



GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

DISEÑO GENERATIVO DE UN COMPONENTE INDUSTRIAL Y SU FABRICACIÓN MEDIANTE IMPRESIÓN 3D METÁLICA (FDM)

Autor: Mario Mora Jiménez

Director: Mariano Jiménez Calzado

Co-Director: Raúl Cambor Iglesias

Madrid, julio de 2025

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
Diseño generativo de un componente industrial y su aplicación mediante impresión 3D
Metálica (FDM)

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el

curso académico 2024/25 es de mi autoría, original e inédito y

no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos.

El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido

tomada de otros documentos está debidamente referenciada.



Fdo.: Mario Mora Jiménez

Fecha: 22/ 07/ 2025

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO



Fdo.: Mariano Jiménez Calzado

Fecha: 22/ 07/ 2025

EL CODIRECTOR DEL PROYECTO



Fdo.: Raúl Cambor Iglesias

Fecha: 22 / 07 /2025



GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

DISEÑO GENERATIVO DE UN COMPONENTE INDUSTRIAL Y SU FABRICACIÓN MEDIANTE IMPRESIÓN 3D METÁLICA (FDM)

Autor: Mario Mora Jiménez

Director: Mariano Jiménez Calzado

Codirector: Raúl Cambor Iglesias

Madrid, julio 2025

Agradecimientos

Antes de presentar el proyecto, me gustaría repartir mis agradecimientos a todas aquellas personas que han ayudado a que este proyecto fuera realizado.

Agradecer a Mariano Jiménez, director de este proyecto, por proponerme este trabajo, el cual me ha fascinado y él bien sabe que quiero seguir investigando acerca del tema.

A Raúl y Diego, el equipo de *ICAI3D*, por proporcionar la impresora y darme el permiso para adaptarla a mi gusto y por echarme una mano siempre que han podido.

A Rodrigo, compañero del despacho, por acercarse a apoyarme cuando no era capaz de pedir ayuda y por aportar ideas que solventaron más de un quebradero de cabeza.

A Eva, profesora de la universidad, por ayudarme en sus ratos libres a practicar con las probetas y darme las claves para hacer un buen análisis de ellas.

Agradecer a todas aquellas personas, compañeros, profesores o amigos que han mostrado gran interés en mi proyecto y que gracias a sus ánimos se ha podido sacar adelante.

Y, por último, darle las gracias a mi familia, por ser el apoyo que siempre está ahí y que ha tenido que soportar mis altibajos con el proyecto hasta el último minuto.

DISEÑO GENERATIVO DE UN COMPONENTE INDUSTRIAL Y SU FABRICACIÓN MEDIANTE IMPRESIÓN 3D METÁLICA (FDM)

Autor: Mora Jiménez, Mario.

Director: Jiménez Calzado, Mariano.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO

Se ha adaptado una impresora 3D FDM de fabricación propia para producir piezas metálicas en acero inoxidable 17-4PH mediante filamento Ultrafuse. Tras optimizar hardware, firmware y parámetros de impresión, se fabricaron probetas de tracción y componentes funcionales (garras, engranajes y conectores) que, tras desaglomerado y sinterizado, demostraron propiedades mecánicas y dimensionales aptas para su uso en un mecanismo industrial de pinza.

Palabras clave: Fabricación aditiva, impresión 3D metálica, Ultrafuse 17-4 PH, FDM, diseño generativo, optimización topológica, desaglomerado, sinterizado, ICAI3D.

1. Introducción

La fabricación aditiva metálica ha experimentado una expansión notable en los últimos años, tradicionalmente dominada por tecnologías de alto coste como Powder Bed Fusion (PBF) o Direct Energy Deposition (DED). Sin embargo, la aparición de filamentos como Ultrafuse 17-4PH, que combinan polvo de acero inoxidable con aglutinante polimérico, ha abierto la posibilidad de emplear impresoras de tecnología FDM adaptadas para fabricar componentes metálicos a un coste considerablemente menor.

Este proyecto tiene como objetivo validar la viabilidad de la impresión FDM metálica en un contexto académico e industrial, desarrollando un flujo de trabajo que abarque desde el diseño y optimización de componentes hasta su postprocesado y ensayo, utilizando una impresora cartesiana de fabricación propia cedida por el equipo ICAI3D. Las piezas fabricadas permiten evaluar el potencial de esta tecnología para producir piezas estructurales y optimizadas y aplicarlas en usos reales. Entre las piezas a fabricar hay: probetas normalizadas y componentes funcionales de un mecanismo de pinza.

2. Definición del proyecto

Para el correcto desarrollo de este proyecto y lograr los objetivos propuestos, el proyecto se ha dividido en varias fases:

1. **Adaptación y puesta a punto de la impresora FDM metálica**, incorporando un sensor BLTouch para nivelación automática y configurando el firmware Marlin mediante Visual Studio Code.
2. **Diseño y optimización topológica de piezas críticas** (garras y engranajes) mediante Solid Edge y Altair Inspire.
3. **Impresión de probetas de tracción y piezas funcionales con parámetros específicos**: relleno del 105% para probetas, relleno del 50% con patrón giroide para componentes, y un máximo de 3 paredes perimetrales.
4. **Postprocesado térmico** (desaglomerado y sinterizado) en condiciones industriales (Forward AM, BASF).
5. **Ensayos mecánicos y funcionales**, incluyendo tracción en probetas y validación del mecanismo final.

3. Descripción del sistema

Como parte del sistema de trabajo se emplea una impresora 3D cartesiana con perfil inspirado en una impresora Prusa i3 adaptada, equipada con BLTouch y perfil de impresión optimizado en Cura para impresiones con filamentos de polvo metálico.

El filamento en cuestión a usar es el Ultrafuse 17-4 PH, el cual debe pasar tras la impresión por unos procesos de horneado específicos (desaglomerado y sinterizado) para convertir las piezas “verdes” en piezas finales de acero. Se necesitará emplear herramientas de lijado para dar un buen acabado o corregir defectos.

A nivel de software se utilizan distintos tipos:

- VS Code se utiliza como herramienta de código abierto para la actualización funcional de la impresora.
- Ultimaker Cura Slicer es empleado para la correcta parametrización de las impresiones.
- Software de tipo CAD: Herramientas Solid Edge y Altair Inspire para diseño, rediseño y optimización topológica de las piezas.

Para poder desarrollar prototipos y la estructura del mecanismo final a emplear, se emplean la fabricación aditiva de componentes usando tecnologías de impresión del tipo SLA, MJF, FDM y CFR. Para evaluar la compatibilidad y funcionalidad del mecanismo, se combina la tecnología de FDM metálica con algunas de las ya mencionadas anteriormente.

4. Resultados

Por una parte, se imprimieron probetas con distintas orientaciones y configuraciones (relleno y paredes) para evaluar la influencia de la dirección de capas en la resistencia final. Las probetas sinterizadas mostraron contracciones de hasta un 20% en volumen, como era de esperar, y conservaron integridad estructural suficiente para ensayos normalizados de tracción.

Por otro lado, se fabricaron en acero 17-4PH los componentes con más funcionalidad en el sistema, adaptando las geometrías donde fue necesario para evitar el uso de soportes en la impresión. Tras su montaje, el mecanismo operó correctamente, demostrando que es posible integrar piezas FDM metálicas en sistemas funcionales cuando se calibran los parámetros de impresión y diseño.



Ilustración 1: Garras con componentes de FDM Metal

5. Conclusiones

Con este proyecto, queda demostrado que esta tecnología puede aplicarse en aplicaciones reales y que aún está por desarrollarse con más fuerza. Y no solo eso, sino que su coste de producción ha sido de solo 690 € (incluido transporte y horneado) euros mientras que en otras tecnologías con el mismo objetivo se estiman unos 2.125,86 € euros y eso solo con las probetas de ensayo.

A nivel educativo, este proyecto ha ayudado a ampliar el conocimiento de la fabricación aditiva dentro de un ámbito que aún está por crecer: la impresión 3D metálica. Con este nuevo conocimiento, han surgido ganas de seguir investigando y ensayando fuera de los límites pedidos para este estudio. Lo aprendido aquí formará las bases de proyectos más ambiciosos.

GENERATIVE DESIGN OF AN INDUSTRIAL COMPONENT AND ITS MANUFACTURE USING METALLIC 3D PRINTING (FDM)

Author: Mora Jiménez, Mario.

Director: Jiménez Calzado, Mariano.

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

ABSTRACT

An in-house FDM 3D printer has been adapted to produce metal parts in 17-4PH stainless steel using Ultrafuse filament. After optimizing hardware, firmware and printing parameters, tensile specimens and functional components (grippers, gears and connectors) were manufactured which, after deagglomerate and sintering, demonstrated mechanical and dimensional properties suitable for use in an industrial gripper mechanism.

Keywords: Additive manufacturing, metal 3D printing, Ultrafuse 17-4 PH, FDM, generative design, topological optimization, deagglomerate, sintering, ICAI3D.

1. Introduction

Metal additive manufacturing has undergone a remarkable expansion in recent years, traditionally dominated by high-cost technologies such as Powder Bed Fusion (PBF) or Direct Energy Deposition (DED). However, the emergence of filaments such as Ultrafuse 17-4PH, which combines stainless steel powder with polymer binder, has opened up the possibility of using FDM technology printers adapted to manufacture metal components at a considerably lower cost.

This project aims to validate the viability of metal FDM printing in an academic and industrial context, developing a workflow that covers from the design and optimization of components to their post-processing and testing, using a Cartesian printer of our own manufacture provided by the ICAI3D team. The manufactured parts allow the potential of this technology to be evaluated to produce structural and optimized parts and apply them in real applications. Among the parts to be manufactured are standardized specimens and functional components of a gripper mechanism.

2. Project definition

For the correct development of this project and to achieve the proposed objectives, the project has been divided into several phases:

1. **Adaptation and tuning of the metal FDM printer**, incorporating a BLTouch sensor for automatic leveling and configuring the Marlin firmware using Visual Studio Code.
2. **Design and topological optimization of critical parts** (grippers and gears) using Solid Edge and Altair Inspire.
3. **Printing of tensile specimens and functional parts with specific parameters:** 105% infill for specimens, 50% infill with gyroid pattern for components, and a maximum of 3 perimeter walls.
4. **Thermal post-processing** (debonding and sintering) under industrial conditions (Forward AM, BASF).
5. **Mechanical and functional tests**, including traction on specimens and validation of the final mechanism.

3. System Description

As part of the work system, a Cartesian 3D printer with a profile inspired by an adapted Prusa i3 printer is used, equipped with BLTouch and an optimized print profile in Cura for printing with metal powder filaments.

The filament in question to be used is Ultrafuse 17-4 PH, which must go through specific baking processes (debonding and sintering) after printing to convert the "green" parts into final steel parts. Sanding tools will need to be used to give a good finish or correct defects.

At the software level, different types are used:

- VS Code is used as an open-source tool for functional printer upgrade.
- Ultimaker Cura Slicer is used for the correct parameterization of prints.
- CAD-like software: Solid Edge and Altair Inspire tools for design, redesign and topological optimization of parts.

To develop prototypes and the structure of the final mechanism to be used, additive manufacturing of components is used using printing technologies such as SLA, MJF, FDM and CFR. To evaluate the compatibility and functionality of the mechanism, metal FDM technology is combined with some of those already mentioned above.

4. Results

On the one hand, specimens with different orientations and configurations (infill and walls) were printed to evaluate the influence of layer direction on the final strength. The sintered specimens showed contractions of up to 20% in volume, as expected, and retained sufficient structural integrity for standardized tensile tests.

On the other hand, the components with the most functionality in the system were manufactured in 17-4PH steel, adapting the geometries where necessary to avoid the use of supports in printing. After assembly, the mechanism operated correctly, demonstrating that it is possible to integrate metal FDM parts into functional systems when the printing and design parameters are calibrated.



Illustration 1: Grippers with FDM Metal

5. Conclusions

With this project, it is demonstrated that this technology can be applied in real applications and that it is still to be developed more strongly. And not only that, but its production cost has been only x euros while in other technologies with the same objective it is estimated at about Y euros.

On an educational level, this project has helped to expand knowledge of additive manufacturing within a field that is still growing: metal 3D printing. With this new knowledge, the desire to continue researching and testing outside the limits requested for this study has arisen. What you learn here will form the basis for more ambitious projects.

