propios de la misma, introducimos los parámetros de lo que se desea imprimir. Al ser propio de la empresa, está altamente limitado, y puede ser poco intuitivo en algunos aspectos como por ejemplo en el posicionamiento de piezas en la cama de impresión virtual.

Posteriormente, se debe llenar el depósito con material suficiente para la fabricación. La máquina calcula la cantidad efectiva de material con la altura a la que esté la base del depósito una vez empieza comienza la fabricación. Si el volumen de material cargado en el depósito en ese momento es menor al necesario para la fabricación, el cual la máquina calcula en función al número de capas y el área de impresión seleccionada, la máquina mostrará un error y no permite continuar con la fabricación.

Uno de los aspectos más críticos en el proceso de preparación de la máquina es la calibración de las cuchillas, cuya función es extender la pasta a la altura correspondiente (50 μm). Este ajuste se lleva a cabo mediante tornillos micrométricos que permiten subir y bajar la altura de las cuchillas. Otra calibración que se debe llevar a cabo es la del láser, para que la potencia de este sea la correcta. Una vez está todo preparado, se lanzan 2 capas

manuales, proceso conocido como *scrapping*, para crear la cama de pasta y no fabricar directamente sobre la plataforma metálica. Posteriormente, se lanza la fabricación.

Una vez la máquina ha finalizado, se intenta extraer el máximo de pasta sobrante posible, para ser reutilizada. Se quita la plataforma de impresión y se limpian las piezas, separándolas de la pasta no fotopolimerizada mediante una limpieza con el químico propietario *Ceraclean* y aire a presión.

Seguidamente, estas piezas, que aún son débiles mecánicamente, se llevan a los postprocesos. Primero se introduce en el horno de *debinding*, que es un proceso largo con rampas de temperaturas que van aumentando lentamente hasta la temperatura de evaporación de la resina (aprox. 800°C para la Alúmina), para luego volver a disminuir hasta temperatura ambiente. El proceso completo dura 4 días para la Alúmina. Posteriormente, la pieza porosa, ya sin resina, se lleva al horno de sinterizado para eliminar la porosidad residual. El proceso de sinterizado se realiza también utilizando rampas de temperatura hasta temperaturas superiores al *debinding* (aprox. 1200°C para la Alúmina). Este proceso dura 2 días para la Alúmina.



Figura 1.5: Horno de *debinding* de la UFI3D. Fuente: Elaboración propia.

Una vez terminados los postprocesos, ya se obtienen las piezas finales, listas para su uso, como las mostradas en la Figura 1.6.

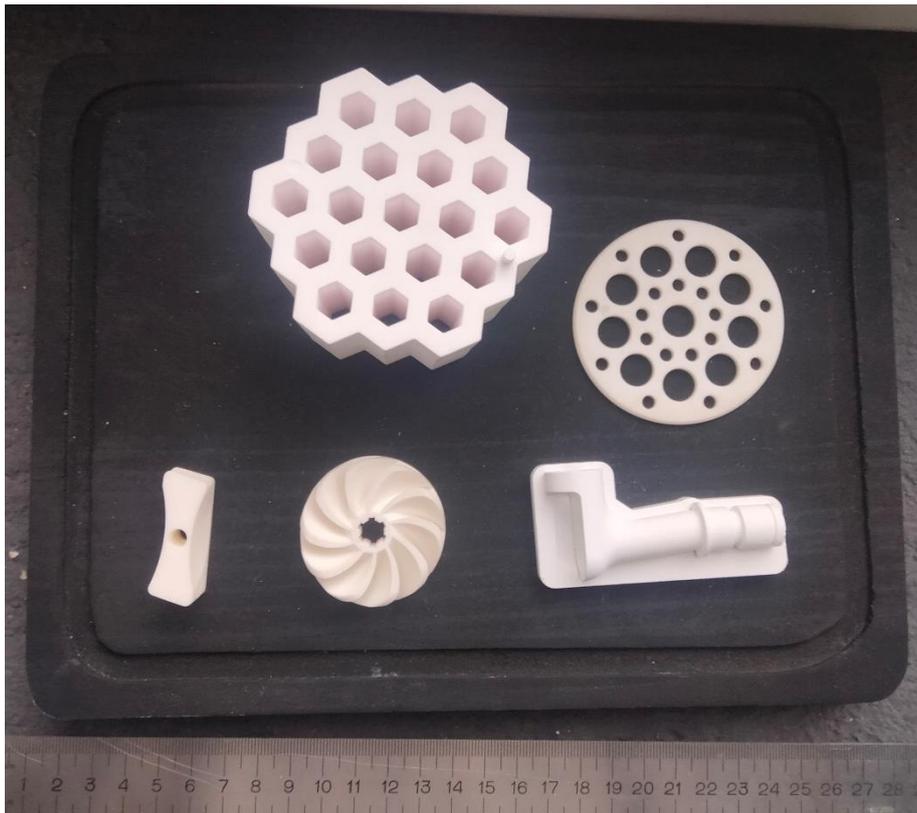


Figura 1.6 : Piezas finalizadas de alúmina fabricadas por SLA de cerámicas técnicas del muestrario de la UFI3D. Fuente: Elaboración propia.

2 Objetivos y Metodología

El objetivo general de este trabajo de fin de grado (TFG) consiste en la propuesta de mejoras para el proceso de impresión SLA con cerámica, en particular utilizando la máquina descrita en el apartado anterior 3DCeram C900 Flex, disponible en la Unidad de Fabricación e Impresión 3D (UFI3D) de la Universidad de León (ULE).

Para ello, se ha realizado un análisis de los problemas que el personal de la Unidad ha venido detectando desde la compra de este equipamiento. Los problemas detectados y sobre los que se va a trabajar son los siguientes:

- Durante el proceso de impresión, el material se distribuye sobre toda la plataforma de impresión de la máquina, independientemente del tamaño de la pieza. Esto es debido a que el depósito tiene un volumen muy grande, que abarca toda la placa de impresión y las cuchillas distribuyen una capa de material por toda ella, aunque la pieza solo ocupe una pequeña zona de la misma, lo que genera un gasto excesivo de material, que en ocasiones podría no volver a utilizarse. Hay que pensar, que por ejemplo para la Alúmina, un bote de 2,7 kg cuesta en torno a los 1000€, y que, para preparar la máquina para imprimir una pieza de 15 mm de altura, se utiliza al menos un bote completo. Lo ideal, sería tener depósitos más pequeños en función del tamaño de la pieza o del número de piezas que se fueran a imprimir.
- Durante el proceso de preparación previo a la fabricación, la máquina restringe el acceso al interior de forma continua, bloqueando las puertas para realizar cada movimiento. Esto ralentiza el trabajo, ya que cada vez que se necesita acceder al interior, hay que desbloquear las puertas y luego volver a bloquearlas para continuar trabajando. Por lo tanto, sería adecuado, utilizar un dispositivo que permitiera mantener las puertas abiertas mientras se realiza el trabajo de preparación de la máquina previo a la fabricación de las piezas.

Tras el análisis de los problemas, se proponen dos objetivos específicos:

1. Diseño de una unidad de alimentación o depósito modular, que permita el uso de menos material para piezas pequeñas.

2. Diseño de un útil que permita la accesibilidad al interior de la máquina durante la preparación de la impresión.

Para el desarrollo de este TFG se han utilizado herramientas CAD, como los softwares de Catia y Geomagic Design X, y un escáner de luz azul estructurada para la parte de ingeniería inversa.

La metodología seguida se observa en la Figura 2.1.



Figura 2.1: Diagrama de flujo de la metodología. Fuente: Elaboración propia.

2.1 SISTEMA DE ALIMENTACIÓN

Un gran problema del sistema de alimentación es que, indiferentemente del tamaño de la pieza a imprimir, se deben de introducir altas cantidades de material, pues este está pensado para llenar toda la cama de impresión de material (se muestra la cama en la Figura 2.2).

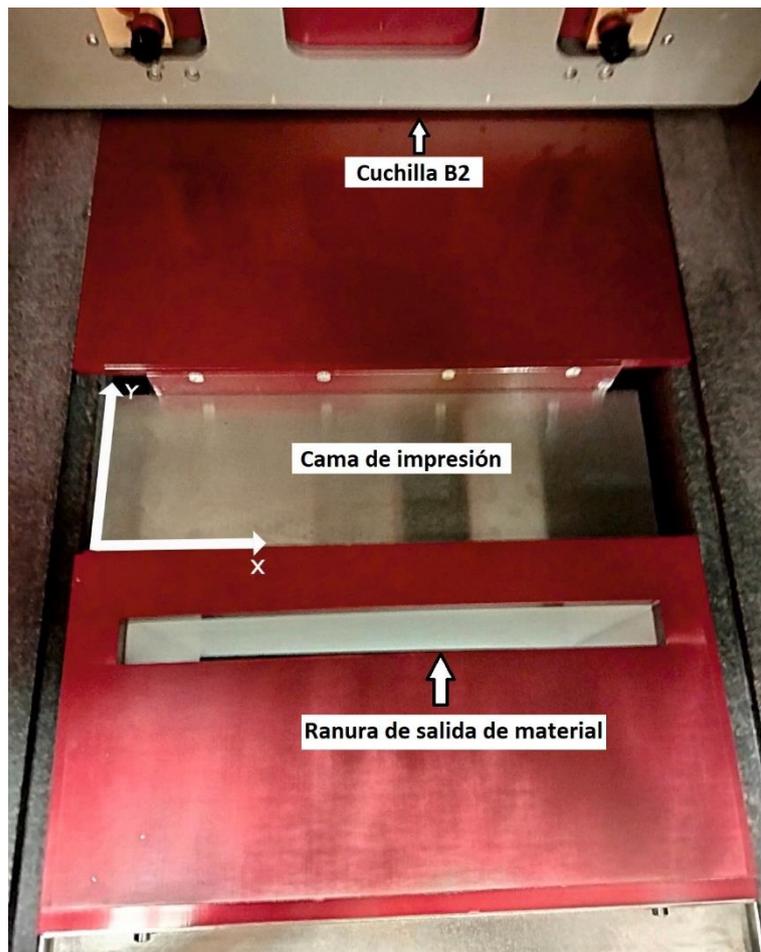


Figura 2.2: Cama de impresión de 300x100 (acero mecanizado) con ejes dibujados.
Fuente: Elaboración propia.

Sin embargo, esto conlleva que, para piezas de reducidas dimensiones en el plano horizontal (X,Y) (mucho menores a los 300x100 mm que se pueden imprimir con esta máquina), igualmente se llenará de material la cama de impresión, exponiendo el material a la luz y, por consiguiente, a su degradación. Además, en la limpieza se pierde mucho material, a lo que hay que sumar la difícil y laboriosa tarea de limpieza de la máquina.

Estas pastas altamente viscosas son muy sucias, y se precisa de Isopropanol para la limpieza de la máquina, y de un líquido propietario de Ceramaker (*Ceraclean*) para la limpieza de las piezas sólidas de la pasta sobrante de la impresión.

Aunque se puede reutilizar la pasta que no está cerca de la pieza impresa (5 mm aproximadamente), cada vez que se usa se expone a la luz y a contaminantes se degrada, por lo que es recomendable usar solo la necesaria, además de que cuanto más se use más se pierde en la limpieza. Es por ello que sería ideal para estas impresiones un sistema de alimentación que permita el llenado parcial de la cama de impresión.

Como información adicional, anterior a este trabajo, compañeros del área de fabricación TAFI fabricaron por MEX en PLA un depósito de tamaño inferior (Figura 2.3), el cual inicialmente funcionó correctamente en la máquina. Sin embargo, con el paso del tiempo, este dejó de funcionar debido a que el ajuste entre el depósito y su base pasó de holgura a apriete, con la consecuencia de la pérdida del movimiento entre ambos. La hipótesis que se tiene es debido a la expansión del material por absorción de humedad.

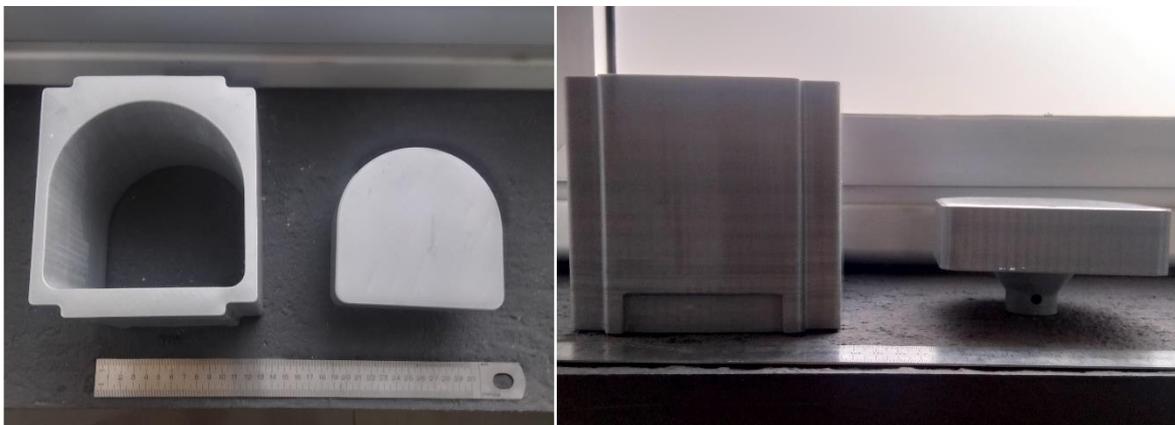


Figura 2.3: Depósito de PLA fabricado anteriormente. Fuente: Elaboración propia.

Para ello, en este TFG se estudiarán diferentes propuestas en base a las siguientes hipótesis:

- Una mejora íntegra del sistema, como si fuese a ser fabricado de cero por el fabricante, para su puesta en la cadena de montaje, siendo posible el cambio de software, así como de componentes mecánicos.

- Un sistema de alimentación con depósito (el mismo concepto que el original), que sea modular (permita diferentes tamaños), sin modificación mecánica de la máquina, siendo este nuevo sistema lo más sencillo de fabricar posible.

2.1.1 FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE ALIMENTACIÓN ACTUAL

Para cada capa a fabricar, debe de haber cerca de 50 μm de pasta de material recién extendido encima de la capa anterior que ya ha sido fabricada. Este material proviene del depósito de alimentación, que debe de haber sido rellenado con material suficiente para toda la impresión.

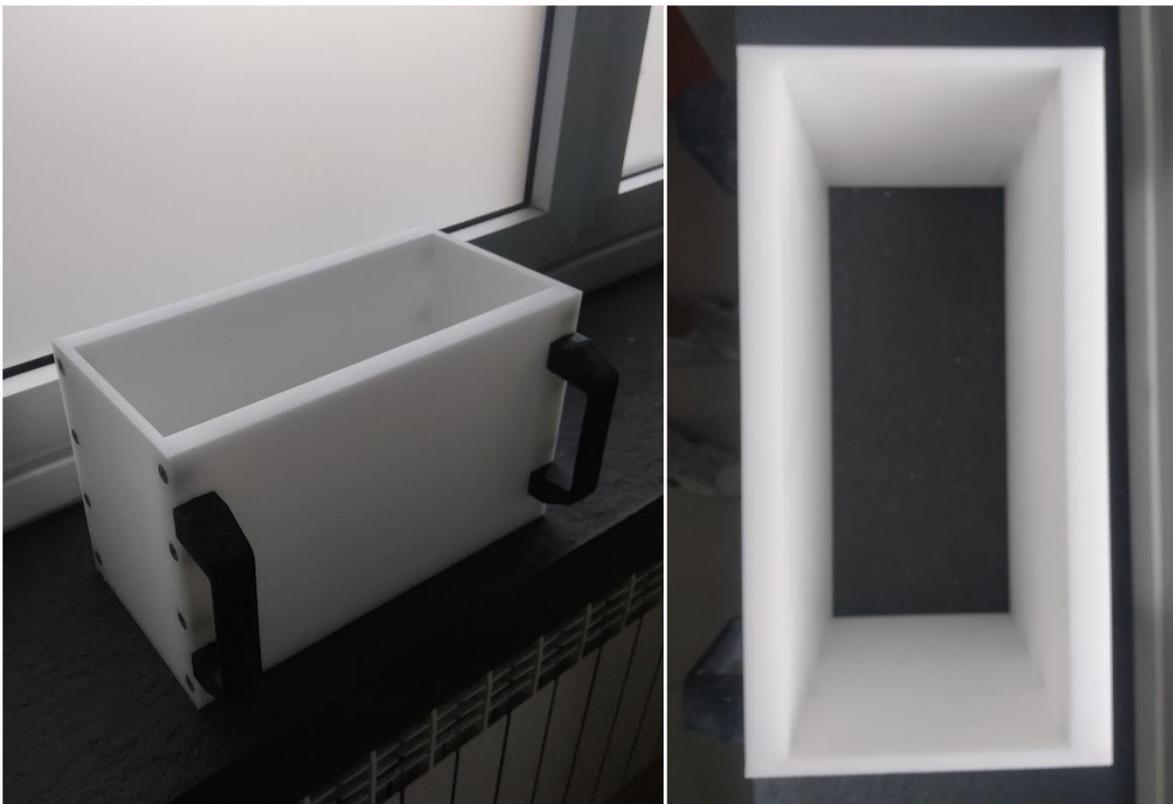


Figura 2.4: Depósito fuera de la máquina. Fuente: elaboración propia.

Nótese que el depósito está compuesto por 4 paredes, todas fijas entre ellas y formando una sola pieza (Figura 2.4). En el fondo está la base del depósito, que se desplaza según la altura del mismo (en adelante eje o dirección Z, dirección normal a la base), y es empujada por unos pistones movidos por motores paso a paso.

La pasta sale a través de una placa de aluminio anodizado con una ranura, situada encima del depósito, mostrada en la Figura 2.5.



Figura 2.5: Placa de aluminio y ranura por donde sale la pasta.

Esta placa va fijada a la bancada de la máquina por dos tornillos, por lo que siempre está en la misma posición. Toda la pasta desplazada por la base del depósito saldrá por esta apertura. Posteriormente, esta pasta será arrastrada por unas cuchillas que deslizan por guías a lo largo de la máquina (en adelante eje o dirección Y, perpendicular a la ranura en el plano de la placa de aluminio roja de la Figura 2.5).



Figura 2.6: Sistema de esparcimiento detrás de la posición de la cama con la cuchilla B2 bajada. Fuente: Elaboración propia.

La máquina posee dos cuchillas, una delante (B2, vista en la Figura 2.6) y otra trasera (B1). La cuchilla B2 arrastra el material en la ida, y la B1 en la vuelta, y se van alternando en cada capa (una capa pasa la cuchilla B2 esparciendo el material de delante a detrás, y otra capa pasa la cuchilla B1 de atrás hacia delante). Estas cuchillas suben y bajan, en función de cuando tengan que esparcir material, con un servomecanismo neumático. De esta forma, la base sube cada dos capas una cierta distancia, liberando material que será arrastrado por la B2, y el sobrante será arrastrado a la vuelta para la siguiente capa por la B1.

2.2 MEJORA DE LA ACCESIBILIDAD A LA MÁQUINA DURANTE LA PREPARACIÓN PREVIA A LA FABRICACIÓN

La impresora está dotada de dos puertas (una frontal y otra trasera a la cama de impresión), con un sistema de bloqueo de apertura electromagnético, sin ningún elemento mecánico.



Figura 2.7: A la izquierda, pieza de la puerta. A la derecha, electroimán en la máquina.
Fuente: Elaboración propia.

El electroimán mostrado en la Figura 2.7 se acciona únicamente mediante el programa de impresión, mediante varios menús, que cierra o abre las puertas delantera y trasera simultáneamente (las bloquea o desbloquea). Esto, sumado a que, durante la preparación de la impresión, la máquina te obliga a tener la puerta cerrada, sin motivo aparente de seguridad, supone un gran inconveniente para el técnico que se encargue de la puesta en

marcha de la máquina, que debe de estar abriendo y cerrando las puertas cada poco tiempo, suponiendo un proceso muy tedioso sin ninguna razón.

Por este motivo se ha decidido fijar la pieza de la puerta (soltándola de la puerta quitando los tornillos) con el electroimán que está fijo en la máquina. Sin embargo, no se puede simplemente energizar el electroimán constantemente, pues el software de la máquina lo desactiva automáticamente en muchas ocasiones, y la pieza de la puerta se caería al suelo por gravedad, por lo que tiene que ser sujeto por otros medios.

Actualmente se sujeta con bridas de nylon (Figura 2.8), pero no llega a ser una buena solución, por lo que se realiza en este trabajo la búsqueda de una mejor solución.



Figura 2.8: Electroimán y pieza de la puerta unidos con bridas. Fuente: Elaboración propia.

Una condición es que no se modifique la máquina, y la propuesta que se realice sea totalmente reversible, de forma que la máquina pueda estar en el mismo estado que antes de la mejora.

También se ha experimentado poniendo una pieza de acero al electroimán, pero este detecta error; es ahí cuando se descubre que la pieza de la puerta posee un transponder RFID y el electroimán posee el sensor. Es por ello que la misma pieza de la puerta debe estar en contacto con el electroimán, para que el sistema RFID la detecte y no de error de puertas abiertas en la máquina ni bloquee las funciones que se quieran hacer.

3 Diseño de un sistema de alimentación

En este apartado se proponen diferentes ideas de soluciones para mejorar el sistema de alimentación de la 3DCeram C900 Flex. Las dos primeras están más centradas en propuestas de soluciones que el fabricante podría llevar a cabo, ya que hay que modificar el software y componentes mecánicos para llevarlas a cabo. Las dos siguientes son soluciones al problema sin modificar ningún elemento de la máquina, que consisten en fabricar depósitos de menor tamaño al existente.

3.1 PROPUESTA DE DISEÑO DE UN SISTEMA CON PISTÓN Y APERTURA VARIABLE

El sistema propuesto sería muy similar al diseño existente. En el sistema actual, la pasta sale del depósito por una ranura de ancho ligeramente inferior a la plataforma de impresión.

Para hacer uso de un ancho (dimensión X) inferior de la actual cama de impresión, se podría disminuir la anchura de dicha apertura, disminuyendo el área de impresión extendida por las cuchillas. Para esto se tendría que estudiar el esparcimiento del material, específicamente para cada material. Esto debería hacerse para todas las propuestas, y se realizaría empíricamente con los prototipos, previo a datos existentes del esparcimiento con la ranura actual.

Las modificaciones a realizar serían una ranura de dimensión X variable, que se podría llevar a cabo de múltiples formas, como con un tornillo móvil con tuerca fija, encontrándose en el tornillo el final de la ranura (Figura 3.1).

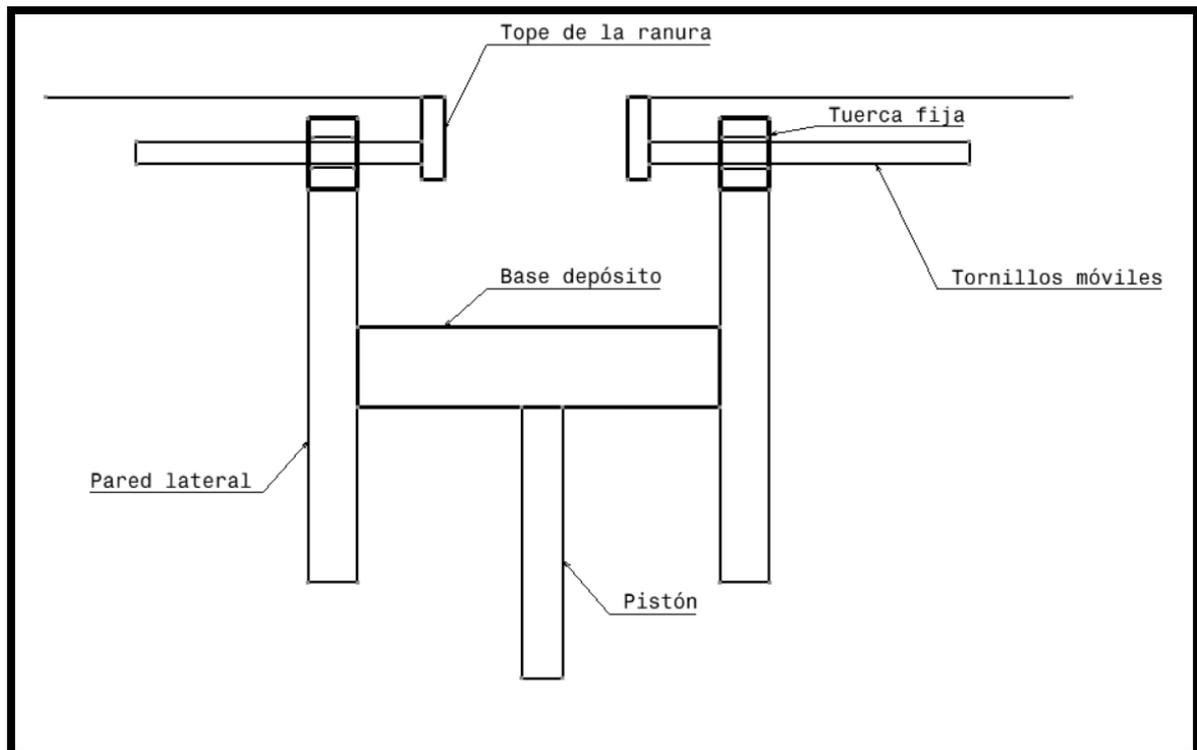


Figura 3.1: Dibujo de concepto de un depósito con apertura variable de ranura. Fuente: Elaboración propia.

También se tendría que modificar el software, en concreto el algoritmo que calcula la alimentación, pues la cantidad de material necesario es diferente en función del ancho de cama que se esté usando (es linealmente proporcional, como se demuestra en el apartado 3.4), por lo que es necesario un cálculo de la altura que debe subir la base del depósito por cada 2 capas, y que sea llevado a cabo por los motores paso a paso.

Las ventajas de este sistema son:

1. Es un sistema sencillo, con un principio de funcionamiento igual al existente, la única diferencia consiste en la apertura de dimensiones variables.
2. Es económico, debido a que solo se necesitarían implementar 2 motores paso a paso, con sus respectivos controladores, y otras piezas sencillas.
3. Variación automática del ancho efectivo de impresión.

Inconvenientes de esta propuesta:

1. No se puede llevar a cabo sin hacer modificaciones mecánicas de la máquina. Además, sería necesaria la modificación del software, luego es algo que solo podría llevar a cabo el fabricante, y queda descartada esta propuesta para este TFG.
2. Al igual que el depósito original, habría que limpiar el sistema de alimentación y rellenar de pasta cada vez que se fabrique, debido a que no es un sistema hermético.

3.2 PROPUESTA DE DISEÑO DE UN SISTEMA DE INYECCIÓN DE MATERIAL

Este sistema propuesto emplea un concepto totalmente distinto, pues en lugar de un pistón que saque el material por una ranura para posteriormente ser barrido por las cuchillas, se hace uso de un sistema de válvulas o inyectores controlados electrónicamente (de apertura por solenoide).

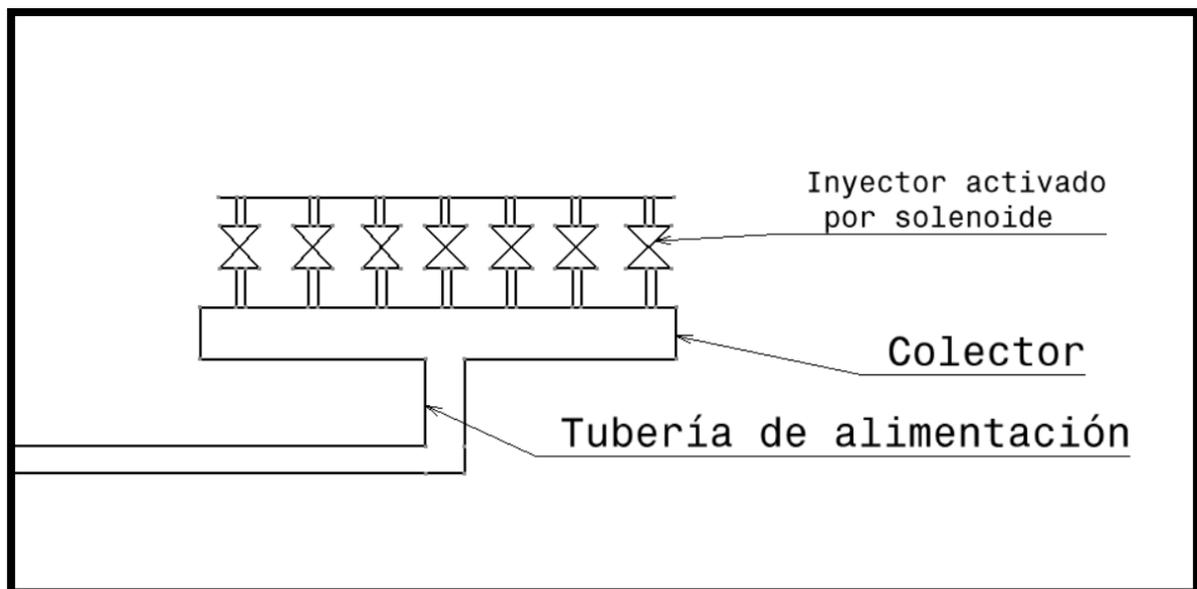


Figura 3.2: Dibujo de concepto de un sistema de alimentación por inyección de material.
Fuente: Elaboración propia.

Estos deben ser alimentados por material presurizado, es decir, en el rail donde se encuentran debe existir una presión positiva para que, cuando los inyectores sean abiertos mediante un pulso de tensión, expulsen material. El material expulsado será

posteriormente barrido por las cuchillas a la altura que corresponda a la capa, al igual que en el sistema existente.

La presión necesaria sería creada mediante el uso de un peso guiado en la tolva de alimentación, ya que el uso de bombas no es práctico para un caudal tan pequeño, además de una elevada viscosidad, que ni bombas de membranas pueden manejar, y el rápido desgaste que produciría la abrasión de las cerámicas en estas, que es otro inconveniente a tener en cuenta, además de que la presión en el sistema sería constante. Este peso estaría guiado por una guía axial situada en la tolva, de forma que vaya bajando por gravedad, y sin atascarse debido a que corre por la guía. Para evitar la fuga de material, el peso dispondría de unas ranuras en las que se incorporarían juntas tóricas de EPDM (*Ethylene Propylene Diene Monomer*) convencionales (Figura 3.3).

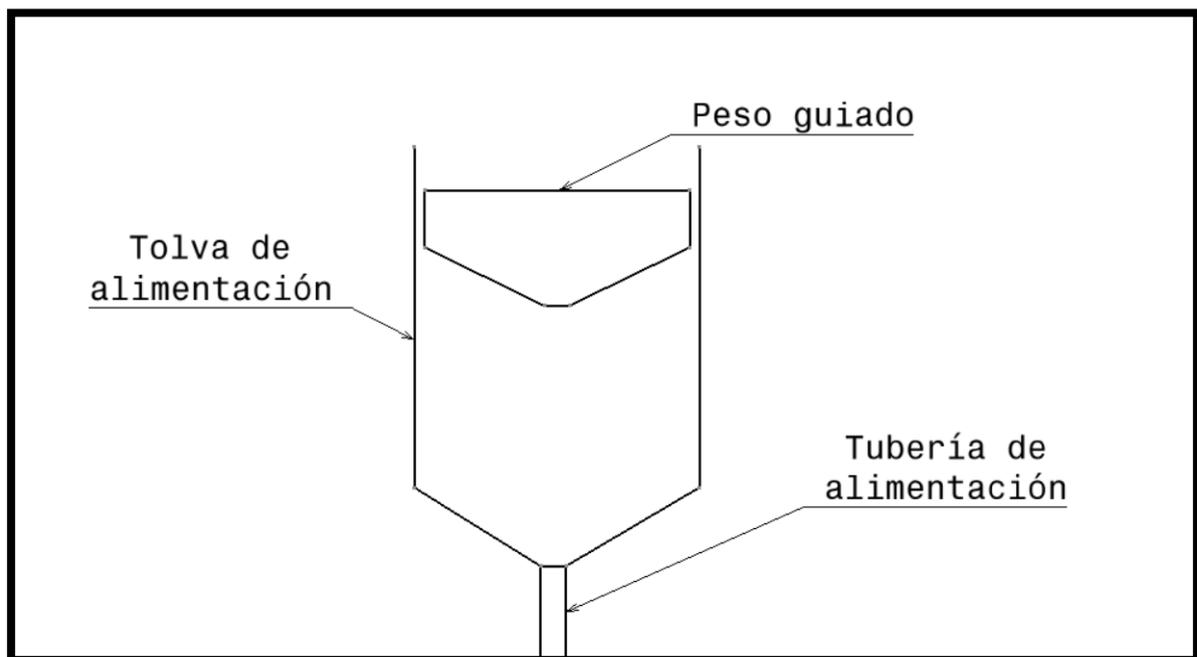


Figura 3.3: Dibujo de concepto de sistema de alimentación presurizado con peso guiado.
Fuente: Elaboración propia.

Para averiguar la presión deseada en el colector de inyectores, se debería llevar a cabo una investigación, con diferentes diámetros de apertura y tiempos de inyección, específicamente con cada material que se vaya a usar.

Este sistema requeriría de más investigación sobre su viabilidad, sin embargo comparte similitudes con otros sistemas de inyección de materiales viscosos empleados en otras industrias [12], por lo que son tecnologías conocidas (Figura 3.4).

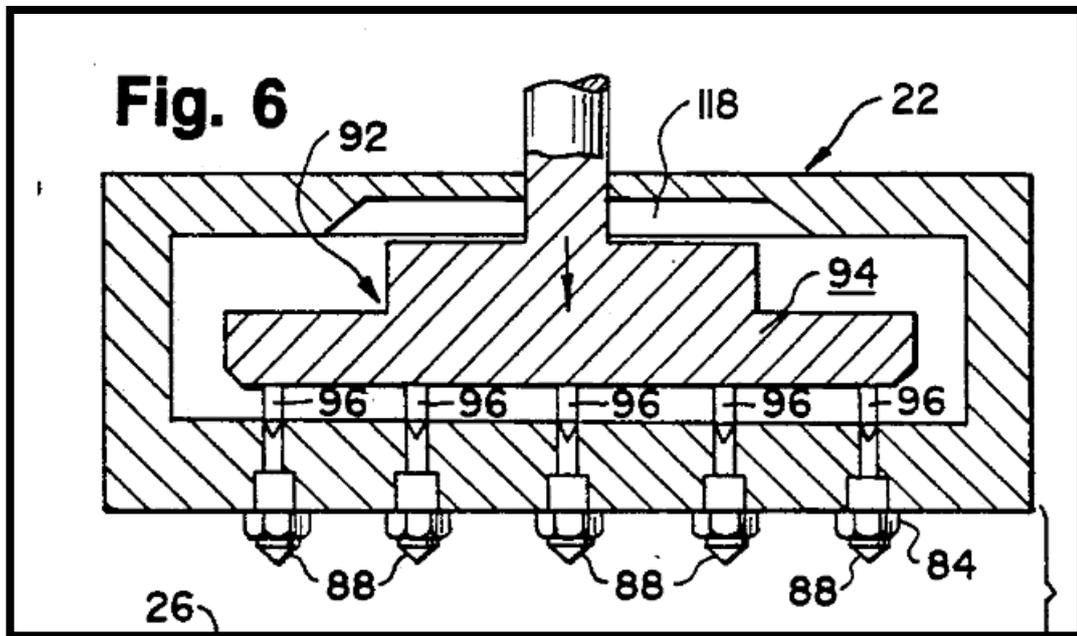


Figura 3.4: Sistema de inyección de material con válvula común para todos los inyectores, similar al propuesto. Fuente: [12]

Las ventajas de esta propuesta son:

1. A diferencia del sistema anterior, este es completamente hermético, luego es más idóneo para la producción en serie, ya que se ahorraría parte del tiempo que se emplea en la preparación de la impresión, solo sería necesario preocuparse de tener material en la tolva de alimentación. Que el sistema sea hermético también implica que la pasta que está dentro del sistema no se degrada con el tiempo significativamente.
2. La variación del ancho de la cama se realizaría de forma automática. Los anchos posibles dependen del número de inyectores instalados.

Inconvenientes de esta propuesta:

1. Se necesitaría llevar a cabo una extensa modificación mecánica de la máquina, además de su software, luego, al igual que la propuesta anterior, queda descartada.

2. Este concepto de sistema de alimentación no está implementado en ninguna máquina similar, luego puede que su ejecución no sea sencilla, incluso posible, ya que la pasta que va a circular por el sistema es altamente abrasiva (la alúmina posee un valor de 9 en la escala de Mohs [13]), y puede que ciertos componentes, como los inyectores, se desgasten considerablemente en un corto periodo de tiempo.
3. Su implementación supondría un aumento en el coste de fabricación de la máquina, pues es un sistema más complejo que el anterior.

3.3 DISEÑO DE UN DEPÓSITO SIMILAR AL ORIGINAL POR MEX

MEX es la técnica de fabricación aditiva más común, pues ya es accesible a todos los bolsillos. Existen infinidad de materiales termoplásticos en forma de filamentos en el mercado, siendo los más comunes PLA, PETG o Nylon, así como materiales reforzados con fibras de vidrio o de carbono (principalmente nylon), que mejoran sus resistencias y elasticidades [14].

Además, se disponen de las máquinas necesarias en la UFI3D, luego el tiempo de fabricación solo dependerá de lo que duren las máquinas en fabricar, y no depender de terceros. También se dispone de centros de mecanizado y múltiples máquinas y herramientas para llevar a cabo una fabricación más tradicional, por lo que esto no se toma como ventaja.

Las cualidades requeridas para el material son las siguientes:

- Bajo rozamiento
- Resistencia química al isopropanol, con el que será limpiado
- No es necesaria una alta resistencia mecánica
- Temperatura de trabajo ambiente
- Precio contenido

Cabe destacar que, en caso de requerir de un material con precio elevado, se podría fabricar la pieza mediante el uso de diferentes materiales por doble extrusión, utilizando el material más costoso solo en los puntos críticos, siempre que esto sea posible físicamente.

Tras una búsqueda de materiales, se selecciona un filamento de PC+PTFE, de la empresa francesa Nanovia (se desconoce la concentración de PTFE).

Se escoge este material pues cumple con todos los requisitos. Además, es un material similar al que existe de origen en la máquina (PTFE), el cual está probado y testado, lo cual es buen indicativo.

Tabla 3.1: Propiedades del PC-PTFE. Fuente: [15]

Propiedades del filamento PC-PTFE.			
Temperatura de Extrusión	250-270 °C	Temperatura VICAT	145°C
Temperatura de la cama	110-130 °C	Coeficiente de fricción estático (μ)	0,14
Densidad	1,07 g/cm ³		
Modulo elástico (E) en XY	2700 MPa		
Modulo elástico (E) en ZX	-	Peso bobina	750g
Límite elástico (σ) en XY	-	Precio bobina	60 €
Límite elástico (σ) en ZX	-	Coste específico	80€/kg

El PC es resistente químicamente al isopropanol o alcohol isopropílico [16], y el PTFE también, como se ha demostrado empíricamente con las limpiezas en el sistema actual.

La principal desventaja de fabricar mediante MEX es la rugosidad elevada, que dificulta la limpieza del material, y un difícil control de holguras, que precisa de pruebas con el material e impresora que se vaya a realizar previo a la fabricación del modelo final, para asegurar el adecuado ajuste dimensional.

Ventajas de esta propuesta:

1. Es relativamente económica (presupuesto en ANEXO A: PRESUPUESTOS).
2. No es necesario hacer ninguna modificación irreversible de la máquina.
3. Se puede llevar a cabo en la UFI3D de la Universidad.

Desventajas de esta propuesta:

1. El tiempo de fabricación de este depósito es de 3 días, lo cual implica un gran riesgo de que haya un error durante la fabricación y se estropee el depósito que se está fabricando, suponiendo un importante aumento de los costes.
2. La rugosidad obtenida en las paredes del depósito no sería la mejor, debido al conocido efecto escalera de las tecnologías de fabricación aditiva, lo que dificultaría la limpieza del depósito. Para mejorar esta rugosidad es probable que se necesite lijar la superficie que está en contacto con la pasta, pero es un proceso complicado debido a la existencia de ángulos rectos interiores en el diseño.
3. Se requiere de la fabricación de un depósito diferente para cada ancho deseado.

3.4 DISEÑO DE UN DEPÓSITO DE CAPACIDAD MODULAR

Para tener más de un tamaño de depósito, usando la menor cantidad de piezas posibles, se propone el uso de un depósito modular. La dimensión variable será la del ancho (eje X) del depósito, pues el largo (eje Y) no se puede modificar sin modificar el software de la máquina.

$$V_{material\ alimentado} = A_{base} * h_{base} = x_{base} * y_{base} * h_{base} \quad (1)$$

Si el h_{base} , que es lo que sube la base, se mantiene constante, ya que es un parámetro que no se puede modificar sin modificar el software de la máquina, la única forma de disminuir la cantidad de material expulsado es disminuyendo el área de la base.

El volumen de material necesario para la fabricación de una capa es el siguiente:

$$V_{material\ por\ capa} = \gamma * A_{capa} * h_{capa} = \gamma * x_{capa} * y_{capa} * h_{capa} \quad (2)$$

Donde γ es un coeficiente de mayoración cuyo valor se desconoce, x_{cama} e y_{cama} son las dimensiones, y h_{capa} es la altura de capa en la fabricación. El único valor que se puede modificar, por el funcionamiento de la máquina, es el x_{cama} .