Índice de la memoria

Capítulo 1. Introducción	7
1.1 Motivación del proyecto	7
1.2 Objetivos	8
1.3 Alineación con los objetivos de desarrollo sostenible (ods)	10
Capítulo 2. Estado del Arte	12
2.1 Fabricación aditiva	12
2.2 Impresión 3D metálica	13
2.2.1 Powder Bed Fusion (PBF)	13
2.2.2 Binder Jetting (BJ)	15
2.2.3 Direct Energy Deposition (DED)	16
2.2.4 Fused Deposition Modeling (FDM)	18
2.3 Optimización Topológica	21
Capítulo 3. Metodología	22
3.1 Planificación	22
3.2 Prototipado del Mecanismo	24
3.3 Impresión FDM metálica	26
3.3.1 Puesta en marcha de impresora 3D	26
3.3.2 Probetas	30
3.3.3 Componentes mecanismo y su optimización	31
3.3.4 Desaglomerado y sinterizado	32
3.3.5 Ensayos	33
Capítulo 4. Desarrollo del Trabajo	34
4.1 Actualización de la Impresora	34
4.1.1 Hardware	34
4.1.2 Software	39
4.2 Preparación de un mecanismo	41
4.2.1 Modificación piezas	43
4.2.2 Impresión y montaje de prototipos	45
4.3 Pruebas de impresión metálica	47

4.3.1 Reparación Impresora FDM Metal.....	50
4.3.2 variables impresiones metálicas objetivo.....	54
4.4 Optimización Topológica.....	58
4.4.1 Adaptada a la impresora.....	58
4.4.2 Caso de soportes necesarios.....	61
4.5 Curado de las impresiones.....	64
4.5.1 Postprocesado.....	64
4.5.2 Envío para Desaglomerado y sinterizado.....	65
4.6 Ensayos finales.....	66
4.6.1 Ensayos tracción de probetas.....	66
4.6.2 Montaje del mecanismo.....	69
Capítulo 5. Análisis de Resultados.....	71
5.1 Eficiencia Impresora.....	71
5.2 Valoración de probetas.....	72
5.3 Calidad de componentes finales.....	77
Capítulo 6. Conclusiones.....	82
6.1 Análisis Resultados Proyecto.....	82
6.2 Costes Proyecto.....	83
6.3 Trabajos futuros. Recomendaciones.....	84
Bibliografía.....	85
ANEXO 1. IMPRESORA FDM METAL.....	88
ANEXO 2. CABLEADO PLACA RAMPS v1.4.....	89
ANEXO 3. CARO ENVIO A ELNIK SYSTEMS.....	91
ANEXO 4. COMPARATIVA DE IMPRESIONES.....	95
ANEXO 5. RESOLUCIÓN PROBETAS.....	97
ANEXO 6. CÁLCULOS COSTES IMPRESIONES.....	101
ANEXO 7. COSTE DMLS. XOTERO.....	111

Índice de figuras

Figura 1. Bobina filamento Ultrafuse 17-4 PH.....	8
Figura 2. Logo ODS	10
Figura 3. 8º ODS	11
Figura 4. 9º ODS	11
Figura 5. 12º ODS	11
Figura 6. 17º ODS	11
Figura 7. Metodologías básicas fabricación	12
Figura 8. Representación proceso Power Bed Fusion	14
Figura 9. Pieza resultante de impresión por PBF	14
Figura 10. Representación proceso Binder Jetting	15
Figura 11. Resultado producción en volumen por BJ	16
Figura 12: Representación proceso Direct Energy Deposition	17
Figura 13. Pieza en fase de fabricación mediante proceso DED.....	17
Figura 14. Representación proceso Fused Deposition Modeling.....	18
Figura 15. Piezas finales por FDM Metal (procesada y pulida respectivamente).....	20
Figura 16. Representación visual fases optimización topológica (de arriba a abajo).....	21
Figura 17. Esquema de trabajo seguido en el proyecto	23
Figura 18. Perfil base de una impresora FDM, basada en el modelo Prusa i3	27
Figura 19. Sensor de calibración de superficies de impresión. BLTouch	28
Figura 20. Adhesivo para superficies de impresión con filamentos metálicos. Magigoo ...	29
Figura 21: Representación dirección relleno probetas (azul) frente a esfuerzo tracción (flechas)	30
Figura 22. Diseño probeta de cuello de botella.	31
Figura 23. Representación de la línea de proceso de piezas por FDM Metal	32
Figura 24. Cabezal de extrusión original.....	35
Figura 25. Fallo de diseño de cabezal de extrusión entregado.	35

Figura 26. Cabezal de extrusión rediseñado e instalado en la impresora	36
Figura 27. Representación espacio de altura boquilla/sensor	37
Figura 28. Verificación visual montaje BLTouch. Punta recogida y extendida.....	38
Figura 29. Endstop con palanca.....	38
Figura 30. Conjunto CAD de mecanismo de garras.....	42
Figura 31. Rediseño CAD del sistema de accionamiento de las garras	44
Figura 32. Rediseño CAD de los conectores del mecanismo de garras	44
Figura 33. Evolución CAD del mecanismo de garras original al mecanismo que será fabricado	45
Figura 34. Impresión prototipos con tecnología FDM reforzada.....	46
Figura 35. Prototipo de carcasas impresas por SLA (resina).	47
Figura 36. Tabla con parámetros para imprimir usando filamento Ultrafuse 17-4 PH.....	48
Figura 37. Vista desde pantalla LCD valor de Offset.....	49
Figura 38. Fallo de adherencia en la cama caliente por poco adhesivo.....	50
Figura 39. Cable de alimentación de cama caliente. Despegado y con mala soldadura	51
Figura 40. Error de calibración a media impresión	52
Figura 41. Proceso de reemplazo del anillo de empuje	53
Figura 42. Tabla fabricante Ultrafuse 17-4 PH. Propiedades de relleno en impresion	54
Figura 43. Representación de propiedades de relleno usadas	55
Figura 44. Detalle de piezas conectores de mecanismo de garras.....	56
Figura 45. Perfil impreso en la cremallera de las pinzas	57
Figura 46. Rediseño CAD rueda dientes y conectores.....	58
Figura 47. Pinzas ejemplo. Pinzas paralelas Serie GH6000.....	59
Figura 48. Inicio y final de optimización topológica de garras por diseño generativo en Solid Edge	60
Figura 49. Pieza impresa en FDM Metal en estado “verde” con soportes.....	61
Figura 50. Pieza “verde” con interfaz en soportes y pieza “gris” ya sin interfaz y soportes separados	62
Figura 51. Diseño CAD pieza con base de apoyo junto a su resultado final.	63
Figura 52. Aparición defecto por falta de contacto con la superficie.....	64

Figura 53. Logo Elnik Systems	65
Figura 54. Gráfica temperatura/tiempo en ciclo de sinterización.....	66
Figura 55. Máquina de ensayo. Ibertest.....	67
Figura 56. Acotación dimensional de probeta diseñada a partir de la norma ASTM E8/E8M	69
Figura 57. Visualización fallo en pinzas (normal y optimizada) tras sinterización	70
Figura 58. Pinza optimizada recién impresa.....	71
Figura 59. Comparativa de impresión con errores e impresión corregida (de izquierda a derecha)	72
Figura 60. Gráfica de ensayos tracción más favorable de cada categoría de probeta	73
Figura 61. Tabla de ensayos tracción con Ultrafuse 17-4 PH según fabricante.....	74
Figura 62. Gráfico de barras resultados resistencia a tracción. Probetas “gris” y “verde” .	76
Figura 63. Gráfico de barras resultados módulo de Young. Probetas “gris” y “verde”	76
Figura 64. Gráfico de barras resultados deformación máxima. Probetas “gris” y “verde”.	77
Figura 65. Mecanismo de garras final con partes fabricadas con tecnología FDM Metálica	80
Figura 66. Modelo experimento soporte sinterizado y limpiado.....	81
Figura 67. Comparativa modelo por FDM Metal (parte superior) con modelo por fundición	81

Índice de tablas

Tabla 1. Metales comerciables en filamento para FDM Metal. The Virtual Foundry	19
Tabla 2. Valoración de posibles mecanismos a fabricar	24
Tabla 3. Listado de recursos para realización del proyecto.....	29
Tabla 4. Componentes que forman el mecanismo de pinzas original	43
Tabla 5. Variación peso de probeta verde a probeta gris.....	73
Tabla 6. Tabla de resultados de los ensayos de tracción. Media y desviación típica	74

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

Desde su aparición, la fabricación aditiva ha ido ganando cada vez más protagonismo en la industria y está evolucionando exponencialmente con el paso de los años. Gracias a los procesos de impresión en 3D, se están consiguiendo diseñar y fabricar modelos con geometrías que son inimaginables de conseguir empleando los métodos tradicionales de fabricación. Las limitaciones de este tipo de tecnología son pocas y cada vez son menos con la gran variedad de elementos materiales con los que puede trabajar. Desde hace unos años, la creación de piezas metálicas ha pasado a ser una realidad dentro de este campo de trabajo. En este proyecto, se estudiará el alcance que puede tener la impresión 3D de componentes metálicos a través de un proceso de deposición de hilo. Para ello, se trabajará con una impresora de tecnología FDM (Fuse Deposition Modeling) fabricada en el centro universitario por el equipo de ICAI3D. Dicha impresora, será revisada, configurada y adaptada para su correcto funcionamiento y la obtención de un componente de aplicación industrial. Una vez se haya obtenido el componente y se hayan hecho los ensayos necesarios para justificar o caracterizar su comportamiento, se procederá a la optimización topológica del mismo, permitiendo así un estudio más profundo de los alcances posibles de la impresión 3D metálica.

1.1 MOTIVACIÓN DEL PROYECTO

A medida que pasa el tiempo, se va acentuando cada vez más la presencia de la impresión 3D en una gran variedad de sectores: industrial, aeroespacial, sanitario, moda, entretenimiento e incluso alimentación.

Antes esta técnica era prácticamente considerada ciencia ficción y estaba al alcance de unos pocos afortunados. Ahora la accesibilidad es mucho mayor y permite gran libertad de diseño.

Constantemente se incorporan nuevos materiales al mercado con los que poder moldear todo tipo de componentes complejos. Los metales tienen cada vez más importancia en este proceso por sus propiedades físicas superiores y gracias a los avances más recientes se

pueden obtener piezas de este material por uno de los procesos de impresión más sencillos y básicos, por FDM.



Figura 1. Bobina filamento Ultrafuse 17-4 PH. Filament2Print

Con este trabajo, se pretende estudiar las limitaciones de la impresión metálica 3D por deposición de filamento utilizando uno de los filamentos compuestos más recientes en el mercado, el Ultrafuse 17-4PH, que combina un polímero aglutinante con un acero.

La complejidad de usar este tipo de filamento es el postproceso que lleva, que no lo hace tan directo como en un proceso de impresión por filamento termoplástico. La pieza que se imprime es conocida como “pieza verde”, que deberá posteriormente pasar un proceso de desaglomerado y sinterización, para así poder obtener una pieza final hecha de acero inoxidable. Será interesante experimentar hasta donde llegan las limitaciones de la impresora 3D y poder analizar las variaciones que sufren los componentes impresos una vez se halla cumplido el postprocesado.

Entre otros intereses de este estudio, es importante poder comparar la pieza impresa en relación con otros materiales y técnicas de fabricación aditiva.

Una vez hecho los análisis básicos y se haya visto el funcionamiento de la impresora, sería turno de llevar la funcionalidad de la impresora 3D a su límite y tratar de imprimir topológicamente las piezas diseñadas en este estudio.

1.2 OBJETIVOS

La conclusión del proyecto es poder obtener una pieza de aplicación industrial impresa en metal y poder imprimir su versión optimizada topológicamente. Para ello, se deben de cumplir toda una serie de objetivos:

Caracterización y optimización de la impresora 3D.

Poder preparar la impresora para que dé un correcto funcionamiento y pueda imprimir componentes con una calidad aceptable. Debe de modificarse parte del hardware para poder instalar un sensor de calibrado. También deberá actualizarse el software para garantizar un buen rendimiento.

Fabricación del mecanismo al que incorporar las piezas impresas en metal.

Dejar preparado una serie de componentes producidos por otras tecnologías distintas al estudio para poder montar un mecanismo funcional. La finalidad de ello será poder reemplazar uno de esos componentes por su homólogo impreso en acero y así poder demostrar que el mecanismo mantiene su funcionalidad.

Caracterización mecánica de probetas impresas con Ultrafuse 17-4 PH.

Imprimir unas probetas utilizando el filamento de estudio para realizar unos ensayos de tracción y hacer las siguientes comparativas:

- Análisis dimensional de probetas antes y después del postprocesado.
- Comparación de ensayos realizados con la ficha técnica del Ultrafuse 17-4 PH.
- Comparación de los ensayos realizados con ensayos de probetas obtenidas de láminas del mismo metal que forma el filamento compuesto.

Caracterización de las piezas mecánicas impresas con Ultrafuse 17-4 PH

Imprimir los componentes que queremos reemplazar en el mecanismo usando el filamento y la impresora del estudio. Se deberán sacar conclusiones de las dimensiones, márgenes de tolerancia y posibles variaciones de impresión que puedan resultar beneficiosas.

Validación de la optimización topológica de las piezas mecánicas

Simular el componente que se ha estudiado para hacer su rediseño mediante optimización topológica. Se imprimirá dicho componente optimizado si las características de la impresora así lo permiten.

Naturalmente, con este proyecto también se busca unos objetivos más personales, como ampliar el conocimiento de las tecnologías de fabricación aditiva y poder poner en práctica los conceptos aprendidos en la carrera para poder realizar el correcto desarrollo del trabajo fin de grado.

1.3 ALINEACIÓN CON LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE (ODS)

El 25 de septiembre de 2015, los líderes mundiales adoptaron un conjunto de objetivos globales para erradicar la pobreza, proteger el planeta y asegurar la prosperidad para todos como parte de una nueva agenda de desarrollo sostenible. Cada objetivo tiene metas específicas que deben alcanzarse en los próximos 15 años. [1]



Figura 2. Logo ODS. [1]

Este trabajo fin de grado debe estar encaminado al cumplimiento de algunos ODSs en específico. A continuación, se indicarán los ODSs alineados con el proyecto y su contribución a los mismos.



Figura 3. 8º ODS[2]

Se promueve la innovación tecnológica en la fabricación aditiva, pudiendo incorporarse nuevos puestos especializados en diseño y optimización de procesos en áreas de ingeniería e investigación.

Los componentes generados a partir de metales, dada su aplicación industrial, fomentan empleo de calidad y alimenta la competitividad económica en sectores claves facilitando así un crecimiento económico sostenible.



Figura 4. 9º ODS[3]

El estudio de la impresión 3D metálica está enfocado en el uso de métodos de fabricación innovadores, impulsando así la industrialización sostenible y dando lugar al desarrollo de infraestructuras tecnológicas resilientes y avanzadas.

Asimismo, se separan más los límites de lo que es posible fabricar gracias a la innovación en diseño y producción que ofrece la optimización topológica y el uso de nuevos materiales.



Figura 5. 12º ODS[4]

Los desechos generados por la fabricación generativa son insignificantes si se compara con otros métodos de fabricación tradicionales. Se incluye a esto que la optimización topológica reduce aún más el material usado para un componente sin comprometer su funcionalidad.

Con todo esto, se está apuntando al desarrollo de modelos de producción responsables y sostenibles con el medio ambiente.



Figura 6. 17º ODS[5]

Las tecnologías de fabricación aditiva son un buen modelo replicable que puede adaptarse en otras regiones y así ampliar su impacto global.

Un enfoque colaborativo con entidades dedicadas a la fabricación aditiva y la correcta repartición e intercambio de recursos, conocimientos y tecnología podrá establecer alianzas estratégicas beneficiosas para la investigación y la innovación.