Para que haya un correcto funcionamiento de la máquina, el volumen de material alimentado debe de ser el mismo que el del material necesario por capa.

$$V_{material\ por\ capa} = V_{material\ alimentado} \quad (3)$$

$$\gamma * x_{cama} * y_{cama} * h_{capa} = A_{base} * h_{base} = x_{base} * y_{base} * h_{base} \quad (4)$$

Como la fórmula es lineal, una modificación en x_{cama} tiene que venir acompañada por una modificación en un parámetro al otro lado de la ecuación. En este caso, el parámetro que se modifica es x_{base} .

$$x_{cama} = r * x_{base}; r = \frac{x_{cama}}{x_{base}} = \frac{305\ mm}{300\ mm} = 1,016 \quad (5)$$

Donde r es la relación entre las dimensiones X de la cama y de la base del depósito. Para hallar r , se mide la dimensión X en el depósito existente (305 mm), y la X de la cama es conocida, que son 300 mm. El valor de r es cercano a 1, pero se ha de tener en cuenta que el tamaño de impresión en X será ligeramente inferior al tamaño del depósito, en torno al 1,6% (Ecuación(5)). Para asegurar un ancho de impresión eficaz, se restarán 5 mm al ancho del depósito, como en el depósito original, que será superior al 1,6% para cualquier medida utilizada en este propósito, ya que las nuevas dimensiones de x_{cama} serán inferiores a esos 300 mm.

En un principio, se propone hacer con 3 medidas diferentes: para una longitud de impresión de 200mm, otra de 150mm, y otra de 100mm. Sin embargo, tras observar que con la dimensión de 200mm habría colisión con 2 de los 3 pistones que empujan la base del depósito original (los laterales, Figura 3.5), se decide hacer dos medidas, una de 180mm y

otra de 120mm de ancho de la base, lo que supondrá un ancho efectivo de la cama de impresión de 175mm y 115mm respectivamente, debido a que el material no se esparce exactamente del mismo ancho, y hay 5 mm de diferencia.

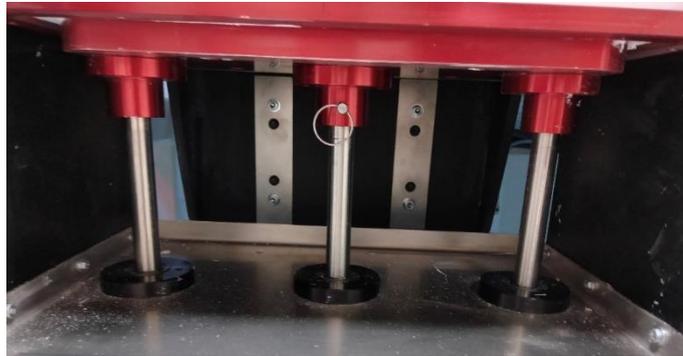


Figura 3.5: Los 3 pistones que elevan la base del depósito. La distancia entre los dos exteriores es de 220mm. Fuente: Elaboración propia.

Las paredes y la base del depósito se deciden hacer con planchas de teflón. Para las dos medidas se contabilizan un total de 6 planchas: 1 pared frontal, 1 pared trasera, 2 paredes laterales y 2 bases, una de cada medida de ancho. La Figura 3.6 muestra el diseño completo del depósito con la configuración adecuada para la base de 180mm.

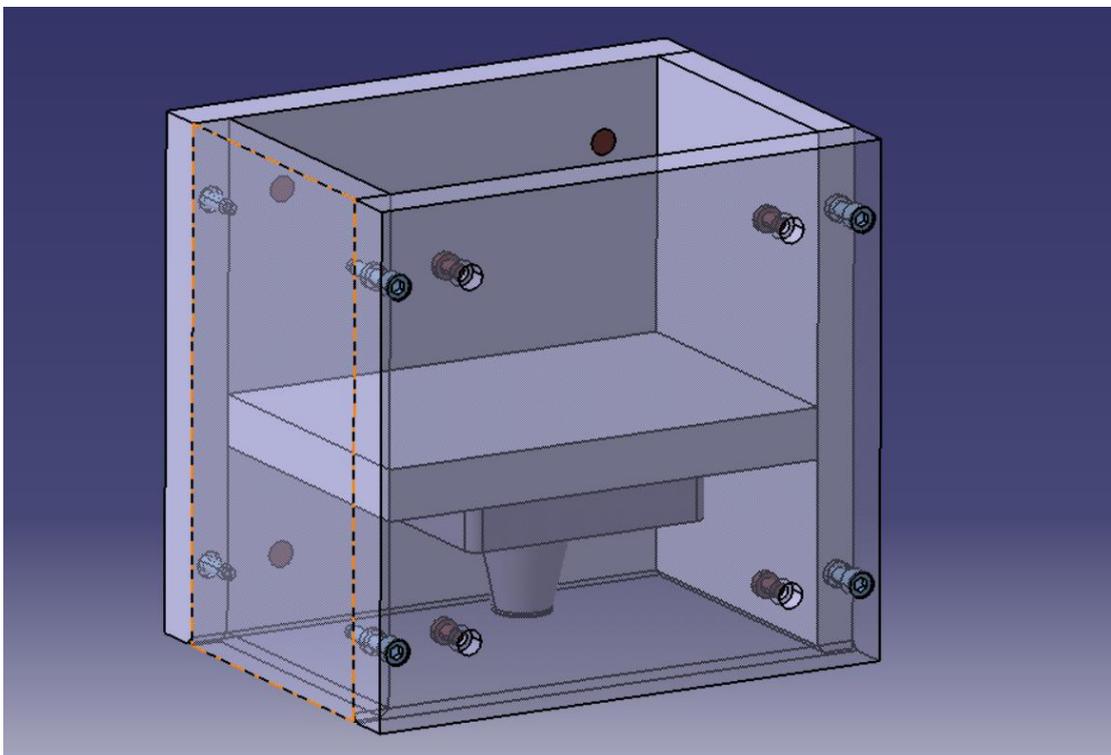


Figura 3.6: Diseño de depósito modular. Fuente: Elaboración propia.

Las bases contienen una pieza de aluminio anodizado (Figura 3.7) que sirve para adaptar la plancha de teflón a los pistones que la empujan. En este caso, la nueva pieza se va a fabricar por fabricación aditiva MEX con el polímero PETG, por las razones demostradas en el apartado 5.1, en lugar de fabricarla en aluminio (lo que conllevaría tener que mecanizar 2 piezas y unir las con tornillos). Debido a que se utiliza una plancha de teflón de 20 mm en la base, en lugar de un de 18 mm como la existente de serie, esta debe de ser ligeramente más fina. El nuevo adaptador de PETG irá unido a la plancha de PTFE mediante tornillos de manera similar a la actual, como se observa en la Figura 3.7.



Figura 3.7: Ensamblaje del de la base del depósito (PTFE) con su adaptador (Aluminio anodizado de rojo). Fuente: Elaboración propia.

Un cambio en el diseño con respecto a la original es que en la plancha de teflón no se utilizan insertos de rosca, con el fin de simplificar el proceso, debido a que no es una pieza que requiera desatornillarse. En su defecto, se utilizará una métrica mayor (M6 en lugar de M4) con fijador de roscas para que no se suelte, con el fin de no pasar la rosca.

Las ventajas de esta propuesta son:

1. Económico de implementar (Presupuesto en ANEXO A: PRESUPUESTOS).
2. No es necesario llevar a cabo ninguna modificación irreversible de la máquina.
3. Se puede diseñar para que el depósito tenga tantos anchos disponibles como se desee. Solamente es necesario disponer de una base del depósito diferente para cada ancho deseado.

Los inconvenientes de este sistema son:

1. El cambio de ancho tiene que realizarse de forma manual, aunque tampoco supone mucho tiempo.

Para seleccionar la propuesta de depósito a fabricar entre las dos últimas (propuestas que no implican modificación de la máquina), se elaboran los presupuestos correspondientes, los cuales se encuentran en el ANEXO A: PRESUPUESTOS. Para ambas propuestas se propone dos tamaños diferentes con un ancho de depósito de 120 y 180 mm.

Si se usan los presupuestos como criterio único, el menos costoso es la propuesta definida en la sección 3.4, el depósito modular, que cuesta 237,70€, respecto a los 316,24€ que cuesta fabricar dos depósitos diferentes por MEX como los propuestos en el apartado 3.3.

En un principio, y para abaratar los costes, se valora la idea de fabricar un solo depósito por MEX. En este caso, se fabricaría el de 180 mm de ancho, por lo que el coste sería de 178,80€. Sin embargo, el total de material sería de 1490g, y, teniendo en cuenta que cada bobina de material contiene 500g, habría que comprar 3 bobinas y sobrarían únicamente 10g de material. Esto no es muy ideal, ya que no sobraría material para hacer pruebas de impresión, y, en caso de fallo de impresión, habría que comprar otra bobina, por lo que realmente habría que comprar 4 bobinas de material, o una bobina grande de 2000g, con un coste de 255€ [15]. Por lo que, ya no sería más viable económicamente que el depósito modular. Añadido a esto, la fabricación del depósito es arriesgada, pues se trata de una impresión superior a 3 días, y pueden ocurrir multitud de percances, por lo que no se considera una opción certera.

Por estas razones, se decide fabricar un depósito modular mediante planchas de PTFE, la propuesta 3.4.

4 Diseño del útil de accesibilidad a la máquina durante la preparación de la impresión

En primer lugar, se analiza el diseño actual del mecanismo disponible en la máquina para la apertura de la puerta. Para ello se realiza un proceso de ingeniería inversa para obtener el modelo existente de forma digital y poder diseñar el útil que se acople al dispositivo para permitir que la puerta se pueda mantener abierta durante el proceso de preparación de la impresión en máquina.

Una vez obtenida la malla tridimensional se analizan las diferentes propuestas.

4.1 INGENIERÍA INVERSA DEL ÚTIL DISPONIBLE

Se escanea la pieza de la puerta con un escáner de luz azul estructurada modelo Breuckmann smartSCAN^{3D}-HE, cuya resolución es de 4 MPx y está asistido por el software propietario Optocat. El campo de trabajo (seleccionado en función del tamaño de la pieza a digitalizar) utilizado para el escaneo es el S-125 y tiene una resolución X, Y de 50 µm. Previamente a la digitalización se calibra el equipo.

En Optocat, se deben de configurar ciertos parámetros, siendo el más importante el tiempo de obturación o *shutter*. En cada escaneo se realizan 4 capturas con 4 *shutters* distintos, para obtener la mayor cantidad de puntos. Las imágenes de colores que se muestran en la Figura 4.1 representan las zonas de captación de puntos de las cámaras. En las zonas con tonos entre el amarillo y el azul se obtendrán la mayoría de los puntos que se captan con las dos cámaras. Esto cambia para cada *shutter*, y es aquí donde se debe jugar con este ajuste, que dependerá de los colores y forma de la pieza a escanear. Al ser un escáner de luz estructurada, el color físico de las piezas que se estén escaneando influye en gran medida en la calidad y cantidad de puntos que se obtengan. La Figura 4.2 muestra el proceso de escaneo de la pieza de la puerta.

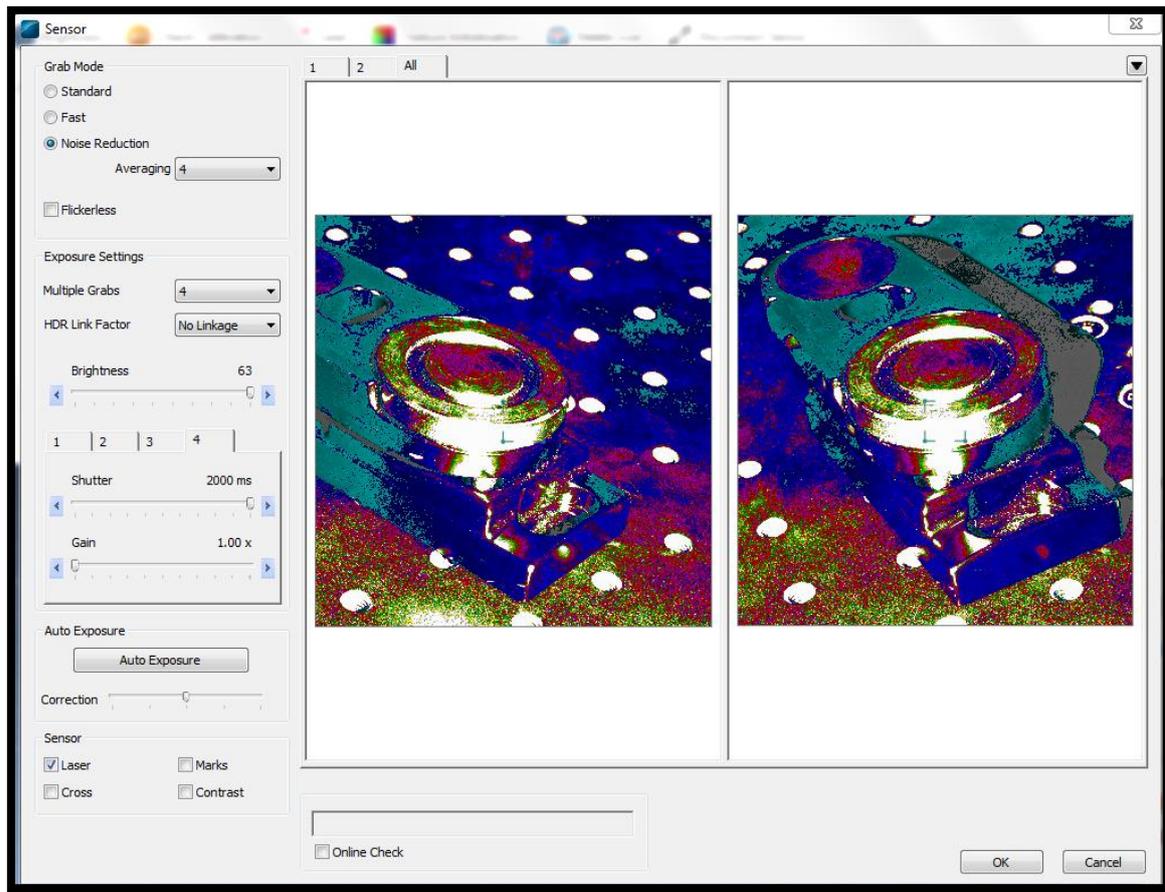


Figura 4.1: Ajuste de los parámetros del escáner. Fuente: Elaboración propia.

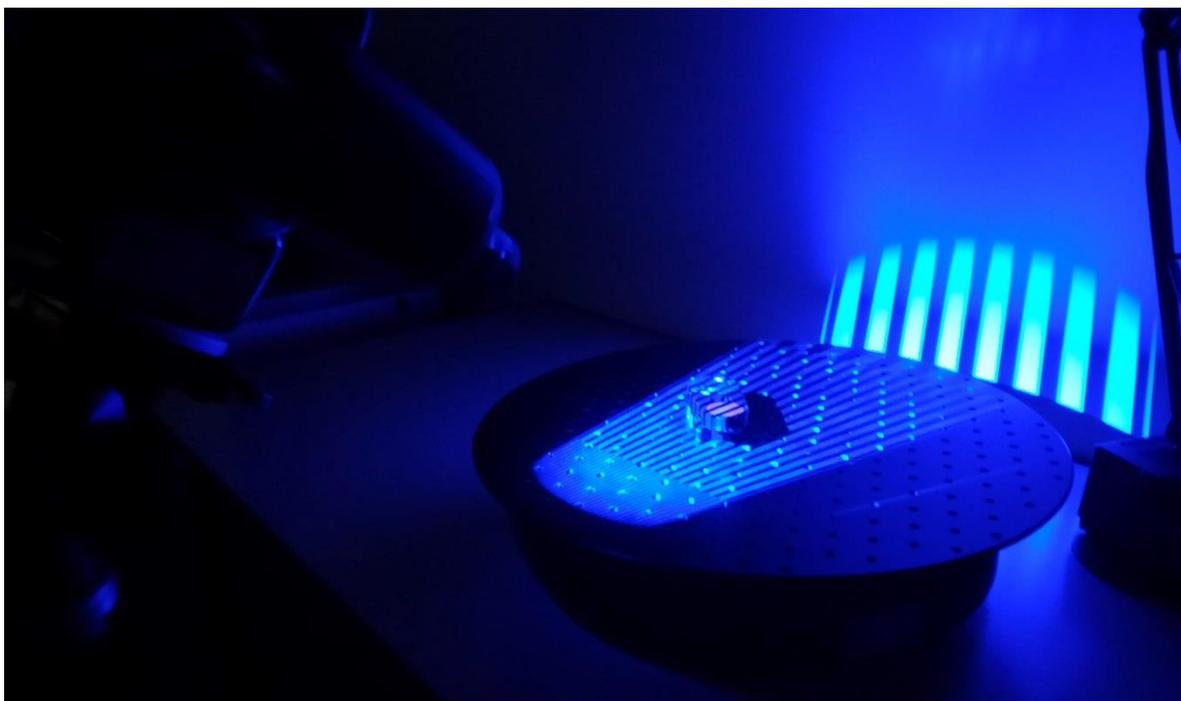


Figura 4.2: Escaneando la pieza. Fuente: Elaboración propia.

La pieza se debe de escanear en varias posiciones, para obtener puntos en toda su superficie y poder reconstruir su geometría completa. Es posible que el escáner obtenga puntos no deseados, los cuales deben eliminarse, para no interferir con los puntos reales de la pieza, y obtener una nube de puntos final más “limpia”.

Cada escaneo debe ser alineado con los anteriores en el programa del escáner, que lo puede realizar automáticamente, si es que precisa de la información suficiente, o se puede hacer manualmente en caso contrario. La cantidad de escaneos necesarios dependerá de la forma y color de la pieza, y de la cantidad de información requerida. En este caso, dado que las formas son simples y se pueden replicar con relativa facilidad en el software CAD, no es necesaria una gran cantidad de información en forma de puntos. Las siguientes figuras muestra el resultado final del escaneo (Figura 4.3).



Figura 4.3: Nube de puntos final obtenida (vista isométrica superior(izquierda) e inferior(derecha)). Fuente: Elaboración propia.

Una vez obtenida la nube de puntos gracias al escáner, este archivo se importa en el software de diseño Geomagic Design X () para la reconstrucción completa de la pieza mediante el modelado de un sólido.

En primer lugar, se generan las regiones de la malla (definen geometrías primitivas: planos, cilindros, etc) (Figura 4.4). Esto se lleva a cabo con una auto segmentación de la malla, que puede tener mayor o menor sensibilidad, y por tanto mayor o menor número de regiones respectivamente. Con las regiones ya obtenidas, se alinean los planos de referencia con planos de regiones, de forma que estos sean útiles a la hora de realizar el diseño de la pieza.

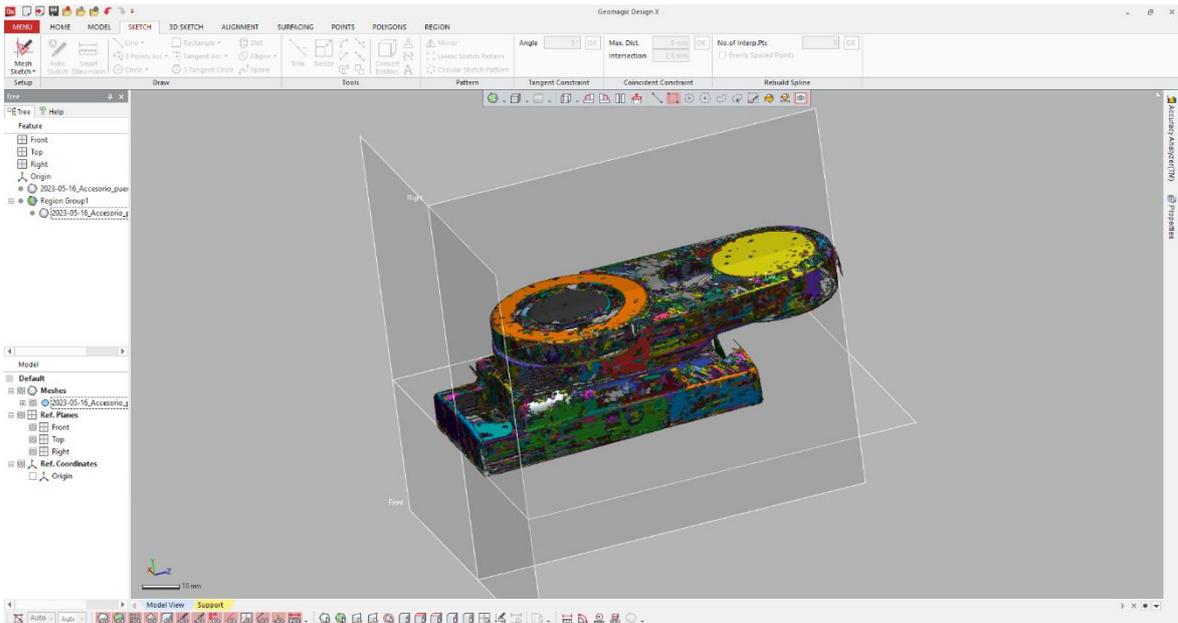


Figura 4.4: Regiones obtenidas y alineamiento de los planos. Fuente: Elaboración propia.

A diferencia de los bocetos realizados en los softwares de diseño habituales, en este caso se realiza un boceto a partir de malla o *mesh sketch*, que consiste en sacar un boceto o *sketch* en un plano que corta a la malla. Este *mesh sketch* es utilizado como apoyo para hacer un *sketch* encima de él, pudiéndose replicar la geometría de la malla de forma automática si se desea (Figura 4.5).

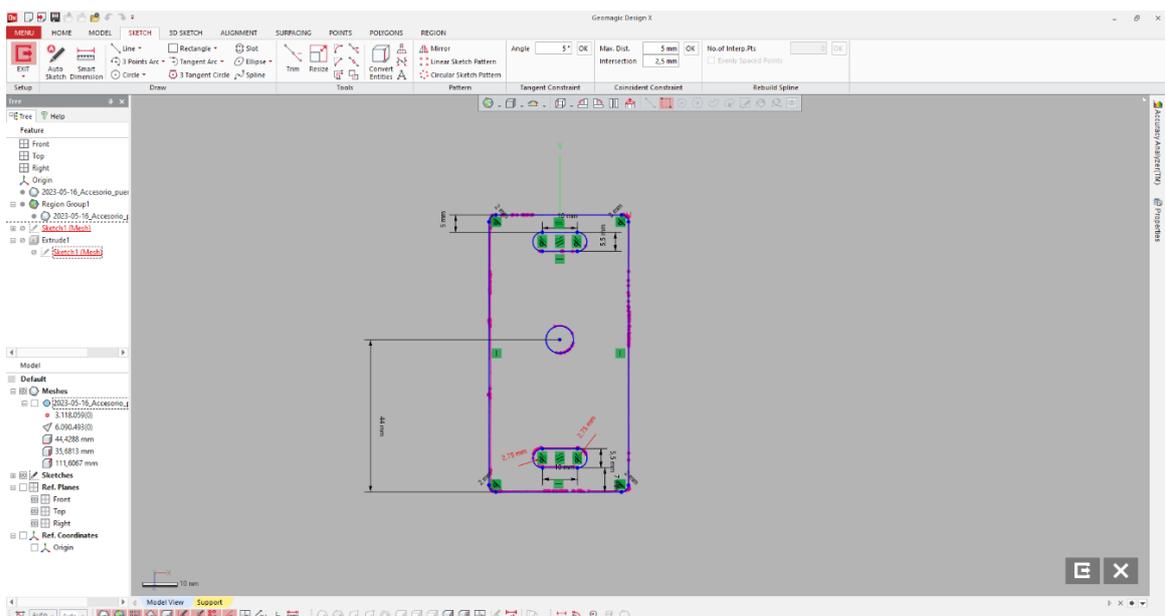


Figura 4.5: *Mesh sketch* (rosa) y *sketch* (azul). Fuente: Elaboración propia.

El resto de las operaciones son idénticas a los softwares CAD habituales, diseñar sketches y realizar operaciones con estos, como extrusiones, agujeros, etc. (Figura 4.6). La diferencia radica en el uso de los *mesh sketches* para obtener los *sketches* a realizar.

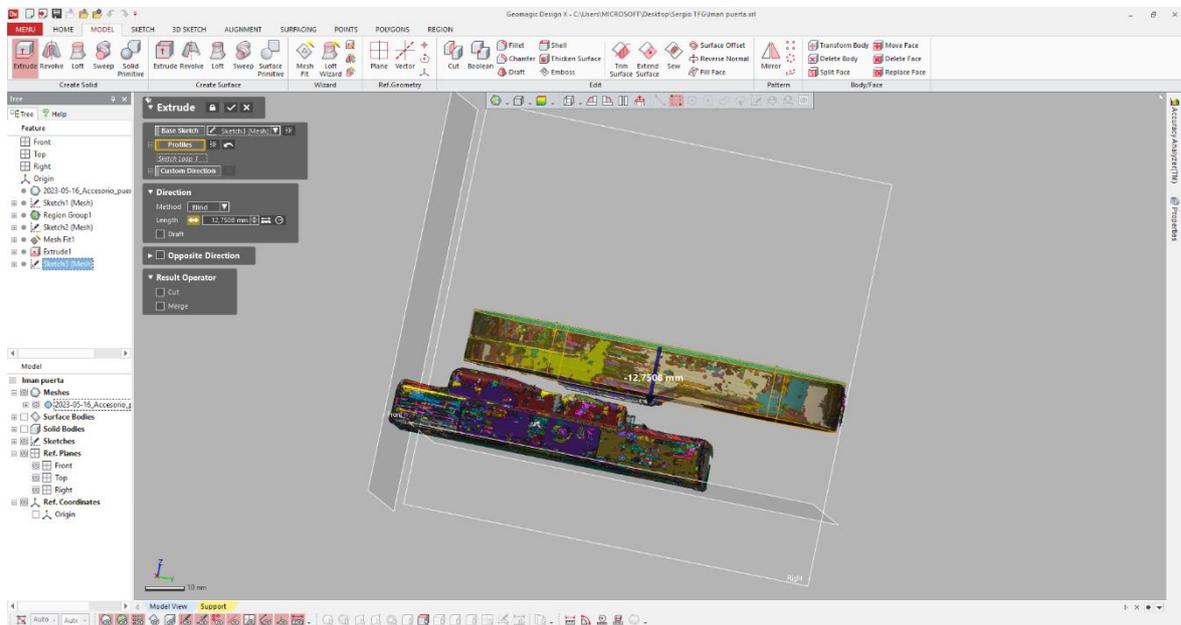


Figura 4.6: Operación de extrusión con *mesh sketch*. Fuente: Elaboración propia.

Una vez se han realizado todas las operaciones necesarias se obtiene la pieza final (Figura 4.7), la cual se puede usar para diseñar en el mismo programa el resto de las piezas, o guardar como un archivo STP para poder importarla en cualquier programa CAD. Esta última es la ruta elegida, pues el diseño del útil para la sujeción de la pieza de la puerta se realizará en otro programa (Catia).

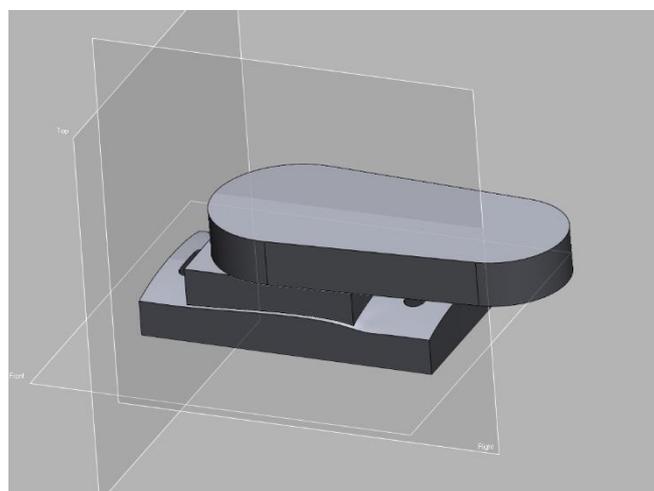


Figura 4.7: Modelo 3D de la pieza de la puerta. Fuente: Elaboración propia.

El modelado del electroimán se realiza de una forma más tradicional, ya que es una pieza sencilla de replicar tomando mediciones con un calibre pie de rey. Se realiza directamente en el software Catia (Figura 4.8).

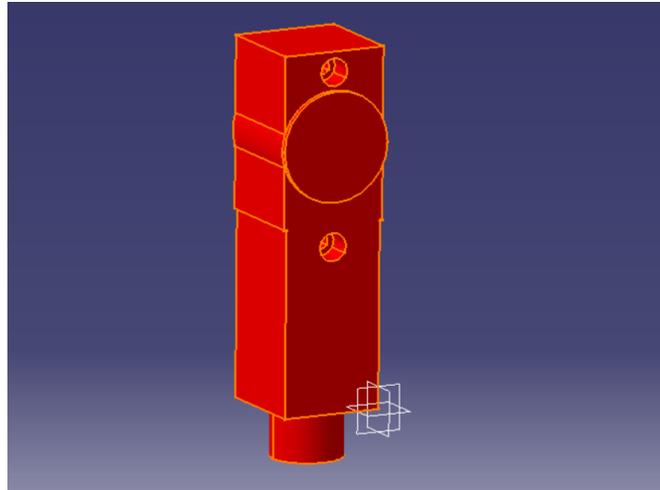


Figura 4.8: Modelado del electroimán. Fuente: Elaboración propia.

Una vez obtenidos los modelos 3D de la pieza de la puerta y del electroimán, se realiza en Catia un ensamblaje de las piezas tal como estarían posicionadas en la máquina (Figura 4.9). Así, se puede diseñar una pieza que sujete la de la puerta (gris) al electroimán (rojo) directamente en el ensamblaje de las piezas en Catia.

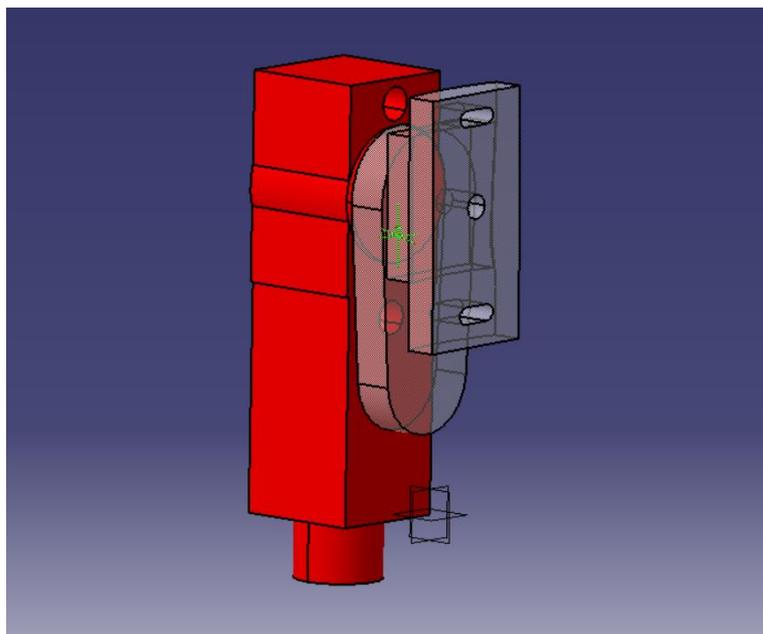


Figura 4.9: Ensamblaje de las piezas en su posición en la máquina. Electroimán en rojo, pieza de la puerta en gris. Fuente: Elaboración propia.

4.2 PRIMERA PROPUESTA DE ÚTIL DE SUJECIÓN

En primer lugar, se propone la fabricación de un útil que se sujete al electroimán por fricción, y sobre el que recaiga la pieza de la puerta y sea sujeta esta última por gravedad, con movimientos laterales y hacia abajo restringidos, es decir, que solo se pueda introducir desde arriba. La sujeción del útil por fricción se llevaría a cabo de paredes deformables, de manera que el útil se pueda introducir con holgura en el electroimán, y, una vez en posición, apretando dos tornillos, estos introduzcan fuerzas de apriete sobre las paredes del útil, y una vez estén estas paredes en contacto con el electroimán, la fuerza de apriete provoque una fuerza de fricción suficiente como para sujetar el peso del útil y de la pieza (Figura 4.10).

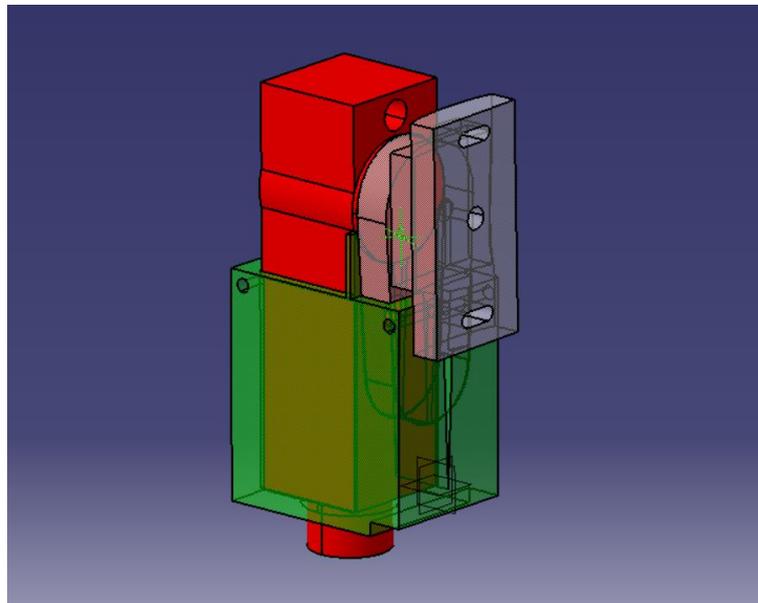


Figura 4.10: Modelo aproximado del útil de sujeción por fricción (verde). Fuente: Elaboración propia.

Los tornillos serían pasantes en los dos agujeros en la pieza (Figura 4.10), de forma que la cabeza del tornillo queda en un extremo del agujero, y se aprieta con una tuerca en el otro extremo, con una arandela en ambos lados para hacer una distribución de tensiones más eficaz. El peso total es el siguiente:

$$m_{total} = m_{\text{útil}} + m_{\text{pieza puerta}} = 160g + 500g = 660g \quad (6)$$

El coeficiente de fricción estático μ entre el PETG (el material se discute en el apartado 5.1) y el recubrimiento plástico del electroimán se desconoce, luego se coge un valor conservador de 0,2, que es el coeficiente de fricción estático μ_{est} entre el PET y el acero limpio y lubricado [17].

$$F_{apriete} = \frac{m_{total}}{\mu_{est}} = \frac{660g}{0,2} = 3300g = 33 N \quad (7)$$

Sin embargo, esta no es la fuerza resultante a aplicar, pues se ha de añadir la fuerza necesaria para deformar las paredes hasta que entren en contacto con la pieza. La deformación necesaria de diseño se estima en un máximo de 1mm por pared.

$$F_t = F_{apriete} + F_{deformación} \quad (8)$$

La $F_{deformación}$ se puede obtener de varias formas, en este caso de forma tradicional, con el uso de los teoremas de Mohr (o un prontuario de vigas simples obtenido con ellas, como se hace en es), la fuerza necesaria para la deformación de 1mm en cada lado, considerando dos pilares en voladizo, como se aprecia en la Figura 4.11 . También se podría calcular mediante el módulo de elementos finitos de Catia.

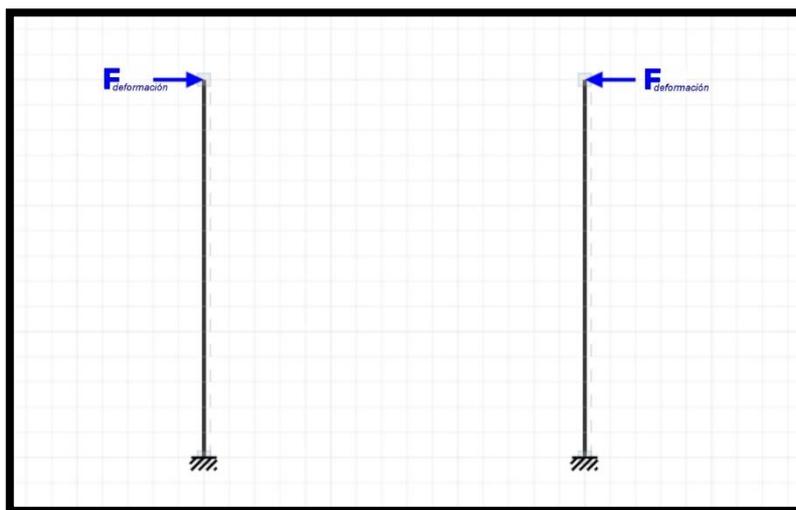


Figura 4.11: Simplificación de cálculos usando 2 vigas en voladizo. Fuente: Elaboración propia.

El módulo elástico del PETG es de 2000 MPa (siendo conservador, depende de la dirección de impresión) [18], y el momento de inercia de la sección (con respecto al eje débil, en este caso), la cual es mostrada en la Figura 4.12, se calcula utilizando una herramienta en la web [19] (Figura 4.13). La desventaja es que esta herramienta solo permite el cálculo del momento de inercia con respecto del centroide de la sección, lo cual no es el caso en este cálculo, en el que la flexión ocurrirá con respecto del centro del alma de la sección. Para calcular el momento de inercia real, se usará el teorema de Steiner.

$$I_{y,T} = I_{y,G} + Ad^2 = 2,48 \text{ cm}^4 + 5,85 \text{ cm}^2 * (0,55 \text{ cm})^2 = 5,7 \text{ cm}^4 \quad (9)$$

Donde $I_{z,T}$ es el momento de inercia con respecto al eje de inercia deseado, en este caso, el centro del alma de la sección (Figura 4.12), $I_{z,G}$ es el momento de inercia con respecto al centroide de la sección, A es el área de la sección, y d es la distancia entre el centroide y el nuevo eje de inercia.

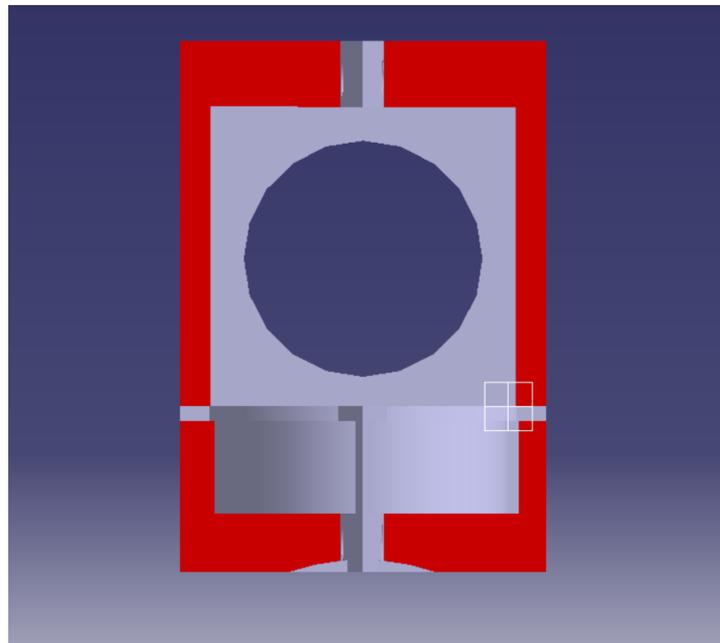


Figura 4.12: Sección que se desplaza, a la izquierda y a la derecha, en rojo. Fuente: Elaboración propia.



Figura 4.13: Cálculo del momento de inercia de la sección. Fuente: [19].

Para hallar la fuerza necesaria para el desplazamiento, se usa la ecuación para el cálculo de la flecha de una viga empotrada en voladizo.

$$u_{y,max} = \frac{FL^3}{3EI}; 1mm = \frac{F * (60 mm)^3}{2000 MPa * 25000 mm^4}; F_{deformación} = 231N \quad (10)$$

Donde L es la longitud del voladizo, en este caso 60mm, el módulo de Young E son 2000 MPa, y la inercia 45 cm⁴ (450000 mm⁴). Ahora que ya se tienen los valores de las dos fuerzas existentes, ya se puede obtener la fuerza que se debe introducir en la pieza, multiplicada por un coeficiente de seguridad de 1,15.

$$F_t = (231 N + 33 N) * 1,15 = 304 N \quad (11)$$

Esta fuerza F_t debe de ser repartida entre los dos tornillos, es decir, cada uno de ellos debe de estar traccionado a 152 N ($F_{tornillo}$). Para seleccionar la métrica y calidad correspondientes, se acude a tablas de propiedades mecánicas de tornillos. Si se trabaja con tornillos de calidad 8.8, que poseen una resistencia a la tracción en fluencia $\sigma_t=800$ MPa, y un límite elástico del 80% de σ_t . Como se trata de tornillos que se quitan y ponen

constantemente, sin deseo de ser reemplazados, se requiere que trabajen en régimen elástico, luego el límite elástico $\sigma_{e,8.8} = 640 \text{ MPa}$, donde debe de trabajar el tornillo. En caso de que se trabaje con un trabajo con tornillos de calidad 10.9, su límite elástico será $\sigma_{e,10.9} = 900 \text{ MPa}$ [20]. Se calculan entonces los diámetros mínimos de los tornillos para estas calidades y requisitos.

$$\sigma_e \leq \frac{F_{\text{tornillo}}}{A} = \frac{F_{\text{tornillo}}}{\pi r^2} \quad (12)$$

$$\sigma_{e,8.8} = 640 \text{ MPa} \leq \frac{152 \text{ N}}{\pi r^2}; r \geq 0,28 \text{ mm}; d \geq 0,56 \text{ mm} \quad (13)$$

Como el diámetro mínimo del tornillo es muy bajo, y no existen métricas tan bajas, se deciden utilizar tornillos de métrica 3 (M3x0,5) y calidad 8.8. No es necesario el cálculo del diámetro mínimo para la calidad 10.9, pues será aún menor. Estos tornillos soportan hasta 3200N de esfuerzo axial en régimen elástico, muy por encima de las necesidades de diseño. Además, permite el uso de insertos de rosca en la pieza, que son fácilmente instalables con el uso de un soldador eléctrico o cautín.

El par de apriete máximo se establece en 1 Nm, aunque variará en función del estado de sujeción de la pieza. Como los tornillos están sobredimensionados, no será necesario llegar a este valor nunca.

En cuanto a la resistencia mecánica, se desprecia el cortante en favor del flector.