Capítulo 2. ESTADO DEL ARTE

El desarrollo de este trabajo va orientado a obtener resultados dentro del ámbito de la fabricación aditiva metálica. En este capítulo, ante la idea de este proyecto, se ofrece una visión general del estado actual de las técnicas de impresión 3D para metales, prestando también atención a las herramientas de optimización topológica, para un rediseño eficiente de piezas a obtener.

2.1 FABRICACIÓN ADITIVA

La fabricación aditiva, también conocida como impresión 3D, se puede definir como el proceso de unión de materiales para fabricar piezas a partir de datos de modelos 3D hechos por computación (CAD), generalmente capa sobre capa, suponiendo una diferencia de las metodologías de fabricación sustractiva y formativa. Con este proceso se pueden manufacturar geometrías complejas con un bajo coste de fabricación y una significativa reducción de desperdicio de materia usada. [6]

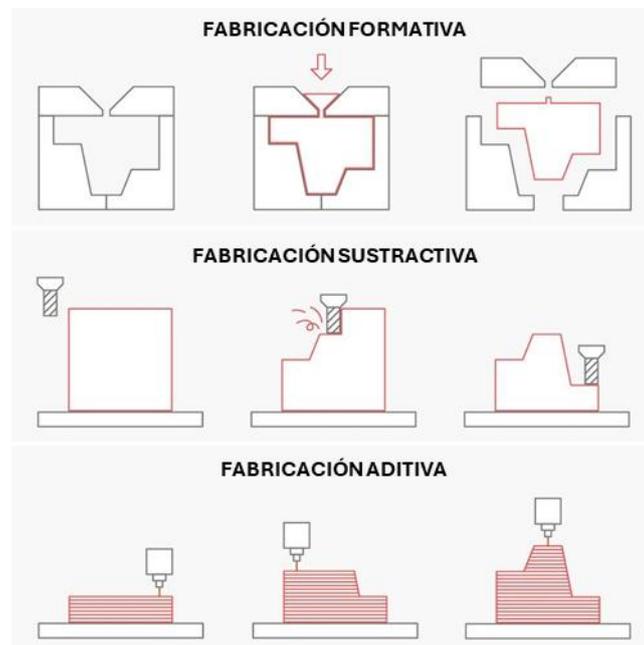


Figura 7. Metodologías básicas fabricación[7]

2.2 IMPRESIÓN 3D METÁLICA

La obtención de piezas metálicas es muy común en la fabricación aditiva. Aun así, este proceso presenta una serie de complicaciones y claras distinciones respecto a la fabricación aditiva de polímeros. [8]

El estudio de la fabricación aditiva metálica lleva más de dos décadas de dedicación, destacando las siguientes técnicas como las más empleadas en la industria:

- **Powder bed fusion (PBF)**: fusión directa de material metálico en forma de polvo por medio de una fuente de energía de alta potencia.
- **Binder Jetting (BJ)**: inyección de un adhesivo líquido, aglutinante, sobre una plataforma en la que se encuentra el metal en forma de polvo.
- **Direct energy deposition (DED)**: deposición del material por medio de un cabezal móvil y su simultánea fusión sobre la pieza.

Por otra parte, existe otro procedimiento que, a diferencia de los tres ya presentados, supone un coste de producción relativamente bajo y es fácil de operar, conocido como **Fuse Deposition Modeling (FDM)**. Es el procedimiento más idóneo para este proyecto.

2.2.1 POWDER BED FUSION (PBF)

Considera como uno de los procesos más consolidados y precisos de la fabricación aditiva metálica, su funcionamiento está basado principalmente en la fusión selectiva de finas capas de polvo metálico. Para ello, esta técnica usa una fuente de energía de alta densidad que funde capa a capa el polvo depositado sobre una plataforma.

En este proceso, un rodillo extiende uniformemente una lámina de polvo sobre la superficie de impresión. Este polvo es previamente calentado a una temperatura cercana a su punto de fusión para así facilitar el trabajo de la fuente de energía. Una vez fundida la capa, la plataforma descenderá ligeramente para que se pueda superponer la siguiente lamina de polvo y seguirá descendiendo hasta completar todas las capas que darán lugar a una pieza final. [9]

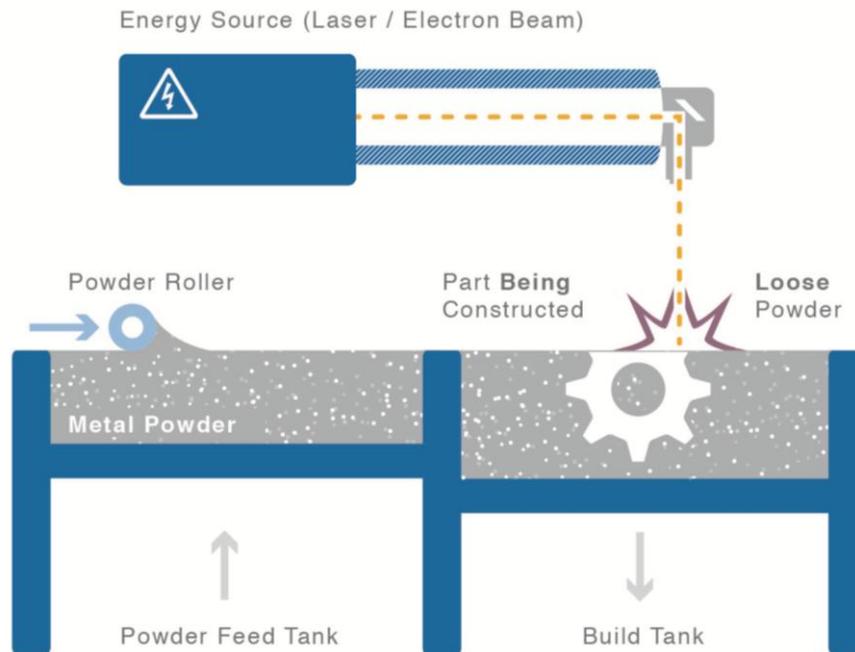


Figura 8. Representación proceso Powder Bed Fusion[10]

Existe una clasificación de variantes de este proceso dependiendo del tipo de fuente de energía empleada:

- Con **láser de alta potencia** focalizado mediante sistemas ópticos se encuentran los procesos **SLM (Selective Laser Melting)** y **DMLS (Direct Metal Laser Sintering)**.
- Con **haz de electrones** a través de una cámara de vacío y empleando lentes electromagnéticas, aparece el proceso de **EBM (Electron Beam Melting)**.

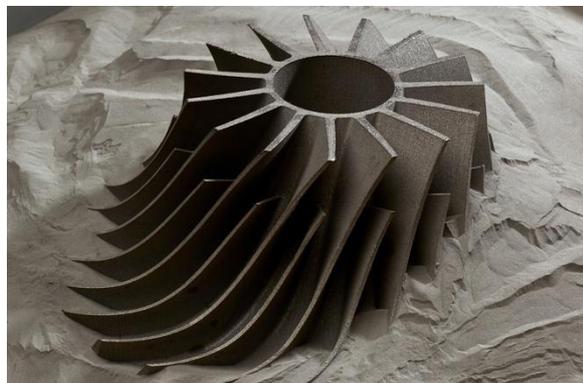


Figura 9. Pieza resultante de impresión por PBF[11]

- **VENTAJAS:** Alta resolución y precisión dimensional. Piezas con buena densidad. Buenas propiedades mecánicas. Geometrías complejas sin soporte externo.
- **DESVENTAJAS:** Elevado coste de equipos y mantenimiento. Lenta productividad. Requiere atmósfera inerte o vacío. Superficie rugosa, requiere postprocesado. Limitación en volumen de construcción.

2.2.2 BINDER JETTING (BJ)

Con esta técnica se obtienen piezas metálicas por inyección selectiva de un aglutinante líquido sobre un lecho de polvo metálico. Al igual que el anteriormente mencionado Powder Bed Fusion (PBF), su proceso se lleva a cabo sobre una plataforma que va descendiendo a medida que se le van superponiendo láminas de polvo una tras otra. El cabezal de impresión proyecta sobre las láminas de polvo partículas de un adhesivo que unirá aquellas zonas de la capa que formen parte de la pieza final.[12]

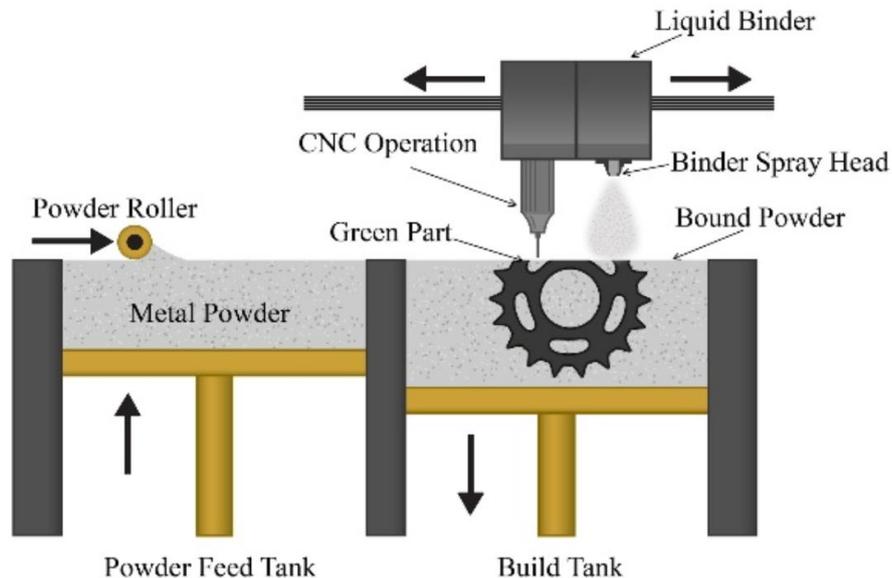


Figura 10. Representación proceso Binder Jetting[13]

La pieza resultante de esta impresión se categoriza como pieza “verde”, lo que denota que aún no está terminada, ya que no se ha obtenido una pieza metálica, sino un conglomerado entre aglutinante y polvo de acero. Para poder retirar ese aglutinante y poder obtener una

pieza metálica compacta, la pieza se tiene que someter a unos procesos de horneado conocidos como desaglomerado y sinterizado, que someterán a la pieza a un cambio dimensional, por lo que se considera un paso crítico en la obtención final.



Figura 11. Resultado producción en volumen por BJ[14]

- **VENTAJAS:** Alta velocidad de impresión. Costo más bajo (comparado con PBF). Apto para producción en volumen. No utiliza fuentes de energía de alta densidad (menor complejidad técnica). Opera a temperatura ambiente.
- **DESVANTAJAS:** Baja densidad tras impresión (requiere sinterizado). Contracción dimensional significativa tras postprocesado. Propiedades mecánicas menores frente a PBF. Requiere postprocesos críticos (curado, desaglomerado, sinterizado). Baja resistencia de la pieza "verde".

2.2.3 DIRECT ENERGY DEPOSITION (DED)

Esta tecnología se asemeja a un proceso de soldadura automatizada, ya que permite la alimentación directa de material metálico. A través de distintos cabezales, el material es extruido y a medida que se funde se deposita sobre la zona de trabajo. Este proceso supone un gran cambio respecto a las tecnologías de lecho de polvo previamente mencionadas. Para poder fusionar las distintas partes de la pieza que se forma, se utiliza una fuente de energía concentrada, que puede ser:[15]

- Láser (**L-DED**)
- Haz de electrones (**EB-DED**)

- Arco eléctrico (WAAM, Wire Arc Additive Manufacturing)

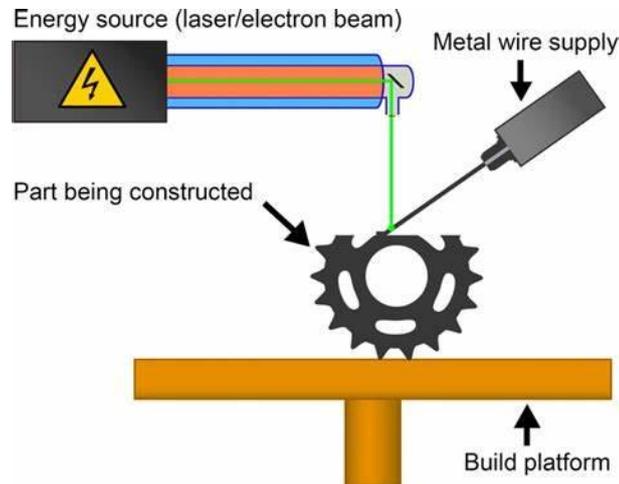


Figura 12: Representación proceso Direct Energy Deposition. [16]

- **VENTAJAS:** Permite reparación y reconstrucción de piezas. Puede fabricar grandes volúmenes (estructuras grandes). No necesita cámara cerrada (flexibilidad). Compatible con hilo o polvo metálico. Integrable con máquinas CNC (DED híbrido) para correcto acabado.
- **DESVENTAJAS:** Baja resolución y precisión. Requiere mecanizado posterior. Coste alto de equipos y operación. Superficie muy rugosa. Limitado a geometrías simples.

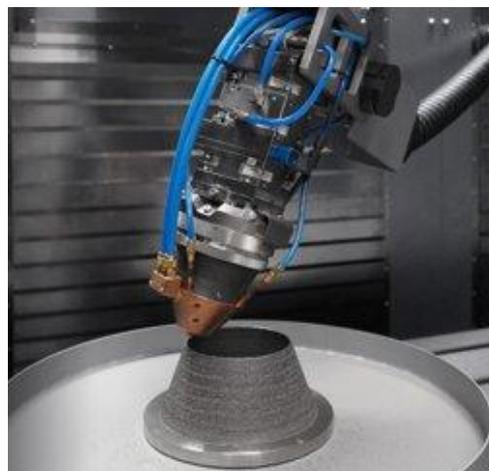


Figura 13. Pieza en fase de fabricación mediante proceso DED[17]

2.2.4 FUSED DEPOSITION MODELING (FDM)

Es una de las tecnologías más extendidas en el ámbito de la fabricación aditiva. La gran mayoría de impresoras para particulares son de este tipo.

Con este procedimiento, el material, recogido en una bobina como filamento, fluye a través de un extrusor móvil que va creando capas transversales de la pieza sobre una superficie caliente.