El flector máximo en la sección es $M_{y,max} = F * L = 304 \text{ N} * 60 \text{ mm} = 18240 \text{ Nmm}$ (barra en voladizo).

$$I_y = 2480 \text{ mm}^4; y_{max} = 16 \text{ mm} \quad (14)$$

$$W_{y,min} = \frac{I_y}{y_{max}} = \frac{2480 \text{ mm}^4}{16 \text{ mm}} = 1550 \text{ mm}^3 \quad (15)$$

$$\sigma_{max} = \frac{M_{y,max}}{W_{y,min}} = \frac{18240 \text{ Nmm}}{1550 \text{ mm}^3} = 11,76 \text{ MPa} \quad (16)$$

Realmente, la sección es una sección variable, ya que las alas de la sección aumentan de longitud cuanto más para abajo está, lo que beneficiaría este cálculo. Sin embargo, se tomará como referencia este valor.

Las ventajas de esta propuesta son las siguientes:

1. El útil y la pieza quedarían totalmente inmovilizados una vez en su posición.

Los inconvenientes de esta propuesta son:

1. Existe la posibilidad de que la superficie del electroimán se raye con el paso del tiempo debido a la introducción del útil si la holgura entre el útil y el electroimán es menor a la óptima cuando no están apretados los tornillos.
2. Peso ligeramente alto (~160g), por lo que incrementa el coste de fabricación.
3. Para ponerlo en su posición hay que poner tornillos, por lo que aumenta el tiempo de instalación.

4.3 SEGUNDA PROPUESTA DE ÚTIL DE SUJECIÓN

Al presentar la idea de la propuesta anterior (Figura 4.10), se propone la idea de realizar un útil que se sujete por gravedad, sin necesidad de tornillos, para que sea más rápido y sencillo de quitar y poner. Utilizando el ensamblaje de piezas realizado mediante ingeniería inversa (4.1), se realiza un boceto de una pieza más sencilla, que se introduciría desde el lado izquierdo del electroimán (Figura 4.14).

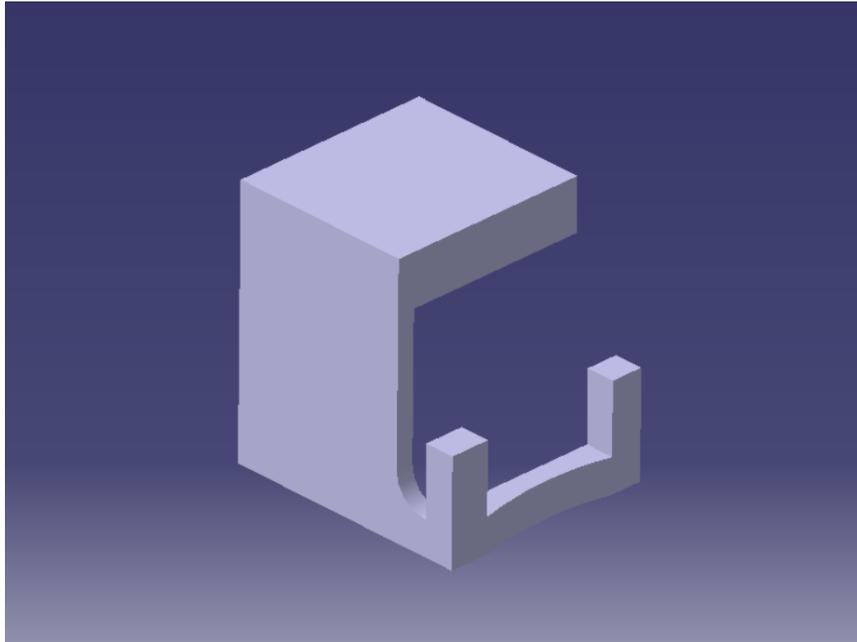


Figura 4.14: Primer diseño del útil sujeto por gravedad. Fuente: Elaboración propia.

Las ventajas de este útil con respecto del anterior radican en su simplicidad, que además de tener un tiempo de instalación menor debido a no usar tornillos, se asegura no dañar las piezas existentes en la máquina, ya que no existe ninguna fricción que pues dañar con el paso del tiempo la pintura o recubrimiento del electroimán, así como una importante reducción de material con respecto de la otra propuesta, en torno al 60% de ahorro, por lo que, si esta propuesta funciona correctamente, sería la más adecuada.

El principal inconveniente de esta propuesta es que el útil no queda completamente inmovilizado, ya que se puede desplazar hacia arriba. Sin embargo, esto no tiene gran importancia, pues en la práctica y debido a su propio peso junto al de la pieza de la puerta, solo la manipulación de este puede moverlo.

Debido al bajo coste de producción de ambas propuestas (ANEXO A: PRESUPUESTOS), se decide fabricar ambos prototipos para ver su funcionamiento.

5 Fabricación de las propuestas

5.1 SELECCIÓN DEL MATERIAL PARA LAS PIEZAS FABRICADAS POR MEX

Para fabricar piezas mediante la tecnología MEX para este proyecto, se deben tener en cuenta ciertas necesidades:

- Las piezas que puedan estar en contacto con la pasta se limpian después de cada fabricación. Esta limpieza se lleva a cabo con la ayuda de etanol ($\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-OH}$) como disolvente, por lo que el material utilizado debe de ser químicamente resistente a este alcohol.
- Las piezas a fabricar tendrán ajustes mecánicos y tolerancias dimensionales determinadas, por lo que no interesa que haya variaciones dimensionales con el tiempo. La humedad en los polímeros provoca estos sucesos, por lo que se ha de seleccionar un material que sufra lo más mínimo posible ante estas degradaciones. Las piezas estarán en una sala climatizada, cuya temperatura no sobrepasará los 25°C.
- El coste del material tendrá que ser lo más económico posible.

A priori, los materiales disponibles son PLA, Nylon (PA 6,6) y PETG, de los cuales ya se dispone para fabricar en la UFI3D. El PLA y el Nylon no cumplen el segundo requisito, ya que son altamente higroscópicos. Además, sus propiedades mecánicas se ven altamente reducidas con la humedad, y se tendrían que sobredimensionar si fuese necesario [21].

Al contrario, el PETG es uno de los plásticos más estables dimensionalmente, solo por detrás del PTFE [22], y también es económico, siendo alrededor de un 15% más caro que el PLA solamente [23], y está altamente extendido en el mundo de la fabricación por MEX. En cuanto a la resistencia química, el PETG es altamente resistente al etanol a temperaturas de hasta 50°C [24], por lo que cumple todos los requisitos necesarios.

Pese a ello, y para estar seguros, se realiza un pequeño experimento, que consiste en imprimir dos probetas en este material, y sumergir una en agua, y otra en etanol (Figura 5.1), para comprobar su estabilidad dimensional y que no haya daños aparentes en ellas.

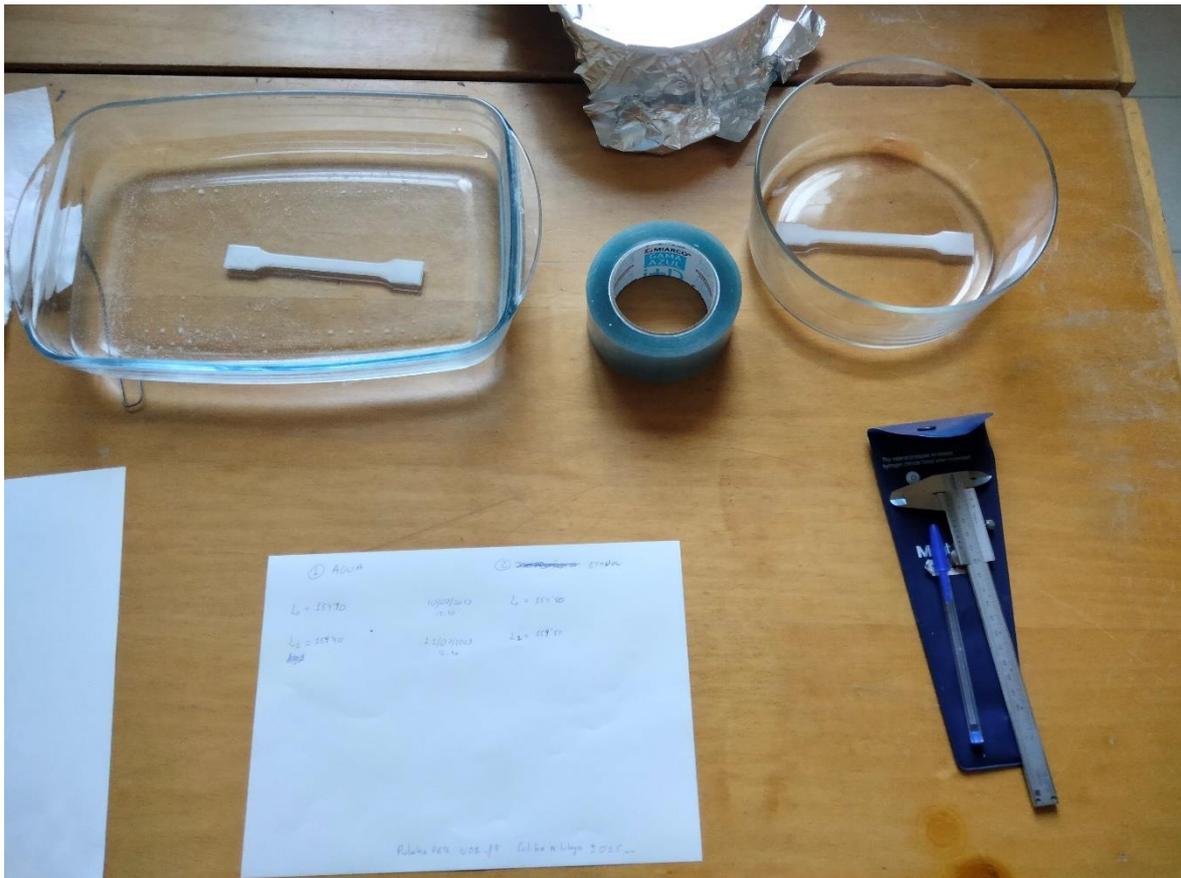


Figura 5.1: Experimento con probetas de PETG, sumergidas en agua (izda.) y en etanol (dcha.). Fuente: Elaboración propia.

Las probetas se fueron midiendo con un calibre pie de rey marca Mitutoyo con una división de escala de 0,05mm, y comprobando visualmente a lo largo de 10 días, y los resultados fueron excepcionales, ya que las variaciones dimensionales son cercanas a 0, y solo se observó una variación dimensional de 0,05mm al final del experimento (escala del equipo de medición), como se aprecia en la Figura 5.2.

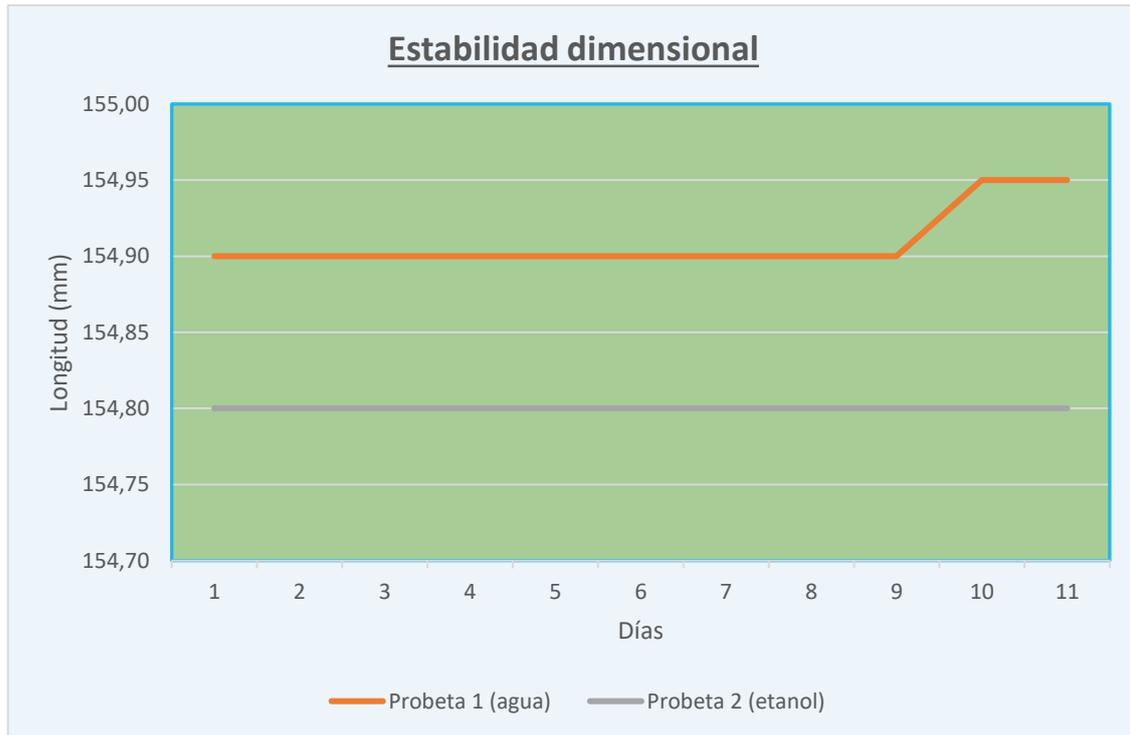


Figura 5.2: Resultados del experimento sobre la estabilidad química y dimensional del PETG. Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a los ajustes de impresión, se toma como punto de inicio los recomendados por CURA para el material Ultimaker PETG. Las modificaciones que se realizan son respecto al relleno, que se pone en función de los requisitos mecánicos de las piezas, y la altura de capa, que se sitúa en 0.15mm, para obtener una alta precisión. La generación de soportes se pone en modo *Zig Zag*, por experiencia propia. Las temperaturas y velocidades no se modifican. Los ajustes se verifican en la primera fabricación, que es del primer prototipo del útil de sujeción por fricción (Figura 5.4), y los resultados son excelentes.

La probeta sumergida en etanol tampoco ha sufrido ningún cambio aparente, y la rigidez de ambas probetas al final del experimento es similar, lo cual indica que la probeta en etanol no ha perdido propiedades mecánicas. Por todo ello, el PETG es un material ideal para este uso. Las propiedades del material se muestran en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1: Propiedades del PETG. Fuente: [18]

Propiedades del filamento PETG genérico (2,85mm)			
Tª de Extrusión	220-250 °C	Tª VICAT	81
Tª de la cama	70-80 °C	Coeficiente de fricción estático (μ)	-
Densidad	1,25 g/cm ³		
Modulo elástico (E) en XY	1500		
Modulo elástico (E) en ZX	1000	Peso bobina	750g
Límite elástico (σ) en XY	31,9	Precio bobina	20 €
Límite elástico (σ) en ZX	13,4	Coste específico	26,66 €/Kg

5.2 ÚTIL DE SUJECCIÓN PARA LA PIEZA DE LA PUERTA

Teniendo en cuenta que se disponen de dos propuestas diferentes, y que su coste de fabricación es muy pequeño, se decide fabricar ambas propuestas para comprobar su viabilidad, y ajustar las dimensiones de diseño si fuese necesario.

La fabricación se lleva a cabo en una impresora 3D MEX modelo Ultimaker 3 (Figura 5.3).



Figura 5.3: Impresora 3D MEX Ultimaker 3. Fuente: Elaboración propia.

Primero, se fabrica un prototipo del útil sujetado por fricción (Figura 5.4). Los ajustes dimensionales, como se esperaba, no son del todo correctos, y se realizan algunos ajustes dimensionales en el diseño para corregirlos. Sin embargo, sirve para determinar una nueva condición, y es que, existe un cable conectado al electroimán por la parte inferior que se debe de desenganchar cada vez que se quiera retirar el útil, o en su defecto, dejar el útil colgado del mismo cable cada vez que este no esté en su posición de uso (Figura 2.8). Este problema se podría corregir diseñando una pieza soporte que esté pegada a la estructura de la impresora, y que, cuando el útil no esté en su posición de uso, quede enganchado en este soporte, en lugar de estar colgado del cable sin ninguna restricción al movimiento. Esta modificación se hará en caso de que el otro útil, sujeto por gravedad y más sencillo, no funcione correctamente.

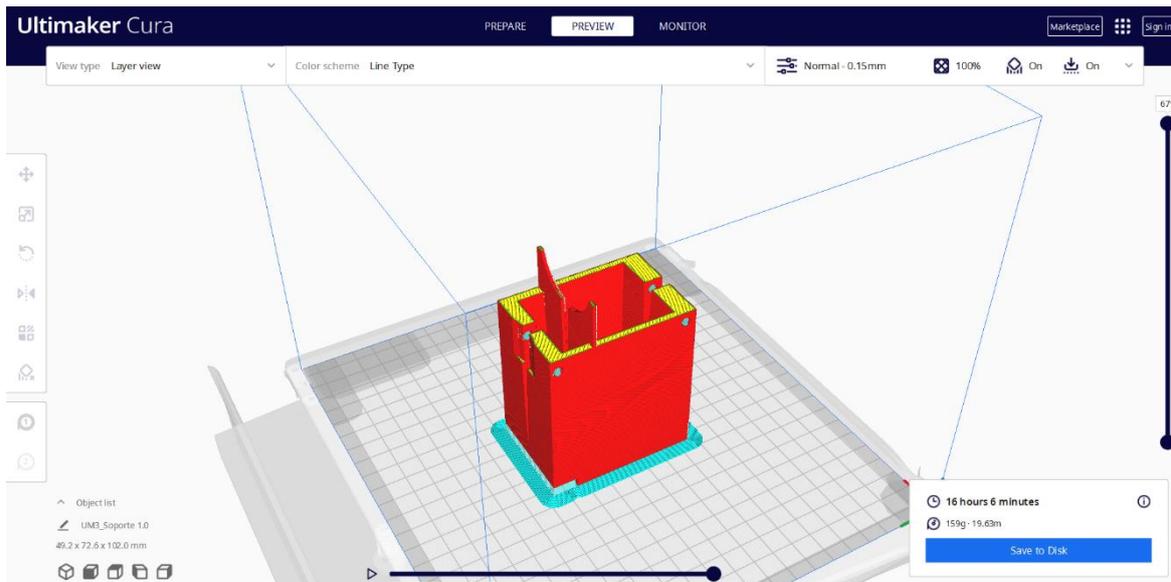


Figura 5.4: Preparación de la fabricación del primer prototipo de soporte sujeto por fricción. Fuente: Elaboración propia.

La fabricación de este primer prototipo también sirve para verificar los parámetros de la impresión, ya que es la primera pieza del trabajo fabricada en PETG. En este caso, la orientación de la pieza en la impresora se realiza como se ve en la Figura 5.4, para minimizar el uso de soportes, aunque no es ideal debido a que las capas van perpendiculares a la dirección de los esfuerzos introducidos por los tornillos. El límite elástico en la dirección de las capas es 14 MPa [18], por lo que es un 19% superior al esfuerzo máximo de cálculo, que es de 11,76 MPa, calculado en el apartado 4.2, luego entra dentro de parámetros.



Figura 5.5: Primer prototipo de útil de sujeción por fricción. Fuente: Elaboración propia.

Es después de llevar a cabo esta fabricación y prueba, cuando se decide la nueva condición de no tener que quitar el cable cada vez que se desee instalar el útil. Por esta condición, se le da un enfoque diferente a como atajar el problema, y se desarrolla la propuesta vista en el apartado 4.3. Este primer modelo se fabrica de la misma forma que el anterior.

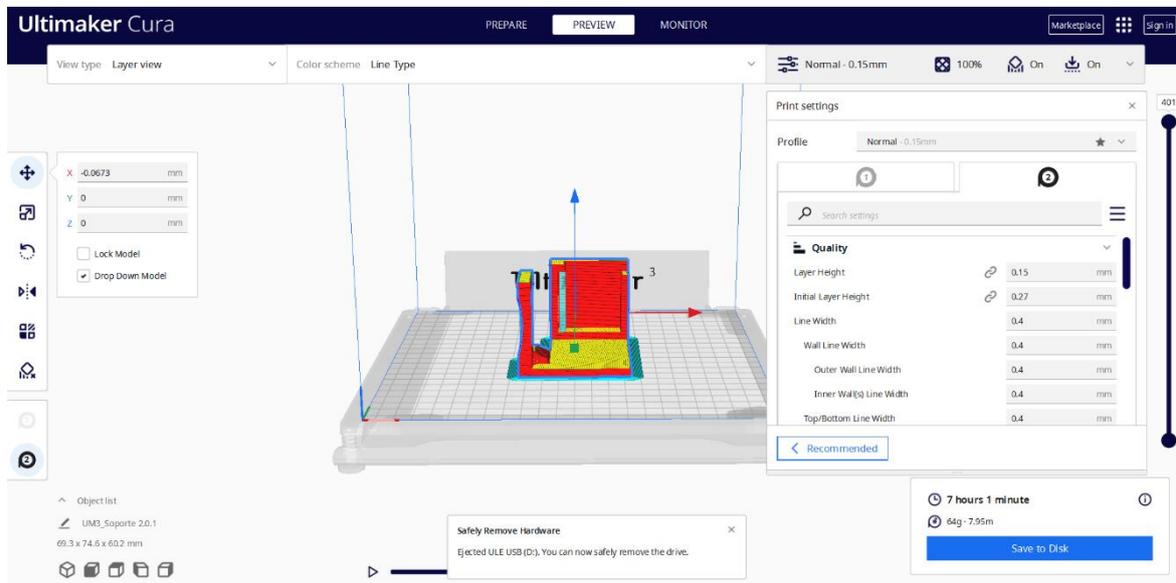


Figura 5.6: Preparación de la fabricación del primer prototipo del soporte sujeto por gravedad y restricción de movimientos. Fuente: Elaboración propia.

El resultado en la máquina es bueno, pero se deben de mejorar ciertos aspectos:

- Dimensiones ligeramente erróneas, lo que provocan que el electroimán no haga un buen contacto con la pieza de la puerta, y este no lo detecte correctamente.
- La pieza de la puerta no se puede introducir correctamente en el útil, es decir, la accesibilidad no es óptima, ya que una parte de la pieza de la puerta toca con el útil en el proceso de colocación.

Para solucionar ambos problemas, se corrigen las medidas, y se dota al útil de un cierto arco que permite una correcta colocación de las piezas, sin interferencias. Adicionalmente, se lleva a cabo una pequeña optimización topológica, quitando material en ciertas zonas donde se aprecia que existe un exceso de material, y se realizan refuerzos en zonas estratégicas. Este proceso permite obtener hasta un 22% de reducción de material, y un 68% con respecto del útil de sujeción por fricción (51g en lugar de 160g).

Una vez fabricado (Figura 5.7), se prueba su funcionamiento, con el fin de verificar las medidas de nuevo, y el resultado es correcto, luego no será necesaria ninguna modificación a mayores.

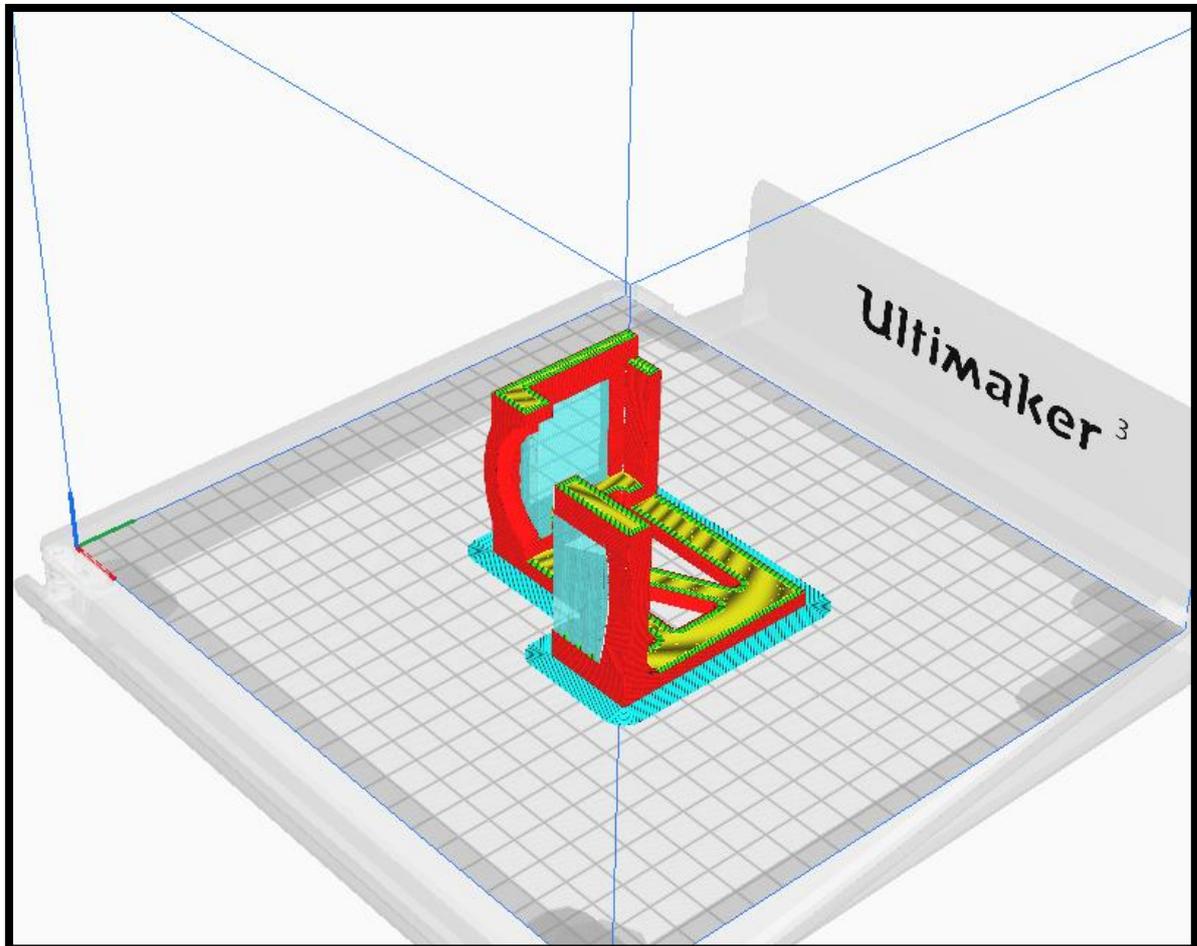


Figura 5.7: Preparación de la fabricación del útil final. Fuente: Elaboración propia.

5.3 SISTEMA DE ALIMENTACIÓN

La fabricación del sistema de alimentación no ha sido posible en el plazo en el que ha concurrido este trabajo, por lo que solamente se propone de forma teórica. Igualmente, se planea llevarlo a cabo, según los planos mostrados en el ANEXO B: PLANOS DE DISEÑO DEL DEPÓSITO MODULAR. A fecha de finalización de este trabajo, se ha realizado el pedido de los materiales necesarios, y se planea comenzar la fabricación en breve.

6 Conclusiones

En este TFG se han alcanzado los objetivos propuesto, a excepción de la fabricación del sistema de alimentación. Esta parte del trabajo no se ha podido realizar por falta de tiempo, pero se pretende finalizar con posterioridad a la defensa del mismo.

Respecto al objetivo sobre el diseño y fabricación de un útil de sujeción que permita mantener abierta la puerta de la máquina durante la etapa de preparación de la impresora para la fabricación, se ha realizado exitosamente. Tras el diseño, la fabricación y el testeo de dos propuestas diferentes, el modelo seleccionado es el que se muestra en la Figura 6.1. La propuesta seleccionada, además de ser más económica, es más fácil y rápida de montar y desmontar de la máquina que la otra propuesta. El funcionamiento de este útil ha sido verificado satisfactoriamente en la máquina de fabricación.



Figura 6.1: Foto del útil en su posición. Fuente: Elaboración propia.

En cuanto al depósito modular, se ha diseñado por completo, pero no se ha podido fabricar en el tiempo en el que se ha llevado a cabo este trabajo, debido a múltiples factores, como plazos de entrega y otros quehaceres relacionados con los estudios. Es por ello que se presenta de manera teórica este objetivo, con toda la información proporcionada a lo largo de este trabajo, así como los planos mostrados en el ANEXO B: PLANOS DE DISEÑO DEL DEPÓSITO MODULAR.

Actualmente se dispone de los materiales para llevar a cabo su fabricación. Las planchas de PTFE ya han sido compradas y suministradas por una empresa y los 2 adaptadores base-pistón (uno por cada base) se pueden fabricar en PETG en cualquier momento mediante la impresora de MEX (disponible en la UFI3D). Finalmente, se llevaría a cabo el ensamblaje y verificación de su correcto funcionamiento en máquina.

Como línea de trabajo futuro, se propone llevar a cabo una modificación del depósito para que precise de una mejor ergonomía durante su manipulación. En el caso del depósito original, este posee asas para poder manipularlo. Estas asas se encuentran al frente del depósito (Figura 2.6), y una solución así es imposible de llevar a cabo para el nuevo depósito, debido a que, como es más estrecho, las asas coincidirían con la pared frontal de la placa de aluminio roja. Una solución rápida y barata a este problema sería la fabricación de unas asas mediante MEX, o comprar unas de catálogo, y atornillarlas a las paredes laterales, donde se dispone de espacio según el nuevo diseño de depósito.

Bibliografía

- [1] «Additive manufacturing | ABB», *News*, 11 de febrero de 2020. <https://new.abb.com/news/detail/56908/additive-manufacturing> (accedido 28 de julio de 2023).
- [2] «Additive Manufacturing: History, Where We're At Now, Drivers of...». <https://markforged.com/es/resources/blog/additive-manufacturing-history-from-the-1980s-to-now> (accedido 17 de abril de 2023).
- [3] AENOR, «UNE-EN ISO/ASTM 52900. Fabricación aditiva. Principios generales. Fundamentos y vocabulario.», 2021.
- [4] Todd Grimm, «User's Guide to Rapid Prototyping», en *User's Guide to Rapid Prototyping*, 2004.
- [5] A. M., «STL vs 3MF: ¿qué formato elegir para tu modelo 3D?», *3Dnatives*, 27 de junio de 2022. <https://www.3dnatives.com/es/stl-vs-3mf-formato-modelo-3d-280620222/> (accedido 27 de julio de 2023).
- [6] AENOR, «UNE-EN ISO 17296-2 Fabricación aditiva Principios generales Parte 2: Visión general de categorías de procesos y de materias primas», pp. 3-6, 2017.
- [7] L. Wei *et al.*, «A novel fabrication of yttria-stabilized-zirconia dense electrolyte for solid oxide fuel cells by 3D printing technique», *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 44, n.º 12, pp. 6182-6191, mar. 2019, doi: 10.1016/j.ijhydene.2019.01.071.
- [8] «Technical Ceramics for Military Purposes», *AZoM.com*, 2 de febrero de 2018. <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=15126> (accedido 27 de julio de 2023).
- [9] J. Sun *et al.*, «A review on additive manufacturing of ceramic matrix composites», *J. Mater. Sci. Technol.*, vol. 138, pp. 1-16, mar. 2023, doi: 10.1016/j.jmst.2022.06.039.
- [10] I. Buj-Corral y A. Tejo-Otero, «3D Printing of Bioinert Oxide Ceramics for Medical Applications», *J. Funct. Biomater.*, vol. 13, n.º 3, p. 155, sep. 2022, doi: 10.3390/jfb13030155.
- [11] «WHO ARE WE? - 3D CERAM», 9 de octubre de 2020. <https://3dceram.com/who-are-we/> (accedido 17 de abril de 2023).
- [12] R. M. Kowtko y R. A. Mellwig, «Apparatus for injection of viscous material», US5066216A, 19 de noviembre de 1991. Accedido: 1 de mayo de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://patents.google.com/patent/US5066216A/en>
- [13] F. Castro, «Alúmina», *Monografias.com*, 11 de julio de 2006. <https://www.monografias.com/trabajos35/alumina/alumina> (accedido 5 de septiembre de 2023).
- [14] C. Matsika Klossa, N. Chatzidai, y D. Karalekas, «Tensile properties of 3D printed carbon fiber reinforced nylon specimens», *Mater. Today Proc.*, feb. 2023, doi: 10.1016/j.matpr.2023.02.107.
- [15] «Nanovia PC-PTFE : Low friction : Nanovia». <https://nanovia.tech/en/ref/nanovia-pc-ptfe/> (accedido 3 de mayo de 2023).
- [16] «PC-chemical-resistance.pdf». Accedido: 3 de mayo de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://ilgbcatalog.org/wp-content/uploads/2015/02/PC-chemical-resistance.pdf>

- [17] «Friction - Friction Coefficients and Calculator». https://www.engineeringtoolbox.com/friction-coefficients-d_778.html (accedido 3 de agosto de 2023).
- [18] «Polyethylene Terephthalate Glycol (PETG) Filament Review», *JuggerBot 3D*. <https://juggerbot3d.com/petg-filament-review/> (accedido 11 de agosto de 2023).
- [19] S. Carigliano, «Momento libre de inercia & Calculadora Centroide | SkyCiv», 27 de mayo de 2015. <https://skyciv.com/es/free-moment-of-inertia-calculator/> (accedido 3 de agosto de 2023).
- [20] AENOR, «UNE-EN ISO 898-1 Características mecánicas de los elementos de fijación de acero al carbono y de acero aleado. Parte 1: Pernos, tornillos y bulones con clases de calidad especificadas. Rosca de paso grueso y rosca de paso fino», 2013.
- [21] «Moisture-induced changes in the mechanical behavior of 3D printed polymers», *Compos. Part C Open Access*, vol. 7, p. 100243, mar. 2022, doi: 10.1016/j.jcomc.2022.100243.
- [22] «Dimensionally stable plastics | Ensinger». <https://www.ensingerplastics.com/en/plastic-material-selection/dimensionally-stable> (accedido 9 de agosto de 2023).
- [23] «Sicnova 3D: Empresa de impresoras y escáneres 3D profesionales», *Sicnova*. <https://sicnova3d.com/> (accedido 9 de agosto de 2023).
- [24] «PETG Chemical Resistance Data Sheet». <https://kmac-plastics.net/data/chemical/petg-chemical.htm> (accedido 4 de julio de 2023).

Anexos

ANEXO A: PRESUPUESTOS

En el siguiente anexo se muestran los presupuestos para la fabricación de las diferentes propuestas del depósito y el útil de sujeción de la pieza del electroimán, descritos en las secciones 3 y 4.

Nótese que solo se muestran en los presupuestos el coste de los materiales, y no se tienen en cuenta los costes de máquinas y herramientas (como las impresoras 3D MEX), ni la mano de obra.

Presupuesto fabricación depósito MEX filamento PC-PTFE			
COSTES DE MATERIALES			
Cantidad	Pieza	Coste unitario (€)	Coste total
1	Depósito pequeño (1034g)	124,08 €	124,08 €
1	Pistón pequeño 124x124 (153g)	13,36 €	13,36 €
1	Depósito grande (1288g)	154,56 €	154,56 €
1	Pistón grande 124x124 (202g)	24,24 €	24,24 €
TOTAL MATERIAL			316,24 €

<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;"> Presupuesto fabricación depósito mecanizando planchas de PTFE </div>			
COSTES DE MATERIALES			
Cantidad	Pieza	Coste unitario (€)	Coste total
1	Base plancha PTFE 120x120 e20	22,14 €	22,14 €
1	Base plancha PTFE 180x120 e20	32,10 €	32,10 €
2	Pared frontal plancha PTFE 210x200 e20	54,72 €	109,44 €
2	Pared lateral plancha PTFE 120x200 e15	32,41 €	64,82 €
12	Tornillos M6x25 DIN 912 8.8	0,10 €	1,20 €
2	Adaptador base pistón (133g PETG)	4,00 €	8,00 €
TOTAL MATERIAL			237,70 €

<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;"> Presupuesto fabricación útil de sujeción por fricción </div>			
COSTES DE MATERIALES			
Cantidad	Pieza	Coste unitario (€)	Coste total
1	160g PETG	3,20 €	3,20 €
2	Tornillos M3x60 DIN 912	0,60 €	1,20 €
2	Insertos de tuerca M3	0,05 €	0,10 €
TOTAL MATERIAL			4,50 €

Presupuesto fabricación útil de sujeción más simple por gravedad			
COSTES DE MATERIALES			
Cantidad	Pieza	Coste unitario (€)	Coste total
1	51g PETG	1,02 €	1,02 €
TOTAL MATERIAL			1,02 €

ANEXO B: PLANOS DE DISEÑO DEL DEPÓSITO MODULAR

En este anexo se muestran los planos necesarios para fabricar el depósito modular propuesto en el apartado 5.3 SISTEMA DE ALIMENTACIÓN.

D

C

B

A

4

4

3

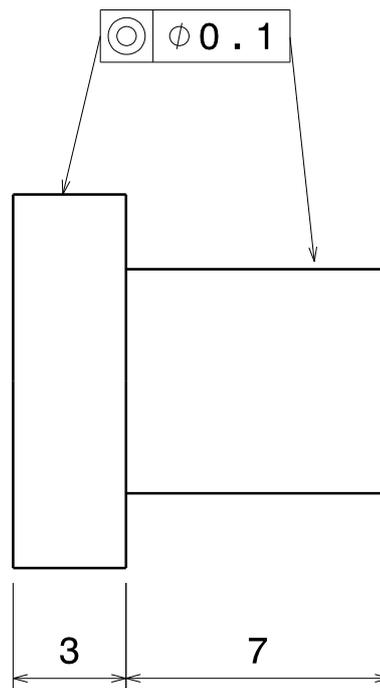
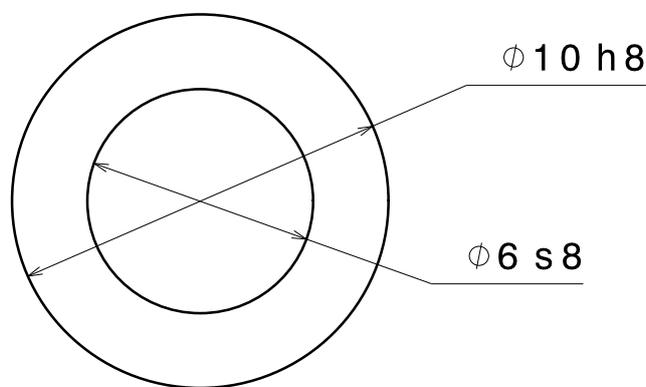
3

2

2

1

1



Alzado
Escala: 5:1

Perfil
Escala: 5:1

DESIGNED BY:
Sergio Rodríguez M.
DATE:
25/08/2023

CHECKED BY:
DATE:

SIZE
A4

SCALE
5:1

WEIGHT (kg)
0,01

DEPÓSITO DE CAPACIDAD
MODULAR PARA IMPRESORA 3D
SLA DE CERÁMICAS TÉCNICAS 3D
CERAM C900 FLEX

UNIVERSIDAD DE LEÓN

DRAWING NUMBER
TAPÓN

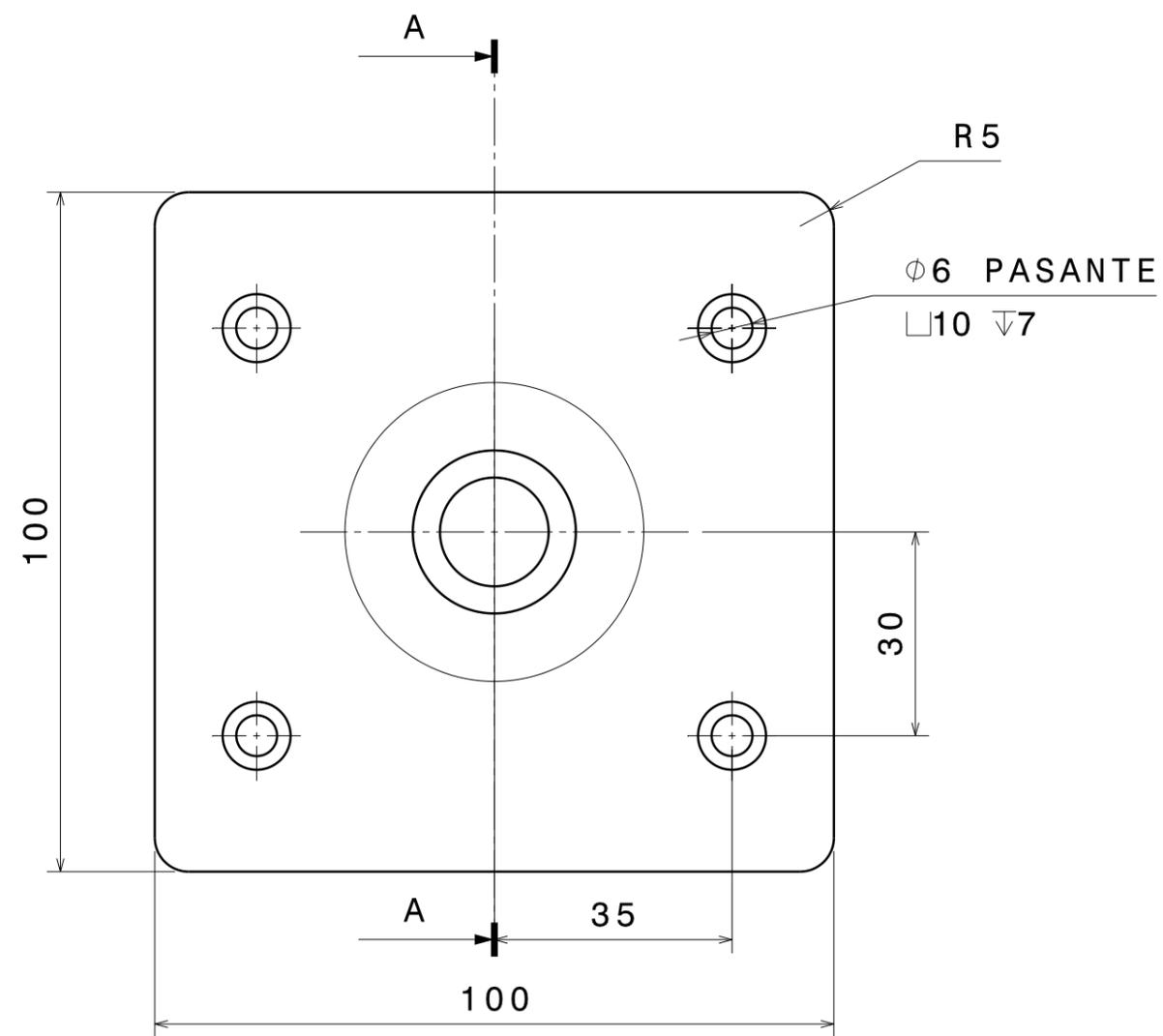
SHEET
1 / 1

I	-
H	-
G	-
F	-
E	-
D	-
C	-
B	-
A	-

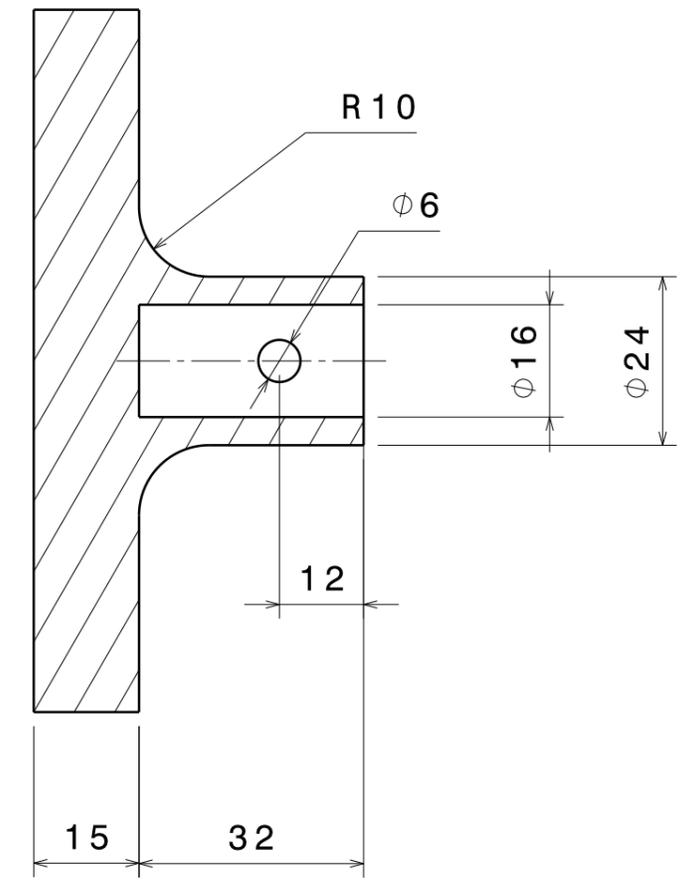
This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.