Una de las ventajas significativas del proceso FDM es la posibilidad de poder imprimir componentes de geometría complicada usando todo tipo de filamentos, no solo termoplásticos sino también filamentos compuestos combinando metal con polímero para poder imprimir piezas metálicas con cualquier impresora de características básicas de impresión FDM. Aun así, obtener buenas piezas metálicas utilizando esta técnica supone todo un reto.

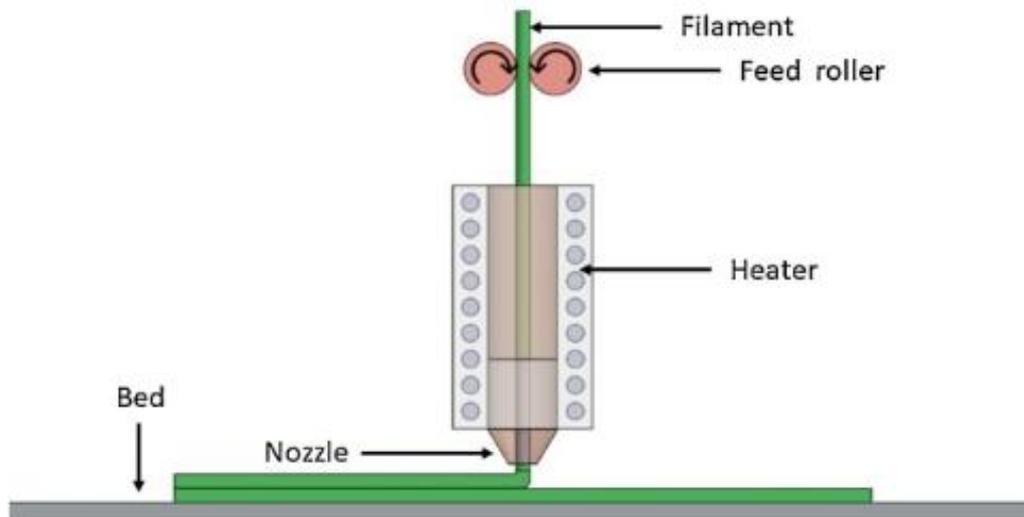


Figura 14. Representación proceso Fused Deposition Modeling [18]

Actualmente, existen en el mercado distintos filamentos para impresión FDM metálica, filamentos que están adaptados para poder imprimirse con cualquier impresora de uso convencional o adaptada mínimamente. Como se ha mencionado anteriormente, el material que se imprime es un compuesto entre metal y polímero, pero para ser más concretos, son materiales formados por polvo metálico en un 80-90% de su peso respecto a un polímero aglutinante que facilita recoger esas partículas metálicas en forma de filamento enrollado en una bobina.

Dado que se está trabajando con polvo metálico, ya hay a la venta disponible toda una gama de bobinas de distintos metales que se pueden imprimir usando esta tecnología. Estos metales son:

<i>METALES DISPONIBLES EN FDM</i>
ALUMINIO 6061
BRONCE
COBRE
ACERO DE ALTO CARBONO
INCONEL 718
ACERO M300
TUNGSTENO
ACERO INOXIDABLE 17-4 PH
ACERO INOXIDABLE 316L
TITANIO 64-5

Tabla 1. Metales comerciables en filamento para FDM Metal. The Virtual Foundry

Al ser filamentos compuestos, el proceso por FDM no termina con la impresión, las piezas obtenidas deben pasar por dos etapas fundamentales, las cuales, ya se mencionaron anteriormente por ser necesarias en el proceso de BJ (Binder Jetting):

- **Desaglomerado:** consiste en la eliminación de la parte polimérica que actúa como aglutinante en la pieza. Dicho tratamiento se puede llevar a cabo mediante:
 - Disolución química (baños de disolvente)
 - Tratamiento térmico controlado (pirólisis en atmosfera inerte)

- **Sinterizado:** horneado a temperatura elevada y controlada según el metal empleado. Con este proceso se reduce la porosidad de la pieza y se consolida la estructura metálica final.

Al finalizar la última etapa, se obtiene una pieza densa, completamente metálica y con propiedades mecánicas cercanas a las del material original (el metal en cuestión).

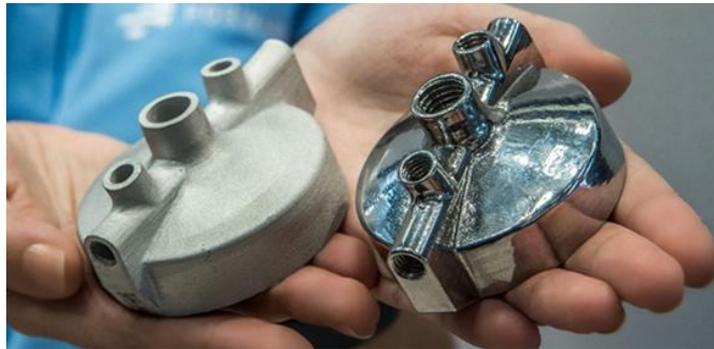


Figura 15. Piezas finales por FDM Metal (procesada y pulida respectivamente) Forward AM

- **VENTAJAS:** Accesible a gran variedad de impresoras FDM convencionales. Más económica que el resto de las tecnologías de impresión metálica. Bueno con geometrías complejas. Versátil para producción bajo demanda o series cortas.
- **DESVENTAJAS:** Necesario postprocesado. Tras sinterización las piezas se comprimen un 20% y pueden deformarse. Porosidad residual. Acabado rugoso.

La impresión FDM metálica llama cada vez más la atención de empresas y aficionados por su bajo coste, pero aún debe mejorar en su relación calidad-precio. Es por eso por lo que ahora debe afrontar los siguientes retos:

- **Mejora del postprocesado:** ahora mismo supone un paso complejo y crítico. Cualquier fallo en el desaglomerado o sinterizado podría provocar grietas, deformaciones o pérdida de propiedades mecánicas.
- **Evitar contracciones, deformaciones o porosidad interna:** durante el sinterizado, aunque este proceso se realice con precisión, las piezas pueden reducirse hasta un

20% y con ello podrían aparecer los defectos mencionados. Habrá que tener en cuenta compensaciones precisas en el diseño de los elementos impresos.

- **Reducción de porcentaje de relleno:** Reducir el relleno interno es uno de los objetivos más deseados, sin embargo, una baja densidad superficial puede comprometer la densidad estructural durante el postprocesado en la fase de sinterizado. Por ello, en la mayoría de los casos los rellenos se deben mantener al 100 %, lo que, contradictoriamente, limita la eficacia del proceso.

2.3 OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA

La producción de una pieza en la fabricación aditiva es posible gracias a softwares que permiten el diseño 3D de las mismas. En ocasiones, utilizando las herramientas facilitadas por estos softwares, no solo se puede diseñar una pieza, también puede optimizarse su diseño.

Como ya se ha mencionado en varias ocasiones, uno de los beneficios principales de la impresión 3D es la posibilidad de obtener geometrías imposibles y un buen ejemplo de ello es la obtención de formas orgánicas. Con la optimización topológica, la geometría base del componente diseñado será automáticamente recalculada para tener un aspecto más orgánico, con un diseño que sería prácticamente imposible de replicar de forma manual. Este rediseño no tiene una finalidad estética, sino funcional, pues permitirá reducir significativamente la masa del componente sin modificar las propiedades mecánicas que debe cumplir. [19]

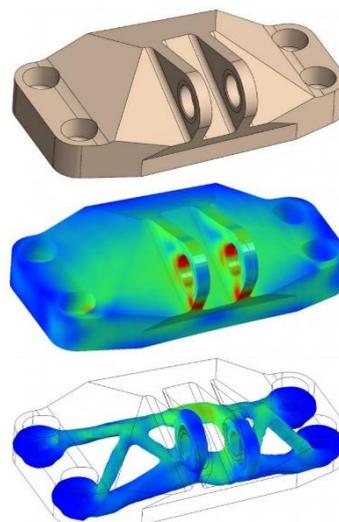


Figura 16. Representación visual fases optimización topológica (de arriba a abajo)[20]

Capítulo 3. METODOLOGÍA

Para asegurar el correcto desarrollo del proyecto y tratar de cumplir los objetivos propuestos, se ha establecido un plan de trabajo totalmente guiado.

3.1 PLANIFICACIÓN

El trabajo se inicia partido en dos frentes abiertos: por un lado, la preparación de la impresora, donde se actualiza todos los elementos necesarios y se prueba la impresión y ensayo de probetas para comprobar su funcionamiento; por otra parte, el modelado del componente de aplicación industrial, donde se prepara un mecanismo completo para su demostración y del cual se reemplaza uno de sus componentes para ser caracterizado y utilizado de estudio para optimizar topológicamente.

Una vez preparadas la impresora 3D y el modelo del componente, este último se imprimirá, se ensayará y se sacarán las conclusiones pertinentes de los resultados obtenidos.

Con este sistema se pretende conseguir un flujo de trabajo asequible, constante y bien organizado.

A continuación, se mostrará el esquema de trabajo a seguir, ya mencionado anteriormente, representado en la figura 17.

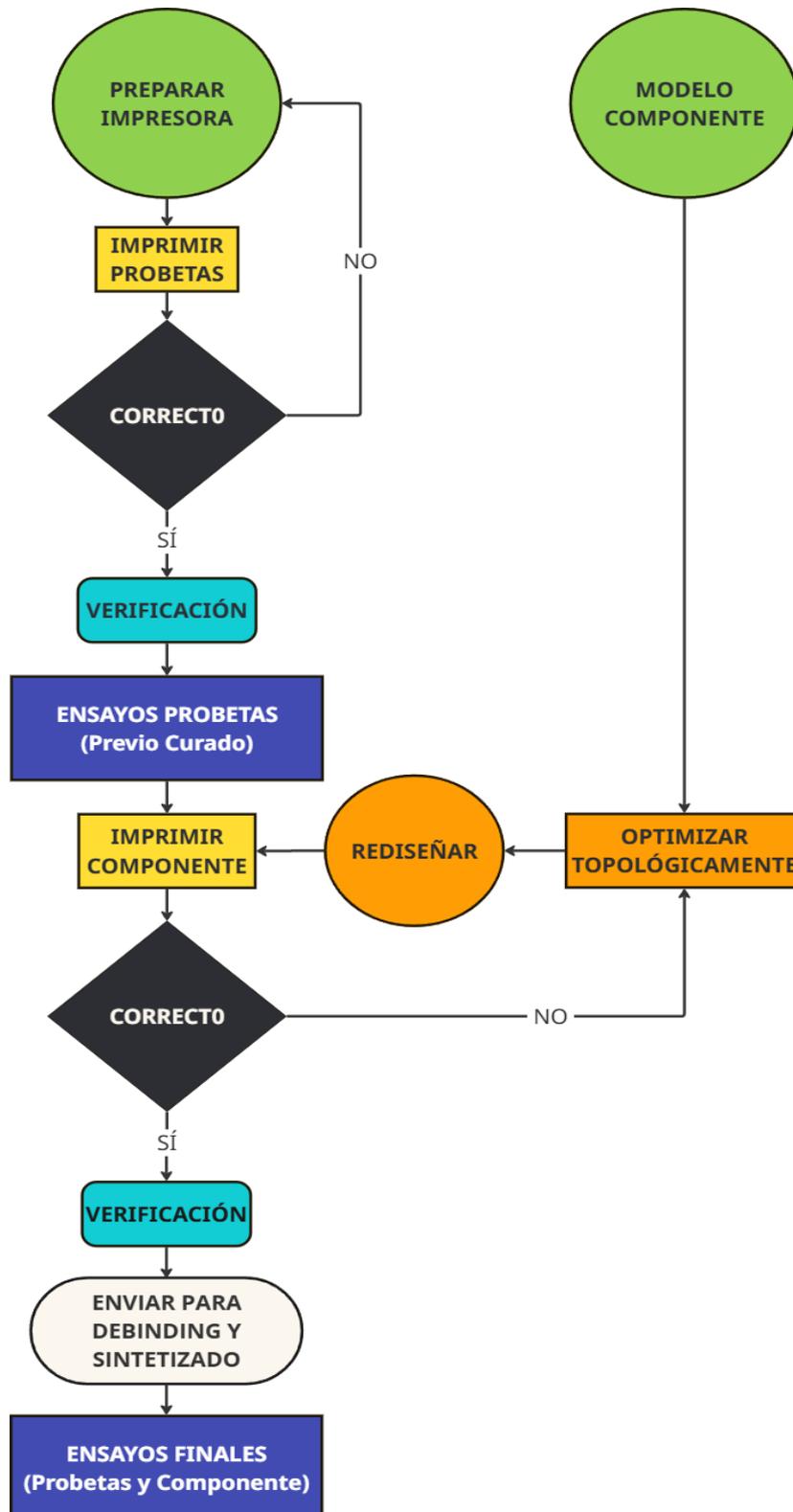


Figura 17. Esquema de trabajo seguido en el proyecto

3.2 *PROTOTIPADO DEL MECANISMO*

Para poder demostrar la calidad de la tecnología FDM metálica utilizada en el proyecto, se hace necesaria la búsqueda y fabricación de un mecanismo que pueda asemejarse a un componente industrial de uso real.

El mecanismo por emplear debe permitir evaluar lo siguiente:

- **Esfuerzos reales:** no se busca decorar, se debe de cumplir un valor funcional que permita a los componentes impresos tener una capacidad mecánica completa.
- **Movilidad:** Al ser un mecanismo, el contacto y transmisión de movimiento entre componentes se hace algo necesario. Con ello, se puede comprobar la precisión dimensional (analizar tolerancias) y la suavidad de los movimientos.
- **Geometrías intrigadas:** se debe permitir a la impresora imprimir piezas complejas para así desafiar la calidad de sus resultados.

En la tabla 2, se analiza los posibles mecanismos a crear para el estudio.

<i>MECANISMO</i>	<i>EVALUACIÓN</i>
Caja de engranajes (rectos o planetarios)	Alineación, precisión geométrica, resistencia a desgaste en los dientes
Sistema piñón-cremallera lineal	Desgaste por fricción, transmisión de fuerza lineal y precisión funcional
Pinza con cremallera-engranaje	Transmisión de fuerza, carga combinada (flexión, tracción) y precisión funcional
Engranajes cónicos o helicoidales	Complejidad geométrica, alineación, superficie

Tabla 2. Valoración de posibles mecanismos a fabricar

Una vez es analizado dicho mecanismo, se imprime un prototipo de este para comprobar su correcto funcionamiento. Para ello, se utilizarán las distintas tecnologías de impresión 3D disponibles en el recinto universitario:

- **HP Jet Fusion 580:**
 - Tecnología: MJF (Multi Jet Fusion). Impresión por fusión de polvo mediante agentes químicos y calor.
 - Material: Polímeros técnicos (Nylon).
 - Ventajas: Alta precisión y buena resistencia mecánica
- **Formlabs Form 3L:**
 - Tecnología: SLA (Estereolitografía). Fotopolimerización capa por capa de resina líquida con láser.
 - Material: Resinas técnicas.
 - Ventajas: Alta resolución, piezas detalladas y con buen acabado superficial.
- **PRUSA I3KS:**
 - Tecnología: FDM (Fused Deposition Modeling). Extrusión de filamento termoplástico capa por capa.
 - Material: Filamento termoplástico PLA.
 - Ventajas: Versátil y adecuada para prototipos rápidos.
- **Markforged X7:**
 - Tecnología: CFR (Continuous Fiber Reinforcement). FDM reforzado con fibras continuas.
 - Material: Nylon con refuerzo de fibra de vidrio.
 - Ventajas: Alta resistencia mecánica, rigidez y funcionalidad estructural real.

Por otra parte, se imprimirán muestras de ensayo simples que permitan evaluar los distintos componentes que se impriman con la tecnología FDM metálica antes de montarlos en el mecanismo final.

3.3 IMPRESIÓN FDM METÁLICA

En paralelo con la búsqueda y montaje del mecanismo, se va a preparar una impresora de tecnología FDM capaz de crear piezas empleando filamentos con materiales metálicos. El filamento en cuestión que será utilizado es el **BASF Ultrafuse 17-4 PH**, un tipo de filamento que, en su finalidad, permite imprimir piezas de acero 17-4 PH, un tipo de acero inoxidable que ofrece una combinación excepcional de alta resistencia y dureza. [21]

3.3.1 PUESTA EN MARCHA DE IMPRESORA 3D

Hay que recalcar que no se tiene pensado emplear una impresora comercial para la obtención de las piezas, sino una impresora de fabricación propia.

Dicha impresora ha sido previamente montada y cedida para este proyecto por un equipo de la entidad universitaria con el nombre de “ICAI3D”, dedicados a la atención de pedidos de impresión 3D y a la puesta en marcha de impresoras 3D de fabricación propia.

Así pues, también se busca llegar al objetivo final del proyecto obteniendo piezas metálicas viables con una impresora 3D personalizada y económica.

La impresora cuenta con una estructura básica con perfiles de acero inspirada en un modelo de impresora 3D con la denominación de Prusa i3, obtenido a través de documentación creada por la comunidad. En la figura 18 queda representada la estructura básica de la impresora, que es de tipo cartesiana: la base de impresión se desplaza hacia delante y atrás (eje X) y el cabezal de extrusión se desplaza lateralmente (eje Y) y verticalmente (eje Z).

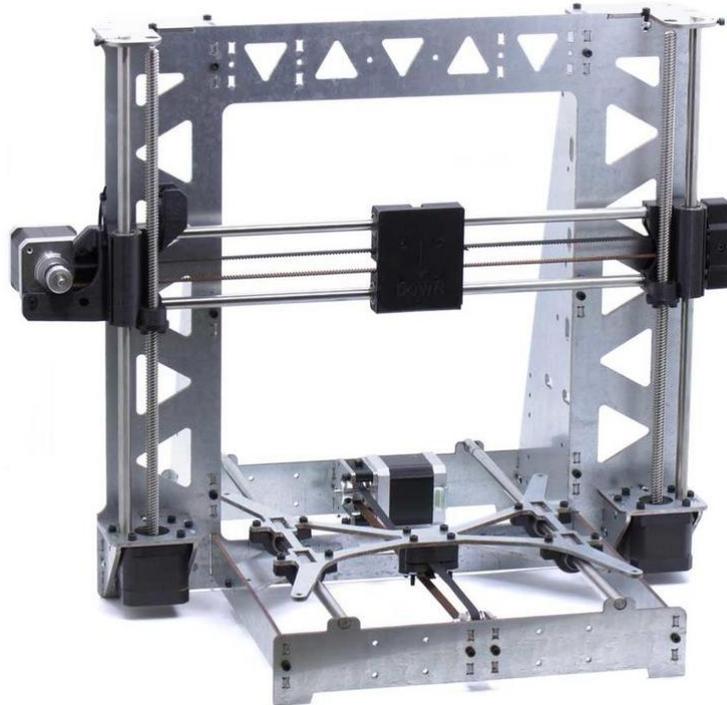


Figura 18. Perfil base de una impresora FDM, basada en el modelo Prusa i3. Thingiverse

La impresora, una vez ya entregada por el equipo, cuenta con un montaje bastante completo, disponiendo con todo el hardware necesario para empezar a funcionar:

- Fuente de energía
- Boquilla de acero endurecido de 0.4 mm de diámetro
- Hotend
- Cama caliente
- Motores
- Driver de motores
- Ventiladores
- Pantalla LCD
- Placa de control
- Regulador externo de la cama caliente
- Sensores de temperatura para hotend y cama
- Finales de carrera

Para este proyecto, y siguiendo la recomendación del equipo “ICAI3D”, se instalará un componente adicional para dar un mejor resultado a las impresiones: un sensor de autonivelado. Dicho sensor, más comúnmente conocido por la denominación de BLTouch, es un componente muy útil para compensar pequeñas irregularidades en la cama de impresión. De no contar con ello, las pequeñas irregularidades se irán haciendo cada vez más notorias hasta que se empiecen a ver errores de impresión por fallo en la adhesión del filamento a la superficie de la cama caliente, lo que acaba obligando al usuario a que realice un ajuste manual de la superficie de impresión, un proceso rutinario e impreciso.



Figura 19. Sensor de calibración de superficies de impresión. BLTouch. Filament2Print

Una vez queden instalados todos los componentes de la impresora, será el momento de aplicar los recursos de software:

- Visual Studio Code (VS Code): editor de código fuente que permite compilar y subir a la impresora 3D el firmware que necesita para poder controlar sus componentes.
- Cura Slicer: aplicación que prepara los modelos hechos en 3D como código entendible para la impresora. Permite visualizar como se comportará capa a capa el proceso de impresión del modelo antes de ejecutarlo en la impresora. Este software resulta idóneo para el proyecto ya que permite al usuario adaptar los parámetros de impresión con respecto al filamento que se desea usar para obtener las piezas.

Gracias a la amabilidad del equipo “ICAI3D”, se cuenta también con un perfil de impresión personalizado, un código que se deberá incluir en el Cura Slicer y que permite asegurar el correcto funcionamiento, seguridad y calidad de impresión con los parámetros que se establezcan del filamento a usar.

Adicionalmente, también han sido proporcionados una base de cristal templado, para apoyar en la cama caliente e imprimir sobre él y un adhesivo para la cama de impresión específico para adherir correctamente sobre la base de impresión el material fundido. Para retirar las piezas de la base de cristal deberá de emplearse una cubeta con agua que disuelva el adhesivo.



Figura 20. Adhesivo para superficies de impresión con filamentos metálicos. Magigoo. Filament2Print

Para resumir esta sección, la tabla 3 resume los recursos a emplear para preparar la impresora.

<i>EN POSESIÓN</i>	<i>A OBTENER</i>
<i>HARDWARE</i>	
Impresora (incluye cable USB) Adaptador 3DTouch Extend Sensor 3DTouch Escuadras de montaje Bobina filamento Ultrafuse 17-PH 1.75mm Adhesivo para cama de impresión Magigoo	Cubeta para sumergir cama caliente (para deshacer pegamento) Rasqueta/espátula
<i>SOFTWARE</i>	
Perfil de impresión Cura para Ultrafuse Guía de impresión Ultrafuse Archivos de configuración Marlin	Cura Slicer Visual Studio Code (+ VSCode plugins PlatformIO IDE, Auto Build Marlin, C/C++ y CMake Tools)

Tabla 3. Listado de recursos para realización del proyecto

3.3.2 PROBETAS

Una vez quede preparada la impresora, será el momento de comprobar la eficiencia del filamento que se está usando. Para ello, se procederá a imprimir una serie de probetas que para hacer un análisis mecánico.

La idea principal es hacer ensayos de tracción con probetas que sean totalmente macizas y tengan rellenos impresos en tres orientaciones distintas: horizontal, diagonal y vertical respecto a la dirección de aplicación de carga de tracción. Queda representado en la figura 21.

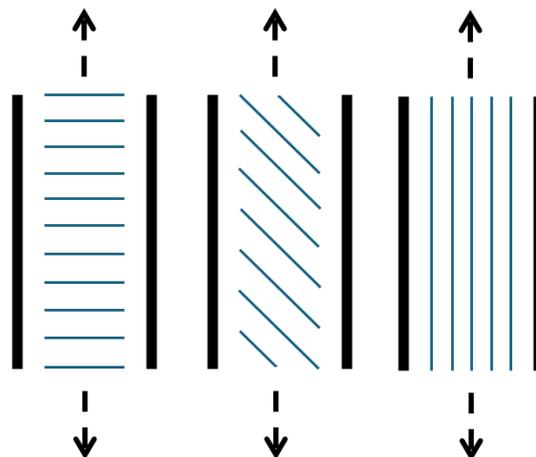


Figura 21: Representación dirección relleno probetas (azul) frente a esfuerzo tracción (flechas)

Por otra parte, también se contempla hacer una comparativa entre las probetas postprocesadas y las probetas sin procesar, es decir, se pretende analizar las probetas en dos estados:

- Estado “Verde”: Probetas recién impresas que no tienen tratamiento térmico posterior. Se sigue teniendo una pieza con combinación de polvo de acero y aglutinante.
- Estado “Gris”: Probetas tratadas térmicamente. Se tiene una pieza de acero inoxidable sinterizado.

Dado que los ensayos se pretenden hacer en la universidad, la probeta más adecuada tanto por la maquinaria disponible como para la impresora 3D, debe ser una probeta de paredes planas del tipo cuello de botella. Una geometría recomendable en ensayos de materiales metálicos y polímeros.

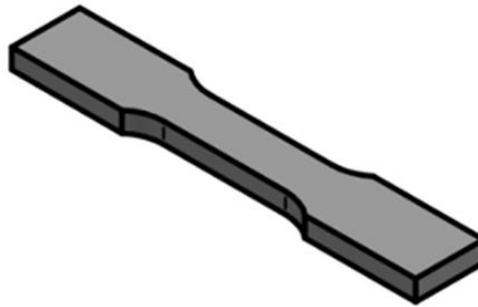


Figura 22. Diseño probeta de cuello de botella.

3.3.3 COMPONENTES MECANISMO Y SU OPTIMIZACIÓN

Siguiendo la línea de los objetivos que busca cumplir este proyecto, se deben imprimir con el filamento metálico componentes que formen parte del mecanismo que ha sido preparado desde un principio. El reto será reemplazar solo parte de los componentes originariamente impresos con otras tecnologías, para poder analizar el comportamiento que tendrán las nuevas piezas metálicas y las consecuencias que tendrán en el correcto funcionamiento del mecanismo.

Serán reemplazadas por su homólogo metálico aquellas piezas que presenten una mayor exigencia mecánica y resulten más adecuadas para el proceso FDM, tanto por su geometría como por su tamaño. De entre esas piezas, se elegirán aquellas que tengan posibilidades de ser optimizadas topológicamente y se imprimirá su semejante de masa más reducida pero misma funcionalidad.

Para el rediseño, análisis y optimización topológica de componentes se deberán usar las siguientes herramientas CAD: Solid Edge y Altair Inspire.

3.3.4 DESAGLOMERADO Y SINTERIZADO

Las piezas obtenidas tras la impresión metálica no son piezas acabadas, son piezas “verdes”, pues aún hay un porcentaje de ellas que será polímero aglutinante y por tanto son piezas frágiles, porosas y con contenido plástico. Para poder obtener las piezas funcionales, cuya composición sea prácticamente metálica, deberán tratarse térmicamente mediante dos procesos muy controlados:[22]

- **Desaglomerado (Debinding):** la pieza se calienta lo suficiente para eliminar el polímero aglutinante sin afectar a la distribución del polvo metálico. Se obtendrá una pieza intermedia conocida como “pieza marrón”.
- **Sinterizado (Sintering):** la pieza se calienta lo suficiente para fusionar las partículas de polvo metálico. El coste de este proceso supone que las piezas serán comprimidas alrededor de un 20% de su tamaño original. Se obtendrá la pieza final conocida como “pieza gris”

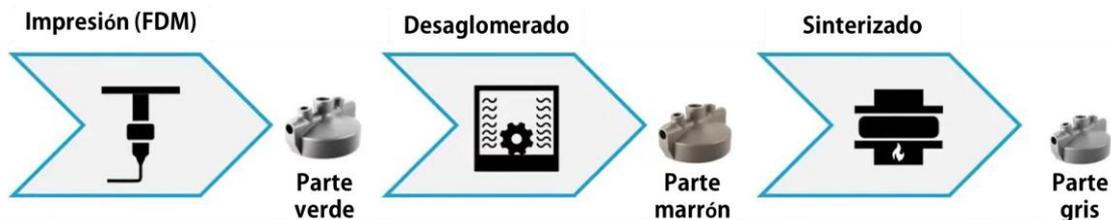


Figura 23. Representación de la línea de proceso de piezas por FDM Metal. Forward AM

La entidad universitaria cuenta con distintos hornos industriales, que se analizarán si pudieran ser viables para el proyecto. De no ser posible, se tendrá que buscar empresas especializadas en estos tratamientos.

Dado que durante los procesos de horneado las piezas sufrirán cambios tanto estructurales como dimensionales, habrá que rediseñar y preparar las piezas de acuerdo con las restricciones de estos procesos.