D

A



Alzado
Escala: 1:1



Vista de sección A-A
Escala: 1:1

Nota: Fabricación mediante fabricación aditiva FDM en polímero PETG

DESIGNED BY: Sergio Rodríguez M.		DEPÓSITO DE CAPACIDAD MODULAR PARA IMPRESORA 3D SLA DE CERÁMICAS TÉCNICAS 3D CERAM C900 FLEX		I	-
DATE: 25/08/2023				H	-
CHECKED BY:		UNIVERSIDAD DE LEÓN		G	-
DATE:				F	-
SIZE A3		ADAPTADOR BASE PISTÓN		E	-
SCALE 1:1	WEIGHT (kg) 0,16			D	-
DRAWING NUMBER		SHEET		C	-
		1 / 1		B	-
This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.				A	-

H G F E D C B A

4

4

3

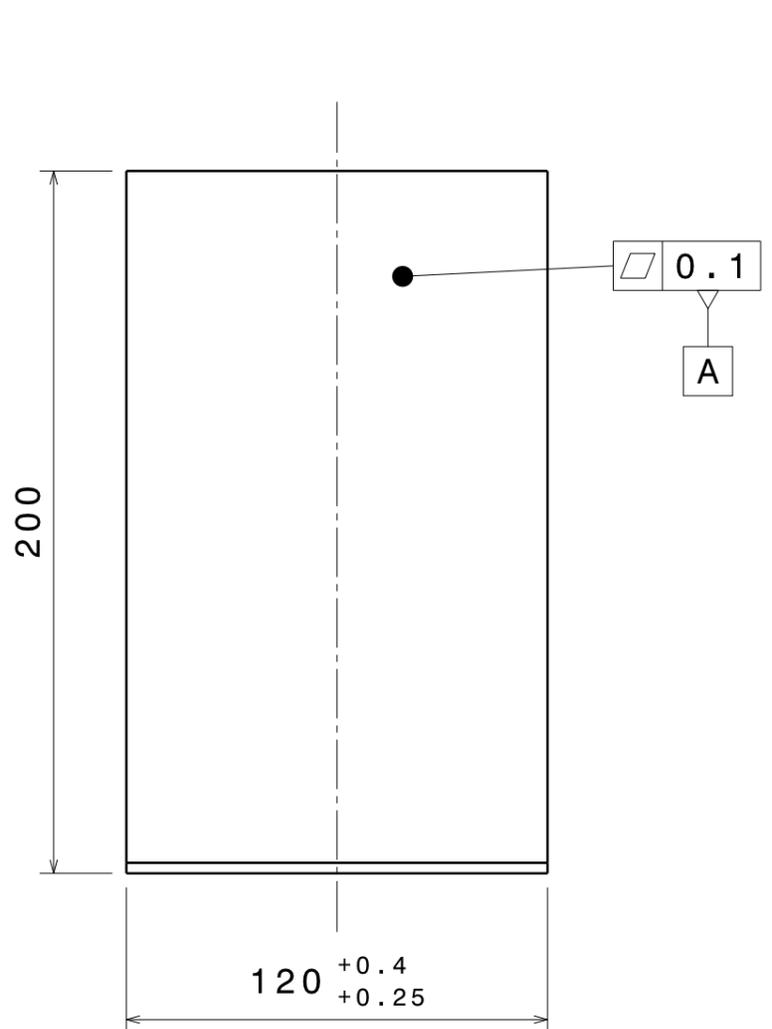
3

2

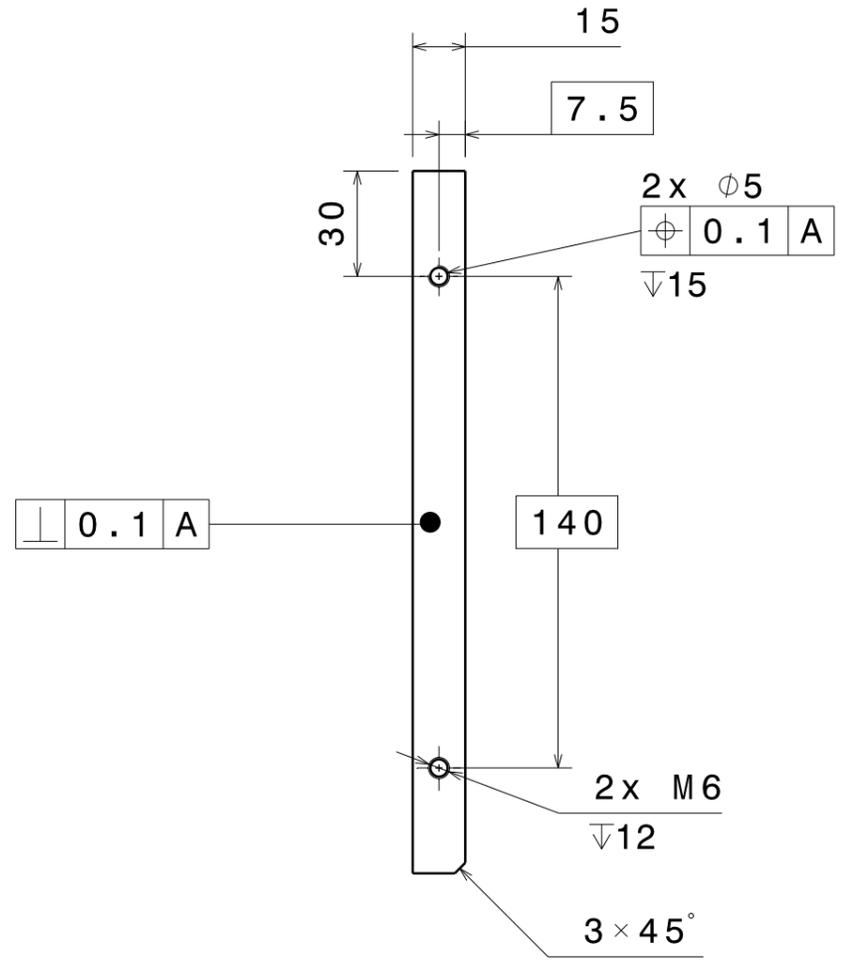
2

1

1



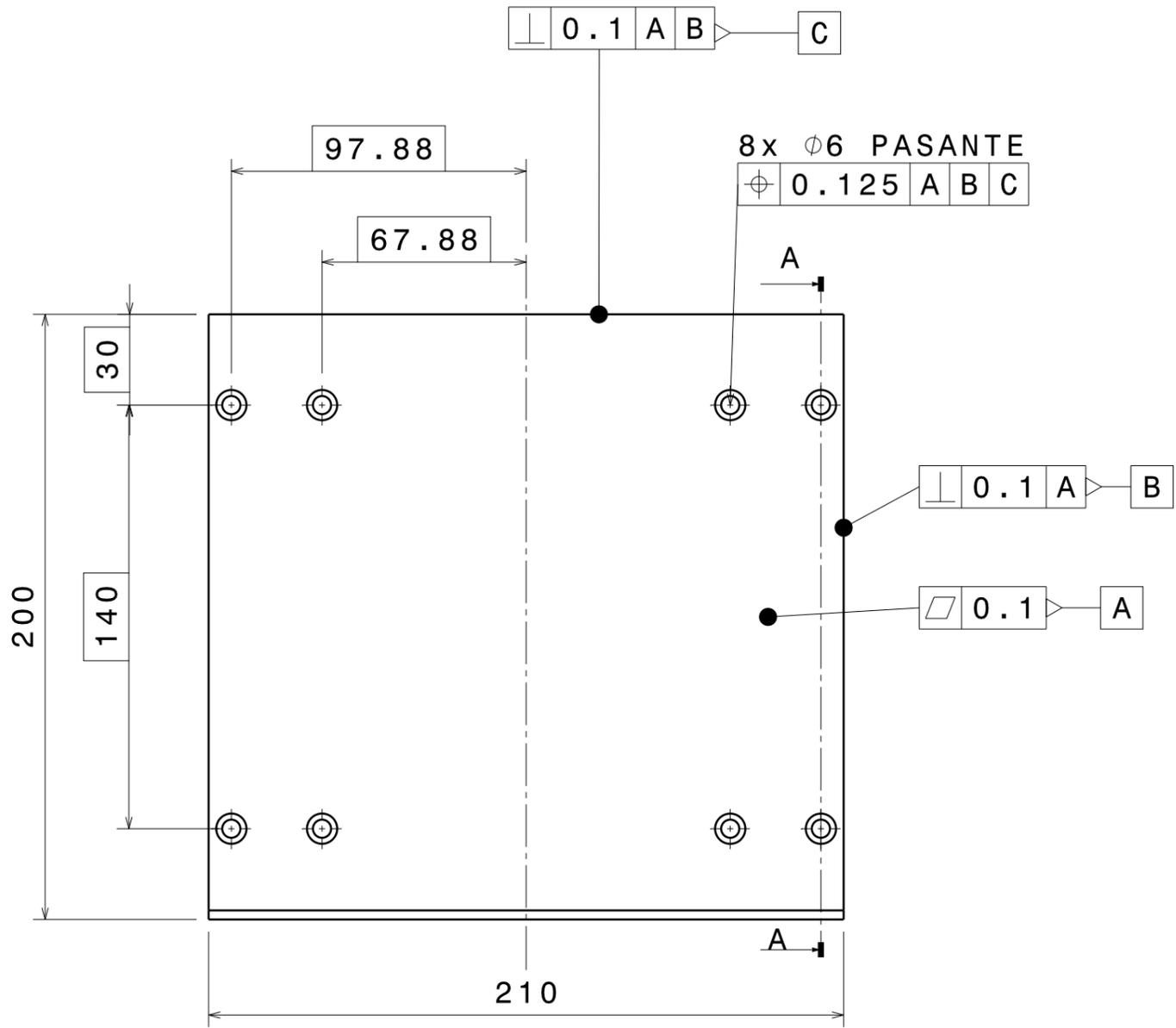
Alzado
Escala: 1:2



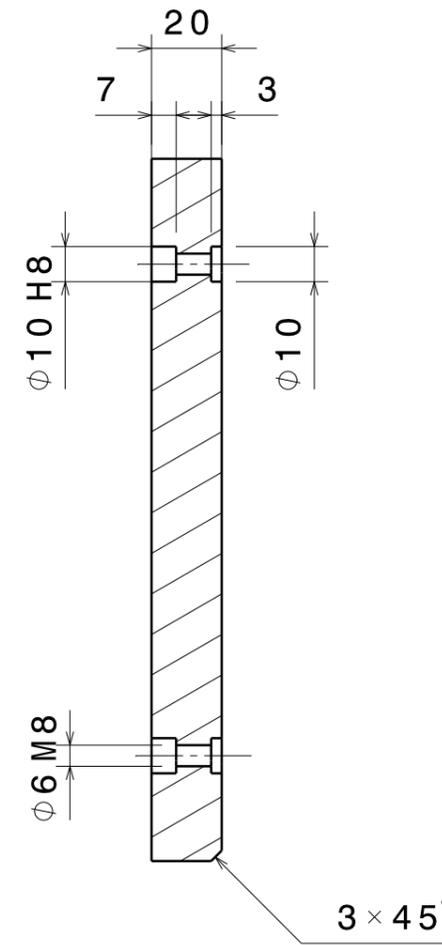
Perfil
Escala: 1:2

DESIGNED BY: Sergio Rodríguez M.		DEPÓSITO DE CAPACIDAD MODULAR PARA IMPRESORA 3D SLA DE CERÁMICAS TÉCNICAS 3D CERAM C900 FLEX		I	-
DATE: 25/08/2023				H	-
CHECKED BY:		UNIVERSIDAD DE LEÓN		G	-
DATE:				F	-
SIZE A3		PARED LATERAL		E	-
SCALE 1:2	WEIGHT (kg) 0,36			D	-
DRAWING NUMBER		SHEET 1/1		C	-
				B	-
This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.				A	-

H G B A

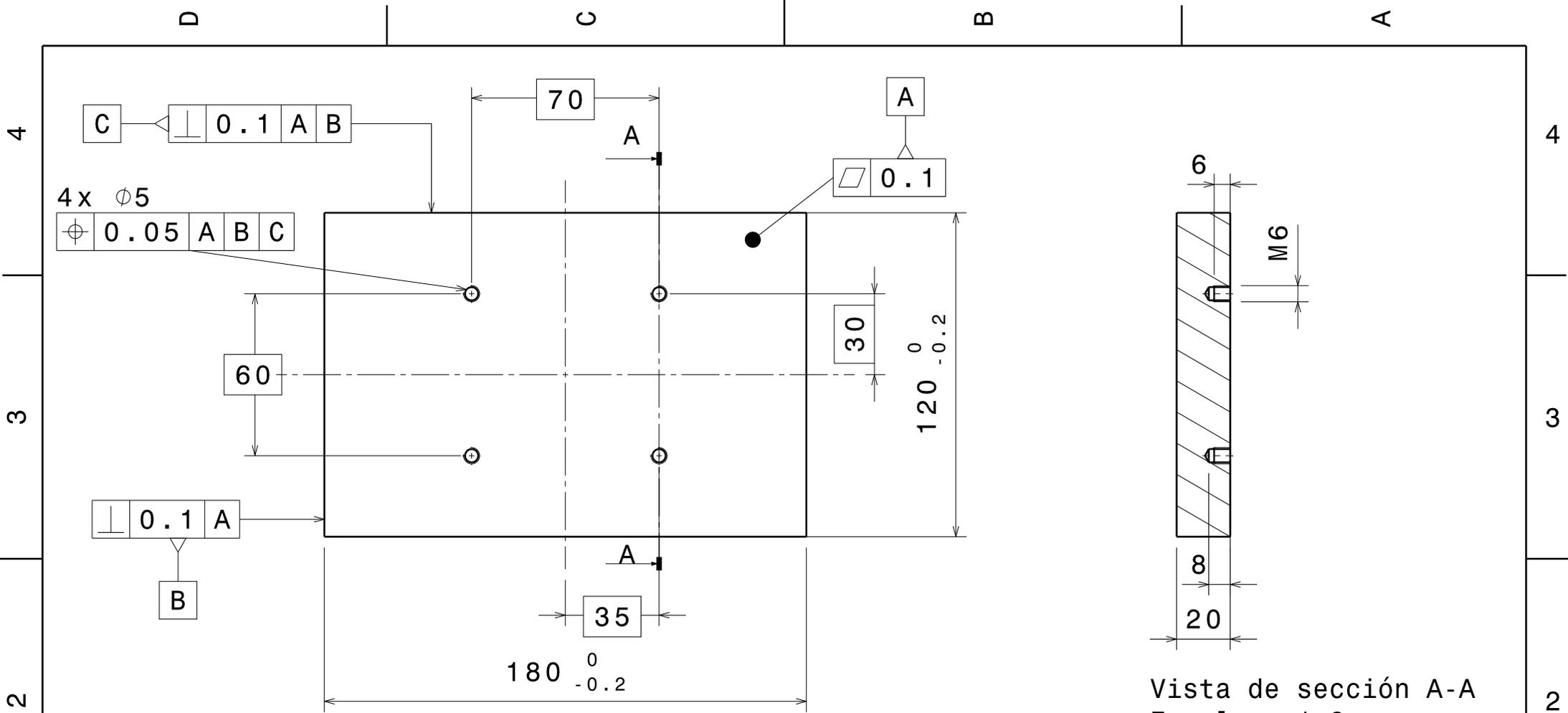


Alzado
Escala: 1:2



Vista de sección A-A
Escala: 1:2

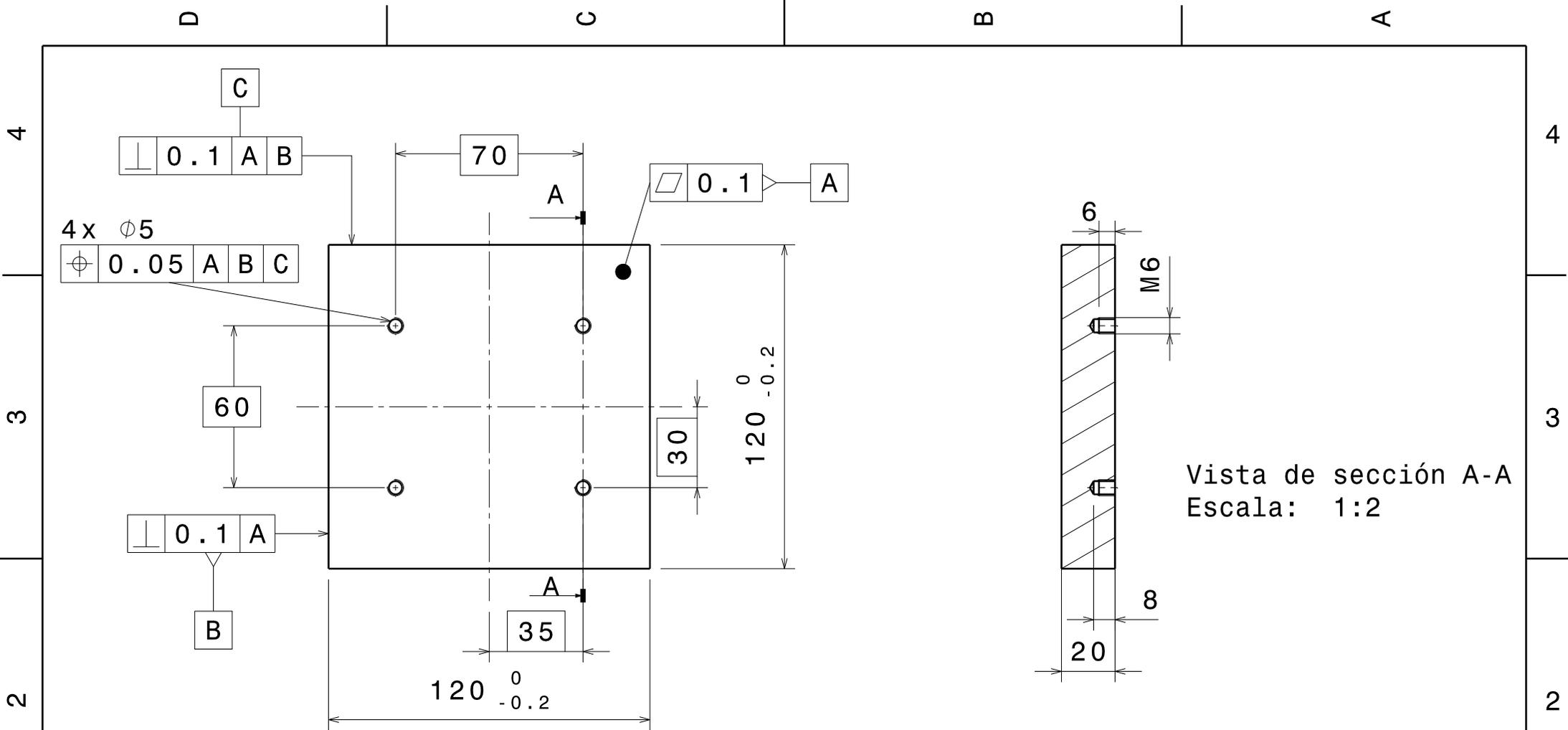
DESIGNED BY: Sergio Rodríguez M.		DEPÓSITO DE CAPACIDAD MODULAR PARA IMPRESORA 3D SLA DE CERÁMICAS TÉCNICAS 3D CERAM C900 FLEX		I	-
DATE: 25/08/2023				H	-
CHECKED BY:		UNIVERSIDAD DE LEÓN		G	-
DATE:				F	-
SIZE A3		PARED FRONTAL		E	-
SCALE 1:2	WEIGHT (kg) 0,83			D	-
DRAWING NUMBER		SHEET		C	-
		1/1		B	-
This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.				A	-