3.3.5 ENSAYOS

En este proyecto, se van a tratar como ensayos todas aquellas pruebas que analicen el comportamiento final de las piezas obtenidas. Dichos ensayos, en un principio, deberán ser:

- **Ensayos de tracción:** con las probetas, se determinará la resistencia máxima, el módulo de elasticidad y la deformación máxima. Se dispondrá de tres tipos de probeta dependiendo de su orientación de impresión, asique también debe haber comparación entre ellas.
- **Ensayos dimensionales:** analizar si las dimensiones obtenidas en las piezas finales coinciden con las establecidas en el diseño computacional. Por otra parte, también se compararán las piezas nada más imprimirse con su versión sinterizada, pieza verde y pieza gris.
- **Ensayos funcionales:** comprobar si las piezas cumplen su función en el mecanismo real para el que fueron diseñadas. Se verificará su ajuste y habrá que tener en cuenta cualquier deformación u holgura presente.

Capítulo 4. DESARROLLO DEL TRABAJO

En esta sección, se ven reflejadas las distintas fases que realmente se han llevado a cabo para ejecutar el proyecto, desde la puesta en marcha de la impresora 3D metálica, hasta la validación de los distintos componentes impresos.

4.1 ACTUALIZACIÓN DE LA IMPRESORA

La impresora ya adquirida era funcional y fue probada con anterioridad por el equipo de *ICAI 3D* para la impresión de componentes metálicos, pero sin mucho éxito. A continuación, se detalla todas las actualizaciones que fueron llevadas a cabo para dejar a la impresora preparada para la impresión de filamentos metálicos.

4.1.1 HARDWARE

El primer cambio necesario fue reemplazar el cabezal de extrusión de la impresora. Dicho cabezal fue diseñado en un principio para trabajar con extrusión directa, esto quiere decir que el motor que empuja el filamento está montado sobre el cabezal por el que funde el filamento, lo que garantiza un mayor control del flujo del material a la hora de depositarlo sobre la base de impresión.

A pesar de cumplir con su función básica, su diseño no permitía incorporar el sensor de calibración, el BLTouch.

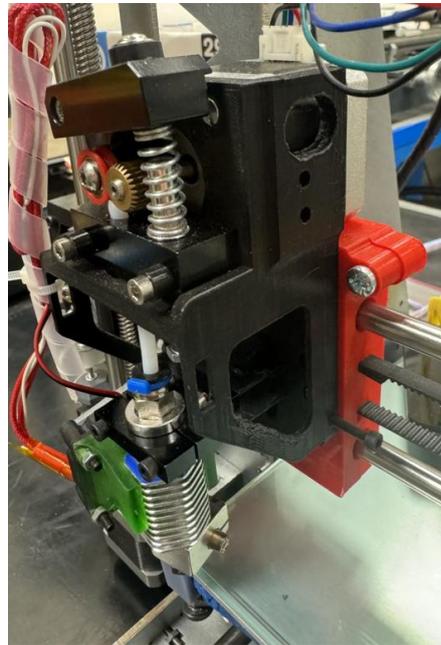


Figura 24. Cabezal de extrusión original.

Dado que el cabezal de extrusión fue diseñado por el mismo equipo que montó la impresora, estos proporcionaron una nueva versión que parecía adaptada para poder incorporar el BLTouch, pero un error de diseño hizo que se descartase dicho modelo, ya que deformaba críticamente el conducto por el cual circula el filamento, como se muestra en la figura 25.

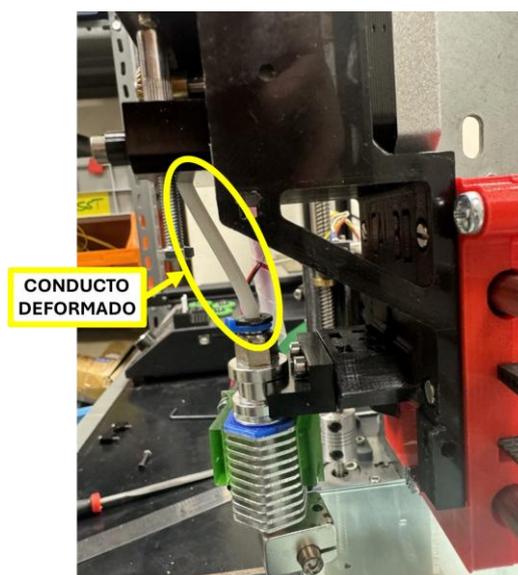


Figura 25. Fallo de diseño de cabezal de extrusión entregado.

Es por ello por lo que se tuvo que hacer unas últimas modificaciones técnicas empleando el software de diseño CAD Solid Edge. Dicho modelo corregido, fue impreso utilizando una impresora de tecnología FDM con un filamento plástico conocido por la denominación de PLA. Una vez quedó preparado el cabezal y comprobadas sus medidas, se dejó completamente instalado en los carriles de la impresora.

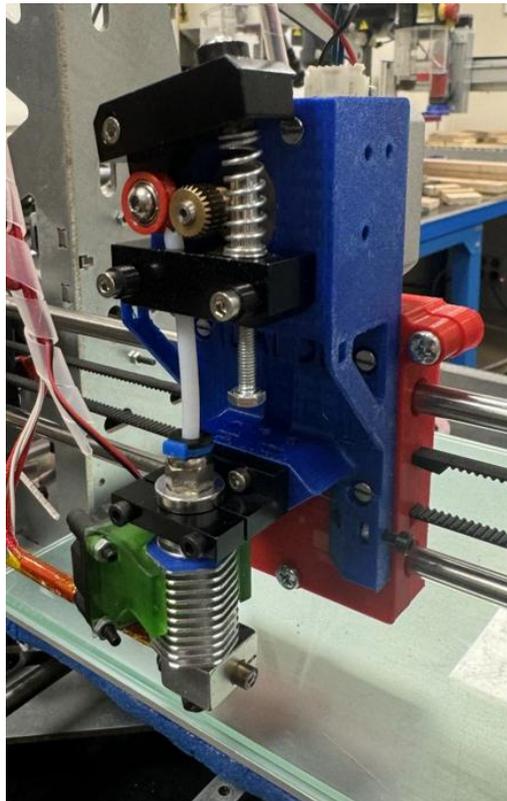


Figura 26. Cabezal de extrusión rediseñado e instalado en la impresora

Quedado ya instalado el nuevo cabezal de extrusión, se debía incorporar el BLTouch. Su incorporación era necesaria para garantizar el nivelado de la superficie de trabajo de la impresión.

Mecánicamente hablando, el BLTouch es un componente que cuenta con una punta retráctil, la cual se recoge cuando entra en contacto con una superficie, por tanto, esta debe estar orientada lo más perpendicular posible a la superficie de impresión. Conocido esto quedaba evidente lo siguiente:

- Cuando la punta esté desplegada debe quedar más larga que la boquilla de extrusión para evitar una colisión fatal con la cama de impresión.
- Cuando la punta esté recogida debe quedar más corta que la boquilla de extrusión para evitar interferir con la deposición de material.

Gracias a la documentación del BLTouch, quedarón claras las medidas que se deben cumplir para evitar futuros problemas durante la calibración y la impresión.

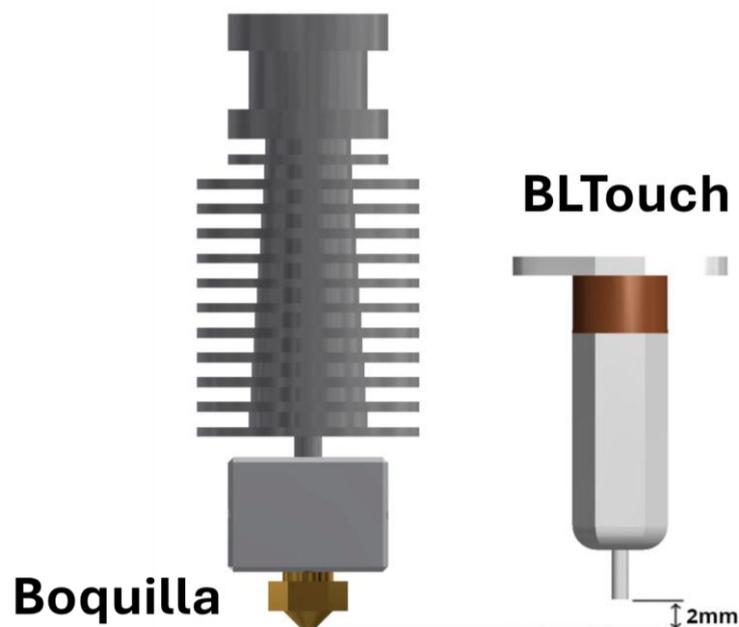


Figura 27. Representación espacio de altura boquilla/sensor. Filament2Print

Tal y como queda indicado en la figura 27, el BLTouch deberá quedar, cuando su punta está recogida, a dos milímetros retrasada de la boquilla de extrusión como máximo.

Para poder cumplir estos parámetros con la mayor precisión posible, se decidió diseñar una extensión adicional en el cabezal de extrusión bajo la sección creada para sostener el BLTouch. Con la extensión correctamente colocada, ya se podía fijar el BLTouch.

En la figura 28, queda reflejada la prueba visual de cómo queda la punta del BLTouch en sus dos fases: recogido y estirado.

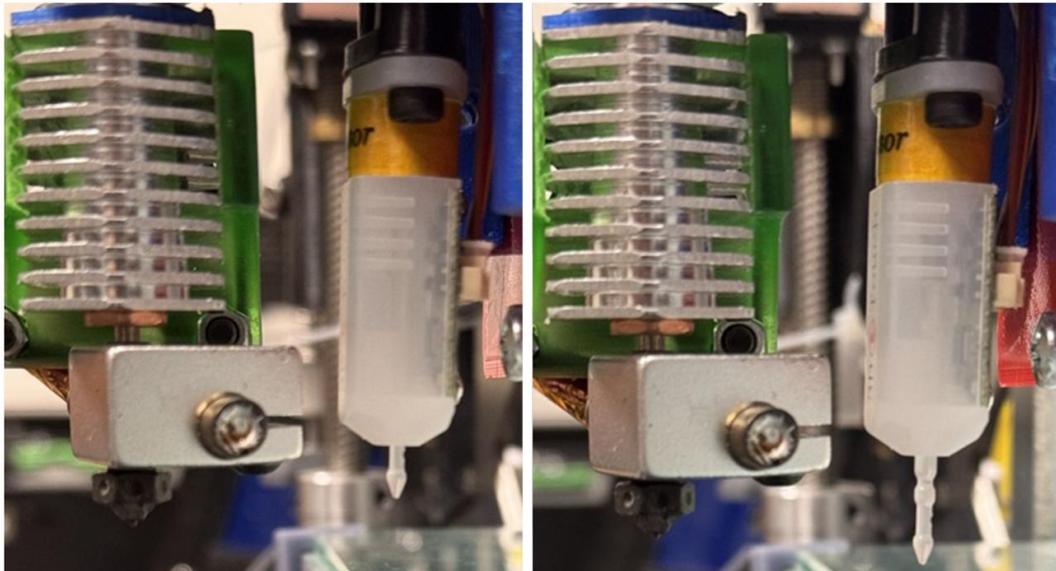


Figura 28. Verificación visual montaje BLTouch. Punta recogida y extendida

Tras posicionar el BLTouch, solo quedaba su instalación en la placa controladora. Hubo que tener en cuenta que el dispositivo sirve no solo como calibrador del área de impresión, también sirve como final de carrera del eje vertical, lo que hacía que parte de su cableado reemplazase al endstop del eje Z.



Figura 29. Endstop con palanca. Filament2Print

El BLTouch se conectó a la placa usando:

- Dos cables para el servo (control de la punta)
- Tres cables para el final de carrera del eje z

Se conectó mediante terminales Dupont usando los pines Z-stop y Servo PWM de la placa (según especificaciones del fabricante).

4.1.2 SOFTWARE

Una vez quedan instalados todos los componentes, es el momento de actualizar el código de la impresora. Para ello, se utiliza Visual Studio Code, un editor de código fuente que sirve para editar y depurar código en muchos lenguajes de programación (Python, C++, JavaScript, etc.).

Buscando dentro de la comunidad de la impresión 3D, se ha utilizado Marlin, un firmware de código abierto ampliamente adoptado en el mundo de impresión 3D escrito con código C++. Para poder compilar y subir el firmware, se instaló en VS Code la extensión de PlatformIO IDE, que permite cargar el código directamente a la placa de la impresora por USB.

Gracias a los anteriores usuarios de la impresora, el equipo de ICAI3D, el código de la impresora ya está configurado para emplear el tipo de filamento del estudio.

A través de Marlin se harán las siguientes modificaciones en el archivo `Configuration.h`:

- Habilitar el BLTouch:

```
// Activar auto-nivelado con sensor BLTouch
#define BLTOUCH

// Indicar que se usará un sensor para el auto-nivelado
#define AUTO_BED_LEVELING_BILINEAR

// Habilitar que el sensor haga una comprobación automática de la cama
#define Z_SAFE_HOMING
```

- Establecer que BLTouch analice 25 puntos distintos en la base de impresión:

```
// Mallado de 5x5 por toda la cama
#define GRID_MAX_POINTS_X 5
#define GRID_MAX_POINTS_Y 5
```

También hay otros parámetros que editar como el tamaño de la malla de calibración respecto a la cama con `PROBING_MARGIN` o el punto donde el BLTouch hará la primera prueba de distancia Z sobre la superficie usando `Z_SAFE_HOMING_X_POINT` y `Z_SAFE_HOMING_Y_POINT`, pero estos han necesitado de aplicación manual para detectarlos.

Dentro de Marlin, hay habilitado un comando que es la EEPROM (Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory) que mantiene guardada la configuración básica de la impresora incluso cuando está apagada. Esta memoria puede editarse y cargarse nuevamente desde la pantalla LCD de la impresora.

Todos estos cambios serán cargados directamente a la placa controladora utilizada en este estudio, una placa ATmega2560 + Ramps v1.4.

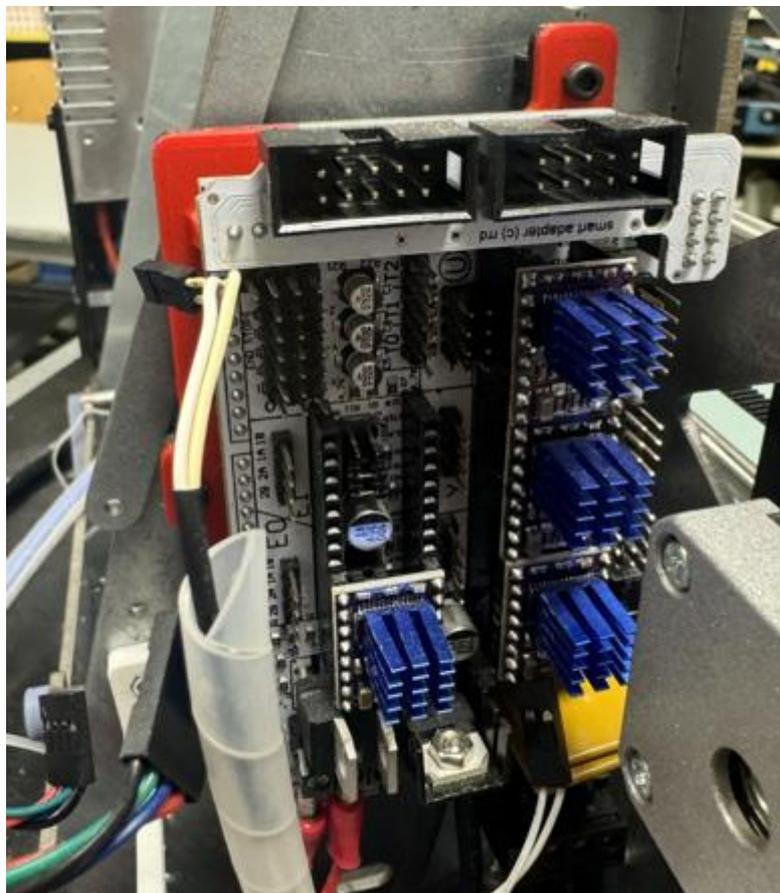


Figura 30. Placa ATmega2560 + Ramps v1.4.

Una vez queda preparado el código funcional de la impresora, ya se puede incluir el código de funcionamiento de la impresión. Para esta parte se utilizará el software Ultimaker Cura Slicer, que convierte modelos 3D en capas (de ahí el termino *Slicer*) y permite la configuración de distintos parámetros de impresión como, por ejemplo: velocidades, temperaturas, altura de capa, recorrido de la capa, pautas de relleno de los componentes, etc.

Cura utiliza archivos G-Code que la impresora interpreta para fabricar las piezas. Para esta impresora, se han configurado una serie de archivos G-Code que quedarán preestablecidos para el inicio (Start) y el final (End) de la impresión, que sería el siguiente:

```
Start G-code
;Impresora Extra 01 start script
G28                      ;Home
M107                     ;Start with fan off
G1 Z10 E0 F500           ;go to wait position
M104 S{material_bed_temperature_layer_0} ;set bed temperature
M140 S{material_bed_temperature_layer_0} ;wait bed temperature
M109 S{material_print_temperature_layer_0} ;set extr temperature
M109 S{material_print_temperature_layer_0} ;wait extr temperature

End G-code
G0 X0 Y0                 ;Move extruder off the way and move print forward
M104 S0                  ;set hotend temperature off
M84                      ;disable steppers
M104 S0                  ;set hotend temperature off
M140 S0                  ;set bed temperature off
M84                      ;disable steppers
```

Adicionalmente, y aunque no forme parte del código principal, se ha tenido que dejar preestablecido la escala con la que se imprimirán los modelos. Gracias a la documentación facilitada por el fabricante del filamento Ultrafuse 17-4 PH, se sabe que los componentes deben estar sobredimensionados porque, al imprimirse usando un polímero aglutinante, los modelos deberán pasar por un proceso de horneado que retire ese polímero y compacte la pieza para que solo quede el material metálico. Por tanto, los modelos se contraen durante el horneado, por tanto, según el fabricante, debe seguirse un dimensionamiento de un 124% en el eje Z y un 120% en ejes X e Y.

Así pues, cada vez que se cargue un modelo nuevo al Cura Slicer, automáticamente estará sobredimensionado.

4.2 PREPARACIÓN DE UN MECANISMO

Parte del valor que se quiere dar a este proyecto viene con el objetivo de poder garantizar un componente plenamente funcional, que sirva como parte del montaje final de un mecanismo industrial, impreso a través de una impresora FDM metálica.

Tras un análisis de los distintos mecanismos propuestos y una búsqueda exhaustiva de versiones funcionales de los mismos, se optó por un mecanismo de pinza con cremallera y engranaje sectorial. Se ha optado por este mecanismo porque cuenta con un funcionamiento cinemático simple donde el movimiento lineal de un pistón acciona el sistema de apertura y cierre de unas garras. Dicha acción es llevada a cabo por un sistema de eslabones y engranajes, los cuales son elementos interesantes de reemplazar por homólogos de metal para poder analizar su comportamiento dinámico y estructural.

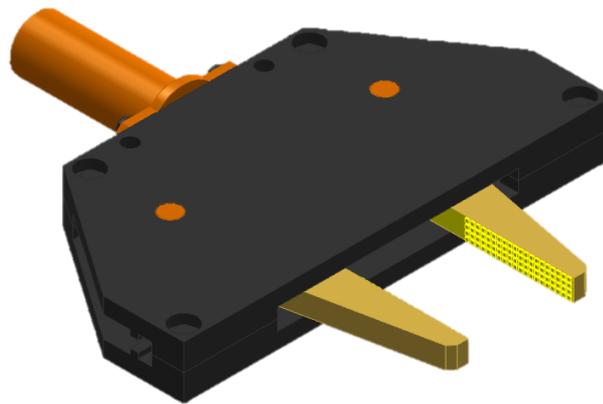


Figura 31. Conjunto CAD de mecanismo de garras.[23]

El mecanismo fue originariamente diseñado a través del software CAD Solid Edge por un usuario de YouTube con el nombre “CAD CAM Learning”, cuyo contenido se dedica exclusivamente a la consultoría y suministros de software CAD y CAM.

4.2.1 MODIFICACIÓN PIEZAS

En la tabla 4, se muestran los componentes con los que cuenta originariamente el mecanismo:

<i>REFERENCIA</i>	<i>COMPONENTE</i>
1	Carcasa
2	Culata
3	Pistón
4	Soporte central
5	Conectores
6	Engranajes
7	Garras

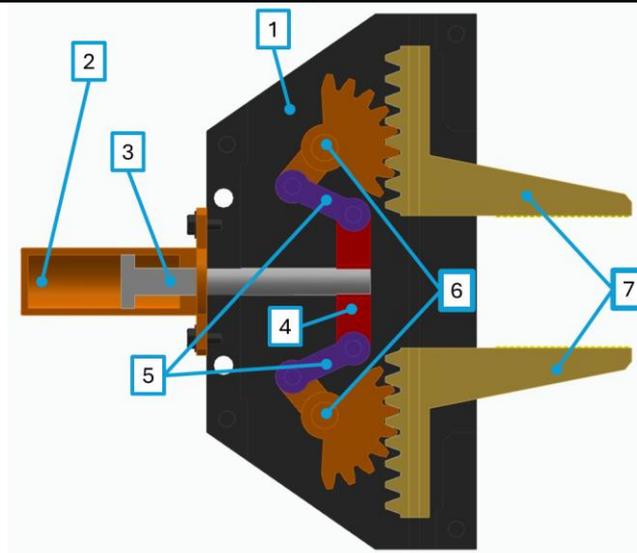


Tabla 4. Componentes que forman el mecanismo de pinzas original

Una de las partes prioritarias para modificar era el sistema de accionamiento del mecanismo, el pistón. En su versión original no existía forma física de accionar el pistón y ello limitaba la demostración dinámica de sus componentes. Es por ello, que se tomó la decisión de reemplazar el pistón por un sistema de accionamiento manual: una barra transversal que atraviesa el vástago del mecanismo que cuando esta es empujada, ejerce presión sobre un muelle de compresión que aporta resistencia y permite el retorno automático al estado abierto.

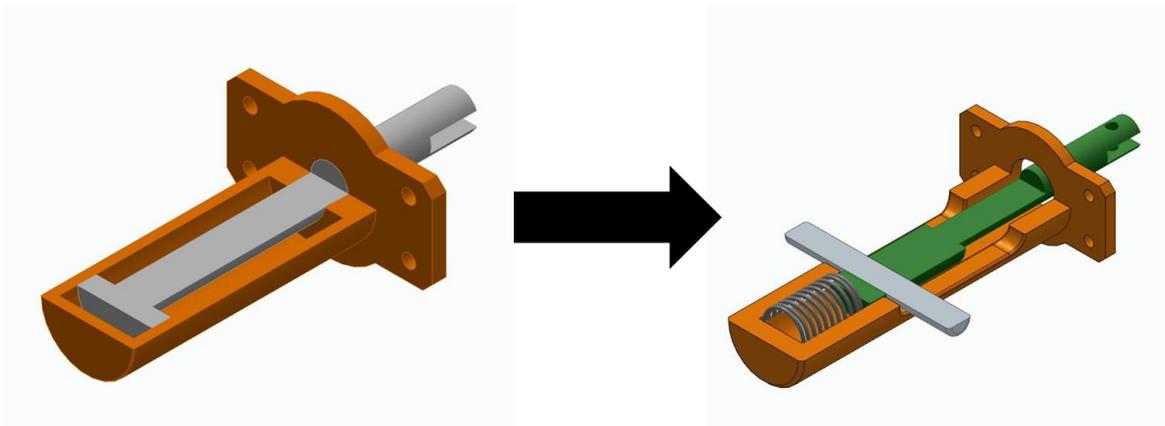


Figura 32. Rediseño CAD del sistema de accionamiento de las garras

Otro cambio esencial fue orientado hacia los conectores, ya que estos parece que solo fueron diseñados para la simulación digital, dado que físicamente eran imposible de acoplar al resto del mecanismo. Se tomo la decisión de partir cada conector en dos partes iguales que se interconectarían entre ellas con un ajuste de apriete para evitar que se descompusieran al accionar las garras.

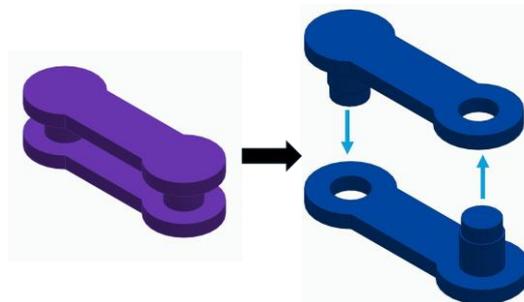


Figura 33. Rediseño CAD de los conectores del mecanismo de garras

El resto de modificaciones realizadas fueron ligeros ajustes dimensionales entre los distintos componentes que tenían acción dinámica, se trató de dar un margen de tolerancia más amplio entre ellos, alrededor de 0.1 mm para garantizar su movimiento.

Hubo más cambios estructurales que fueron una decisión propia con la idea de facilitar el montaje (relación carcasas – ruedas dentadas) o mejorar la calidad del funcionamiento (dientes más largos en las garras).

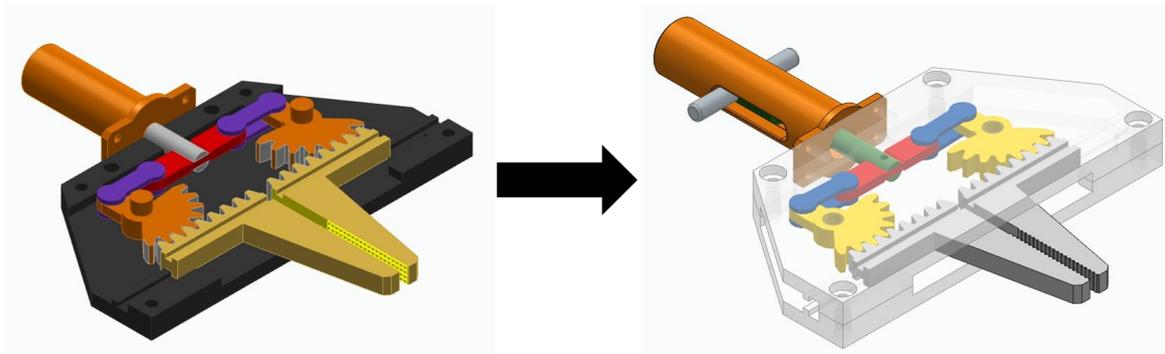


Figura 34. Evolución CAD del mecanismo de garras original al mecanismo que será fabricado

4.2.2 IMPRESIÓN Y MONTAJE DE PROTOTIPOS

El mecanismo de pinzas estaba pensado para ser montado primero con distintas tecnologías de fabricación aditiva para después reemplazar parte de sus componentes por los obtenidos con la impresión metálica y así poder observar su comportamiento comparativamente con el resto.

Antes de imprimir las partes del mecanismo empleado, se imprimieron versiones reducidas y simplificadas de secciones de este a modo de prototipado para comprobar si las tolerancias que se habían propuesto en las partes móviles cumplían con lo esperado. Las secciones que más preocupaban fueron:

- Relación ruedas dentadas con la carcasa y los conectores.
- Relación garras con el rail de las carcasas

Estos primeros prototipos fueron impresos usando la impresora **Markforged X7**, cuya tecnología de impresión FDM reforzada garantiza una impresión rápida y de alta precisión.