Alzado
Escala: 1:2

Vista de sección A-A
Escala: 1:2

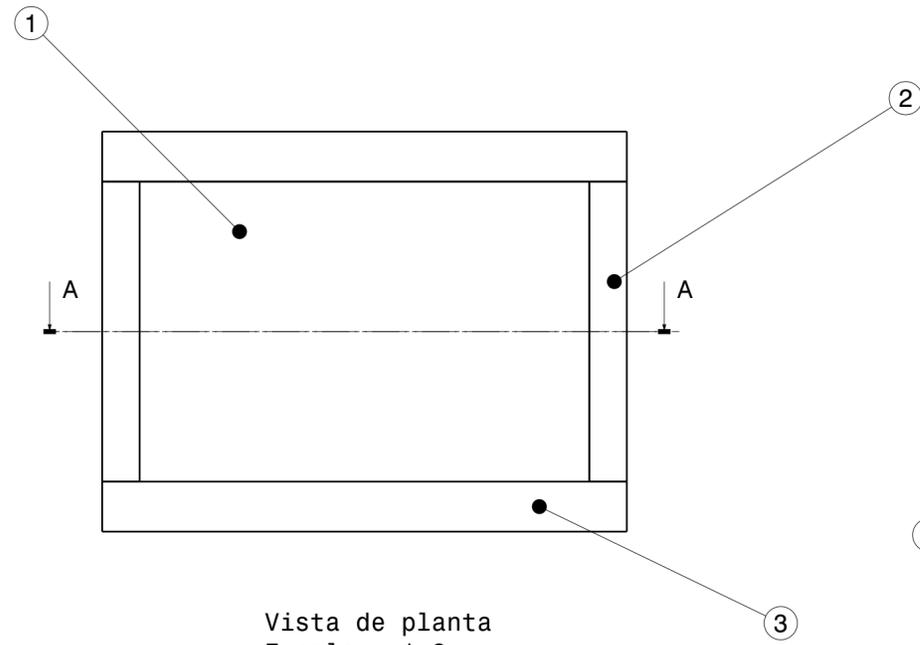
DESIGNED BY: Sergio Rodríguez M. DATE: 25/08/2023		DEPÓSITO DE CAPACIDAD MODULAR PARA IMPRESORA 3D SLA DE CERÁMICAS TÉCNICAS 3D CERAM C900 FLEX	I	-
CHECKED BY:			H	-
DATE:		UNIVERSIDAD DE LEÓN	G	-
SIZE A4			F	-
SCALE 1:2	WEIGHT (kg) 0,43	DRAWING NUMBER BASE 180x120	E	-
			D	-
		SHEET 1 / 1	C	-
			B	-
This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.			A	-



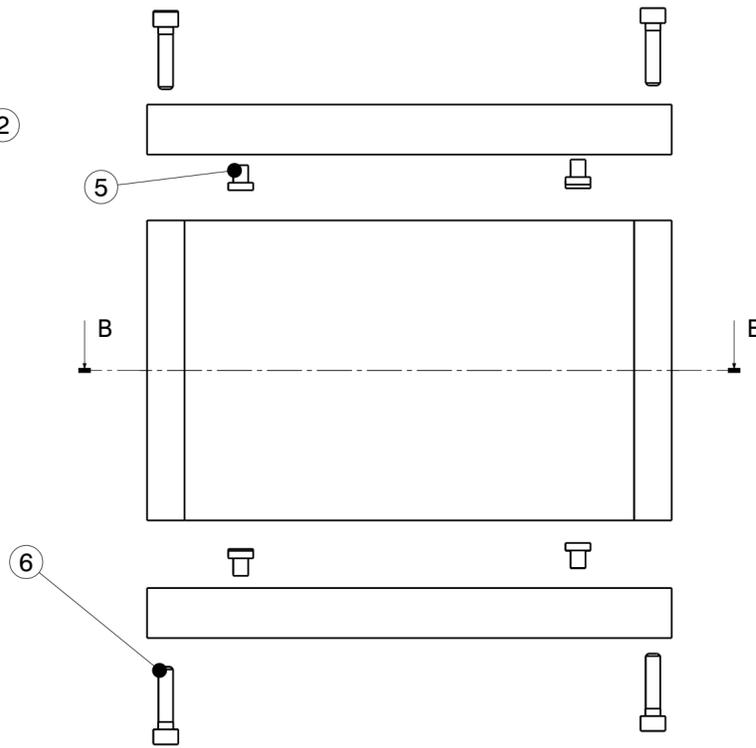
Alzado
Escala: 1:2

Vista de sección A-A
Escala: 1:2

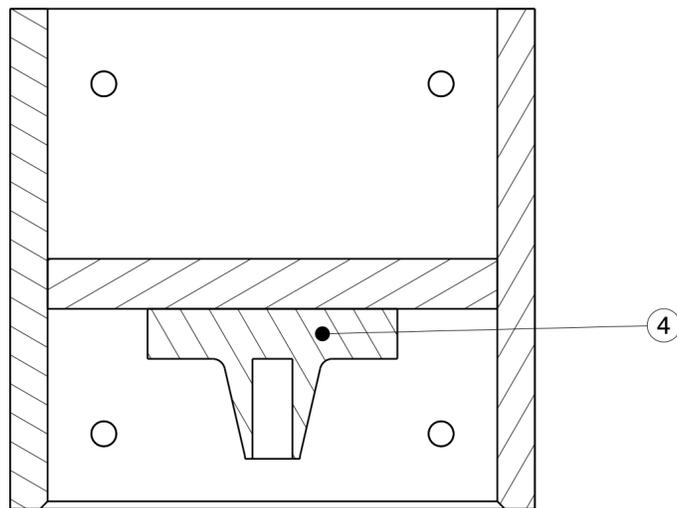
DESIGNED BY: Sergio Rodríguez M, DATE: 25/08/2023		DEPÓSITO DE CAPACIDAD MODULAR PARA IMPRESORA 3D SLA DE CERÁMICAS TÉCNICAS 3D CERAM C900 FLEX	I	-
CHECKED BY:			H	-
DATE:		UNIVERSIDAD DE LEÓN	G	-
SIZE A4			F	-
SCALE 1:2	WEIGHT (kg) 0,29	DRAWING NUMBER BASE 120x120	E	-
This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.		SHEET 1 / 1	D	-
			C	-
			B	-
			A	-



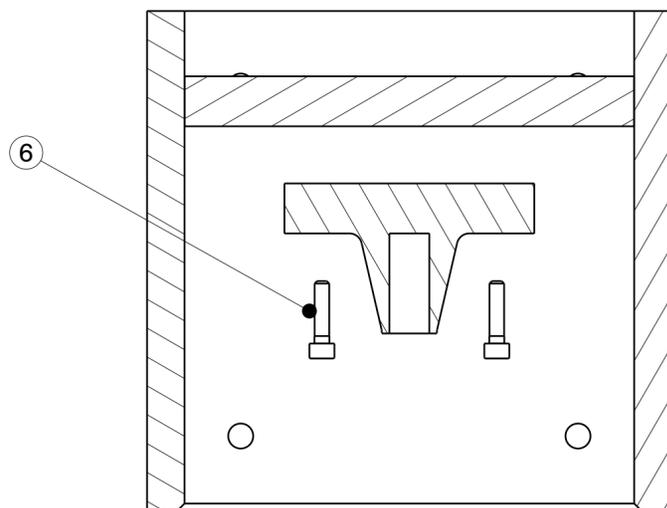
Vista de planta
Escala: 1:2



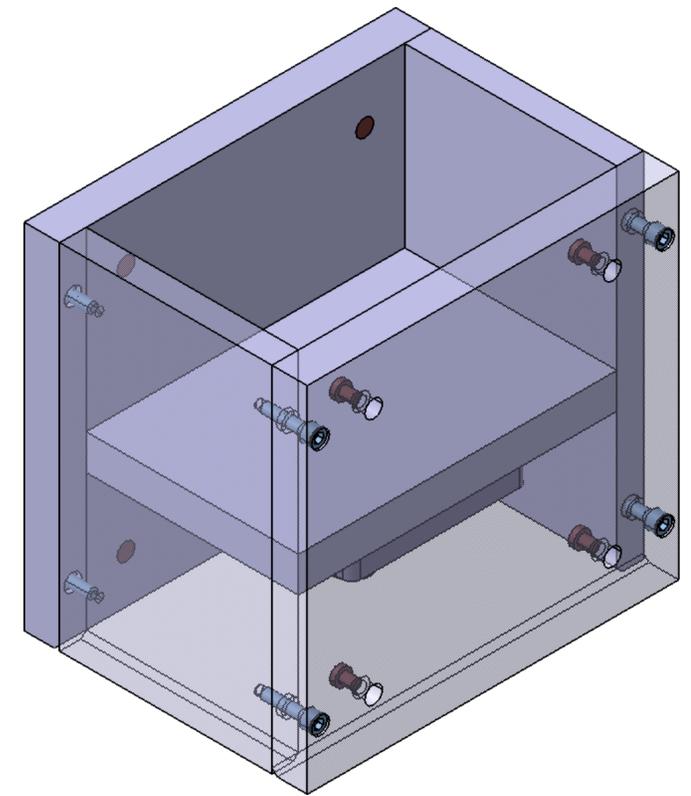
Vista de planta explosionada
Escala: 1:2



Vista de sección A-A
Escala: 1:2



Vista explosionada de sección B-B
Escala: 1:2



Vista isométrica
Escala: 1:2

Lista de materiales

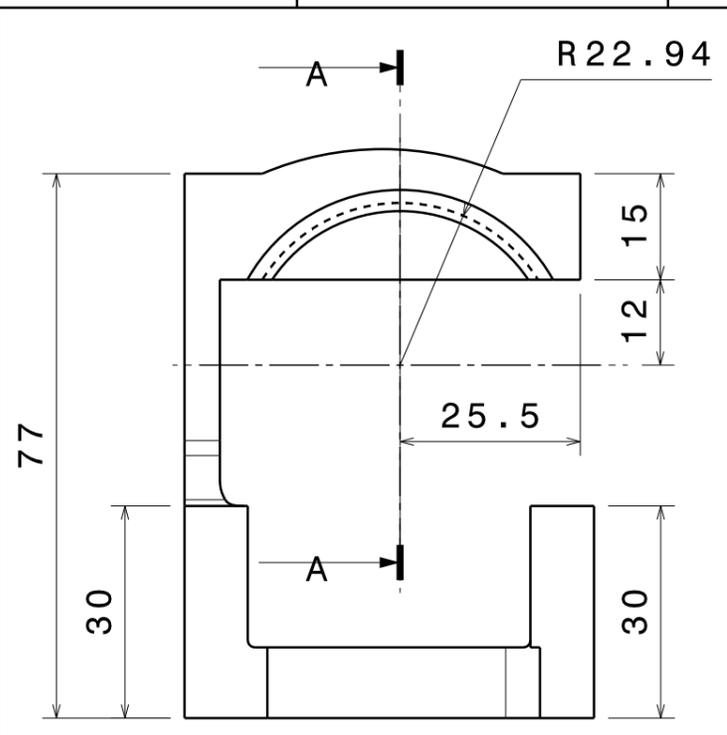
Número	Pieza	Cantidad
1	Base 180x120	1
2	Pared lateral	2
3	Pared frontal	2
4	Adaptador base pistón	1
5	Tapón	8
6	Tornillo M6x25 DIN 912	12

Nota: Lista de materiales parcial, en la configuración del depósito de 180x120mm. Para usar la configuración de 120x120, usar la Base 120x120, con su correspondiente Adaptador base-pistón, y los 4 tornillos M6x25 DIN 912 que los unen.

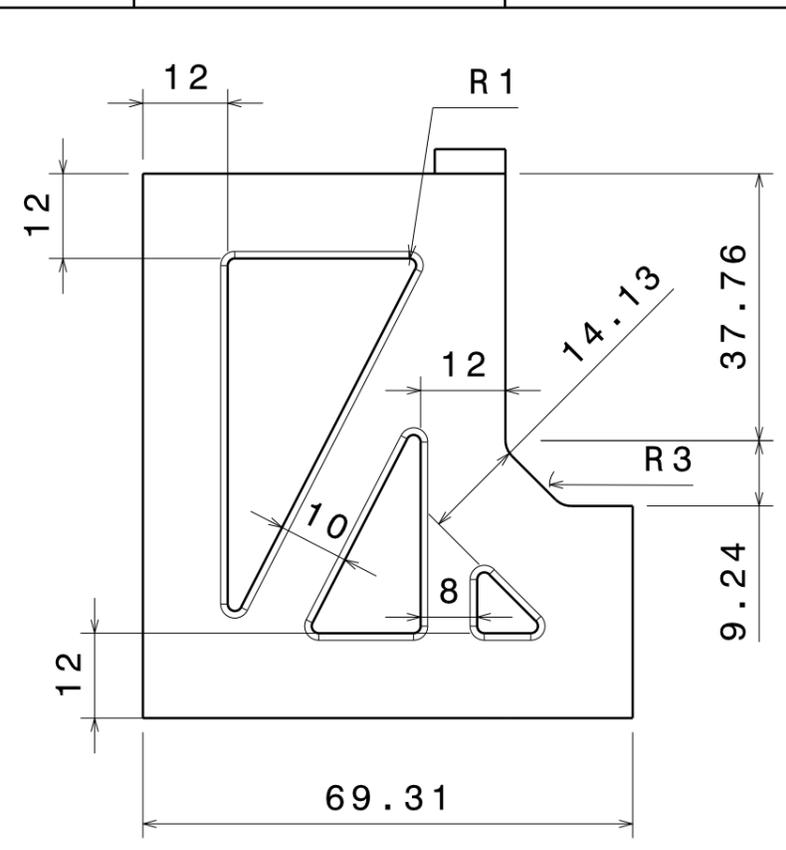
DESIGNED BY: Sergio Rodríguez M.		DEPÓSITO DE CAPACIDAD MODULAR PARA IMPRESORA 3D SLA DE CERÁMICAS TÉCNICAS 3D CERAM C900 FLEX		I	-
DATE: 25/08/2023				H	-
CHECKED BY:		UNIVERSIDAD DE LEÓN		G	-
DATE:				F	-
SIZE: A2		ENSAMBLAJE DE PIEZAS		E	-
SCALE: 1:2	WEIGHT (kg)			D	-
DRAWING NUMBER		SHEET		C	-
		1/1		B	-
This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.				A	-

ANEXO C: PLANO DEL ÚTIL DE SUJECIÓN DE LA PIEZA DE LA PUERTA

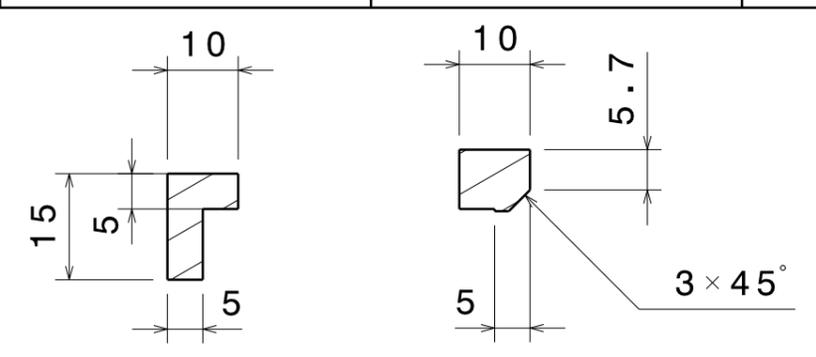
En este anexo se muestra el plano del diseño de la última iteración del útil de sujeción de la pieza de la puerta que se ha fabricado, como se muestra en el apartado 5.2. ÚTIL DE SUJECIÓN PARA LA PIEZA DE LA PUERTA.



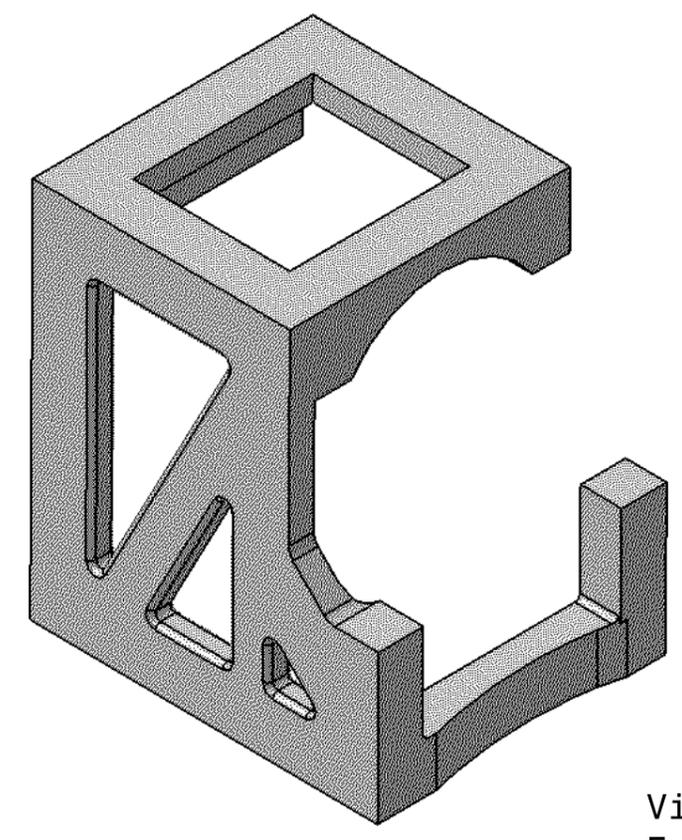
Alzado
Escala: 1:1



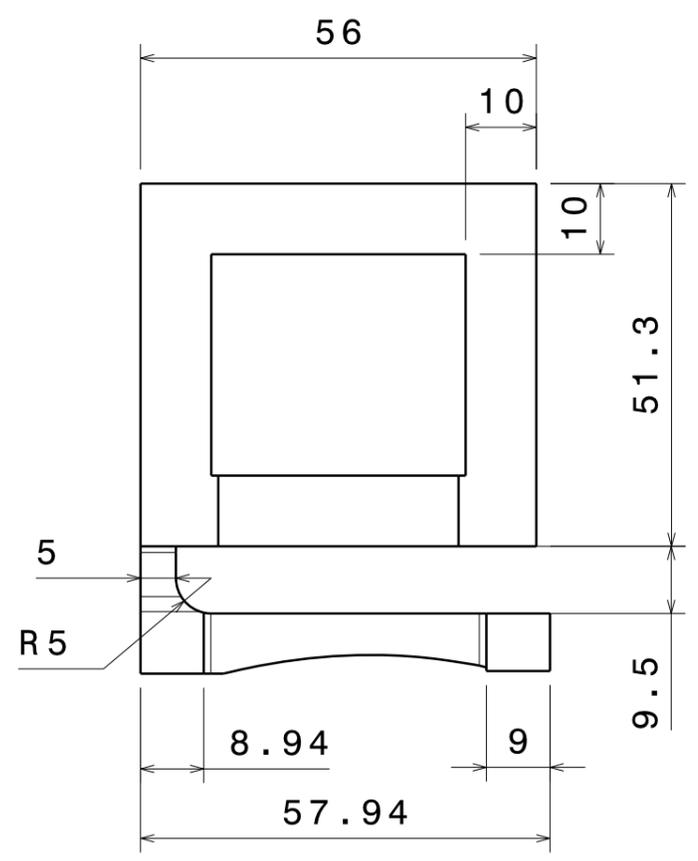
Perfil
Escala: 1:1



Vista de sección A-A:
Escala: 1:1



Vista isométrica
Escala: 1:1



Planta
Escala: 1:1

DESIGNED BY: Sergio Rodríguez M.		ÚTIL PARA LA SUJECCIÓN DE LA PIEZA DE LA PUERTA DEL SISTEMA DE DETECCIÓN DE POSICIÓN DE LA PUERTA DE LA IMPRESORA 3D SLA DE CERÁMICAS TÉCNICAS 3D CERAM C900 FLEX		I	-
DATE: 23/08/2023				H	-
CHECKED BY:		UNIVERSIDAD DE LEÓN		G	-
DATE:				F	-
SIZE A3		ÚTIL DE SUJECCIÓN		E	-
SCALE 1:1				WEIGHT (kg) 0,04	D
DRAWING NUMBER		SHEET		C	-
		1/1		B	-
This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.				A	-