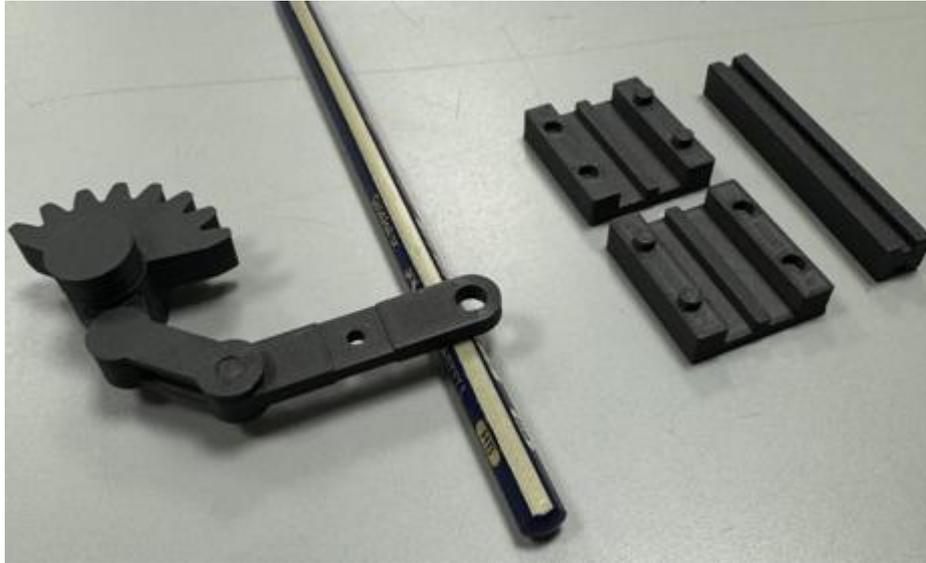


Figura 35. Impresión prototipos con tecnología FDM reforzada.

Una vez hechas las comprobaciones, ya se pudo proceder con la impresión del resto de componentes. Para elegir la tecnología más adecuada, se tomó en consideración las siguientes necesidades:

- Piezas resistentes y con alta precisión dimensional.
- Carcasas transparentes para poder observar el funcionamiento interior del mecanismo del resto de componentes.

Teniendo en cuenta lo último mencionado, los componentes se imprimieron con las siguientes tecnologías:

- Carcasas: impresas con **Formlabs 3L**, con tecnología SLA y usando como material resina transparente, en su caso *Clear Resin*.
- Resto de componentes: impresas con **HP Jet Fusion 580**, con tecnología MJF y usando polvo termoplástico PA 12.

Adicionalmente, se ha usado tornillería estándar para fijar toda la estructura del mecanismo, empleando para ello insertos para tornillos que fueron incorporados en las carcasas.

Por otra parte, para evitar el montaje y desmontaje de las pinzas para probar el funcionamiento de las piezas impresas por metal, se tomó la decisión de montar una versión simplificada de las carcasas que pudiera incluir, a parte del vástago, el sistema de accionamiento rueda-cremallera de una de las dos garras, ya que ambos componentes se repiten en ambas pinzas, por tanto, sería un prototipo que permite ensayar con todas las partes móviles del mecanismo a la vez.

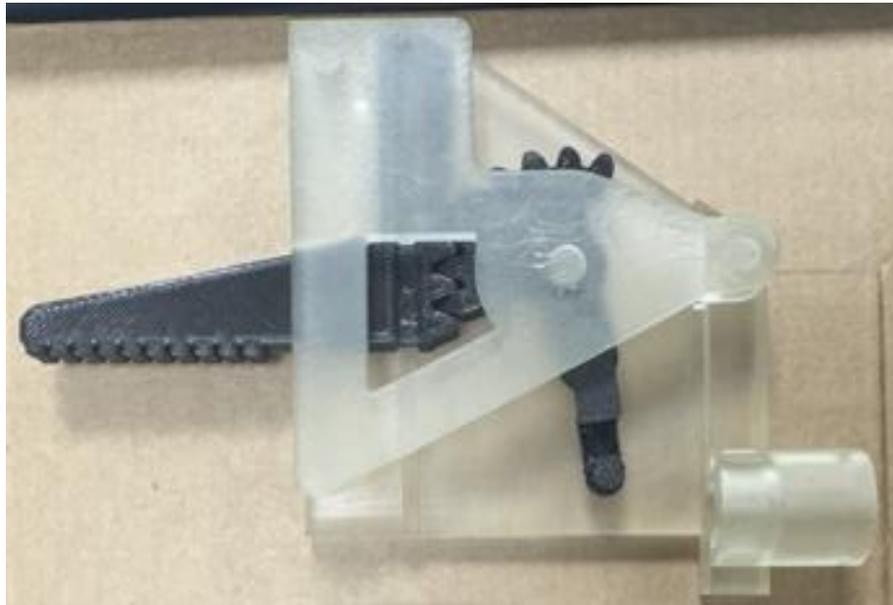


Figura 36. Prototipo de carcasas impresas por SLA (resina).

4.3 PRUEBAS DE IMPRESIÓN METÁLICA

Antes de iniciar con la propia impresión de los componentes del mecanismo, se han tenido que realizar una serie de pruebas de impresión para garantizar el mejor flujo de trabajo posible.

Para validar los parámetros de impresión, dichas pruebas se han llevado a cabo durante las impresiones de las probetas de tracción que posteriormente serían usadas para los ensayos.

Esta decisión ha sido tomada no solo para acelerar las pruebas y ahorrar material, sino también porque era el mejor ejemplo para probar las impresiones, ya que los ajustes evaluados en las probetas serían directamente representativos de la geometría y configuración final de las piezas funcionales.

Todas las pruebas fueron realizadas siguiendo los márgenes de parámetros que recomendaba el fabricante del filamento metálico usado (Ultrafuse 17-4 PH).

Parameter	Value	Comment
Nozzle size	0,3 - 0,8 mm	Depending on level of detail required and print time
Line width	±10-20% Nozzle size	Recommended
Retraction distance	1,5 mm / 5,0 mm	Direct / Bowden extruder
Retraction speed	45 mm/s	Recommended
Layer height	0,10-0,25 mm	No more than 60% of the nozzle size recommended
Outlines	1-3	Too many outlines can result in wall separation

Figura 37. Tabla con parámetros para imprimir usando filamento Ultrafuse 17-4 PH. Forward AM

Dichos parámetros se actualizaban directamente en el Ultimaker Cura slicer.

Sin embargo, a pesar de contar con documentación para emplear los mejores valores posibles, hubo una parte que debía probarse manualmente: el probe Z Offset.

El probe Z Offset es la diferencia de altura entre la boquilla del extrusor y el sensor de calibración. Cuando el sensor de calibración (BLTouch), toca la superficie de la cama, la distancia Z se está comparando respecto al sensor, no respecto a la boquilla. De no hacer ninguna modificación, es muy probable que la boquilla imprima la primera capa flotando en el aire, arruinando toda la impresión desde el momento inicial.

Para poder corregir la diferencia de altura de la boquilla a la cama, se utilizó el panel de control para ajustar manualmente la altura del eje Z. Dentro del firmware que se cargó a la impresora, hay una opción que permite modificar el Z offset después de haber calibrado la superficie de impresión. Inicialmente, el Z offset debería aparecer con el valor 0, y a medida

que se ajusta para acercar la boquilla a la superficie de la cama, el Z offset pasará a tener valores negativos. En este proyecto el Z offset se ajustó a una medida de -1,40 mm.



Figura 38. Vista desde pantalla LCD valor de Offset

El Z offset debe cambiarse siempre que se haga cualquier cambio de montaje que afecten al sensor de calibración. Ningún firmware puede adivinar esta distancia, así pues, una vez que se dejó ajustado se tomó la decisión de cargar el parámetro en la EEPROM de la impresora.

```
#define NOZZLE_TO_PROBE_OFFSET {0, -27.5, -1,40}
```

Para garantizar la adhesión de la primera capa a la cama caliente, no valía solo con el ajuste del Z offset, también se necesitó de un pegamento industrial específico para el filamento usado. Dicho pegamento debía untarse sobre la superficie de la base de cristal antes de calentar la base impresión. Para poder retirar la pieza de la cama, se retiraba la base de cristal de la impresora y se metía en una cubeta con agua, donde había que esperar a que el pegamento se diluyera para poder así retirar la pieza sin ningún esfuerzo. No emplear el adhesivo se traduce en un fallo de adherencia de la primera capa resultando en el curvado de las esquinas durante la impresión, lo que en el mundo de la fabricación aditiva por FDM se conoce como warping.

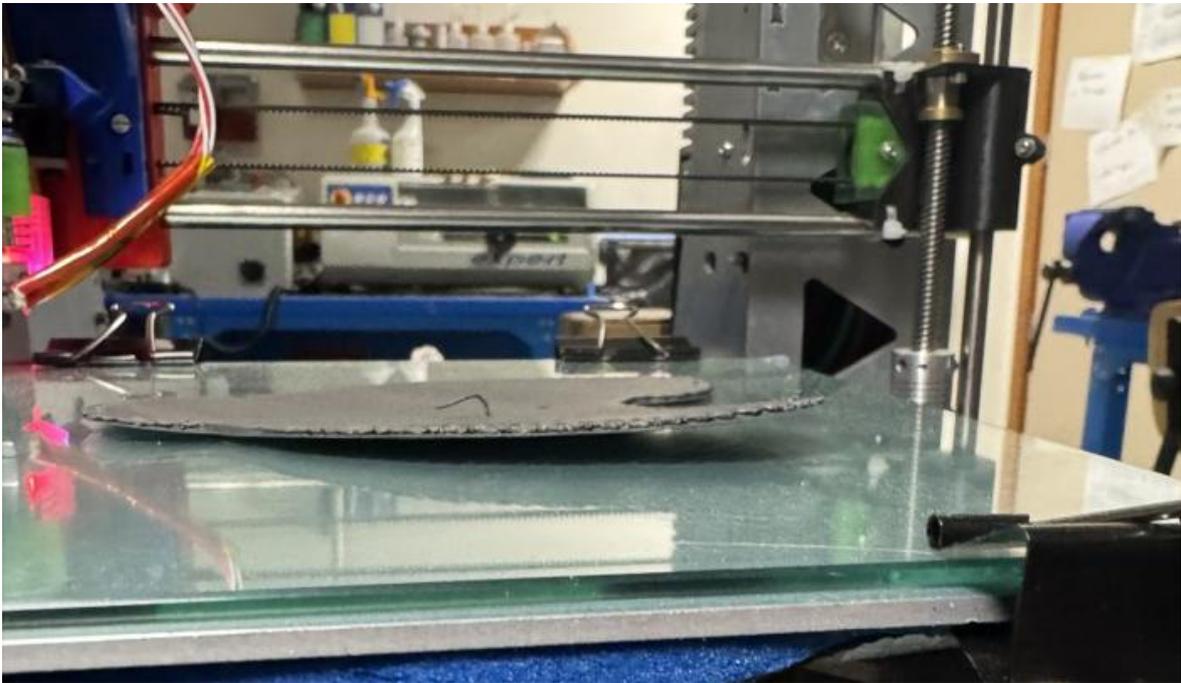


Figura 39. Fallo de adherencia en la cama caliente por poco adhesivo.

4.3.1 REPARACIÓN IMPRESORA FDM METAL

A lo largo de la etapa de impresión de este proyecto, tuvieron lugar tres fallos críticos que suponían la pausa inminente de la impresora.

Error de alimentación eléctrica en la cama caliente

Durante un ensayo de calibración de la superficie de impresión, la pantalla mostró un mensaje de error que básicamente decía que había un error en el calentamiento de la cama.

```
Heating failed: Bed
```

Dicho error apareció debido a que, sorprendentemente, un cable se separó de la base inferior de la cama caliente. Tal y como se ve en la figura 39, este cable resultó ser el polo negativo del circuito que daba corriente a la cama caliente que, teniendo una soldadura basta, acabó por separarse tras varios ciclos de impresión.



Figura 40. Cable de alimentación de cama caliente. Despegado y con mala soldadura

Su desconexión supone la pérdida de alimentación a la resistencia calefactora de la cama, traduciéndose en una generación de calor nula. La impresora detecta que la cama no alcanza la temperatura deseada y por ello aparece el mensaje de error previamente mostrado.

Para su reparación se desmontó la cama de impresión de la estructura de la soldadura y se corrigió la conexión del cable con una nueva soldadura, esta vez limpia y bien cebada de estaño.

Error de desajuste del extrusor

Tras la realización de una de las impresiones más largas del proyecto (poco más de cinco horas de impresión), la pieza resultante apareció con un error de impresión diferente de los esperados.

Como muestra la figura 40, la mitad superior de la pieza parece ser desplazada hacia la izquierda, lo que acaba dejando inservible al componente impreso. Quedó comprobado que el corte se hizo en la altura de la capa 130 de las 187 que tenía que imprimir.



Figura 41. Error de calibración a media impresión

Dada la naturaleza de este error, podía deberse a múltiples causas:

- Reinicio del Z offset a mitad de impresión ocasionando variación indebida en la altura de capa.
- Falta de calibración entre capas dado que el sensor de calibración estaba ajustado a 100 capas y el componente a imprimir tenía 187 capas.
- Holguras en el eje Z o Y del extrusor a cierta altura de impresión
- Salto de pasos del motor que mueve el eje Y del extrusor ocasionado por una compensación excesiva de corriente por parte de la cama caliente para mantener su temperatura.

Se aplicaron las debidas soluciones a cada posible causa, pero no se resolvía el problema. No fue hasta que se probó imprimiendo una probeta que apareció la respuesta de lo sucedido: la probeta fue orientada de tal forma que las paredes más largas de las piezas fueran paralelas al movimiento de izquierda a derecha del extrusor, provocando que este se balanceara durante la impresión, obligando a pausarla. Se concluyó que el bloque retenedor del hotend se había quedado aflojado en el cabezal de extrusión.

La solución fue asegurar bien fijos los tornillos y tuercas que forman la conexión hotend-cabezal de extrusión lo suficiente como para no deformar el cabezal (que fue impreso con filamento plástico PLA).

Es probable que este tipo de problema vuelva a repetirse tras un cierto número de ciclos de impresión. Queda como futuro trabajo la mejora mecánica del cabezal de extrusión.

Error de desgaste de anillo de empuje por extrusión directa

Junto al motor de extrusión directa, hay un rodamiento que obliga lateralmente al filamento de impresión a ser empujado por los dientes del eje del motor para así asegurar que funde en la boquilla con el flujo deseado.

De este rodamiento se desgastó por competo el anillo que lo cubría, haciendo que el filamento estuviera más holgado y por ello provocando un cambio de flujo repentino.

El arreglo más rápido fue imprimir un homólogo del anillo hecho con PLA.

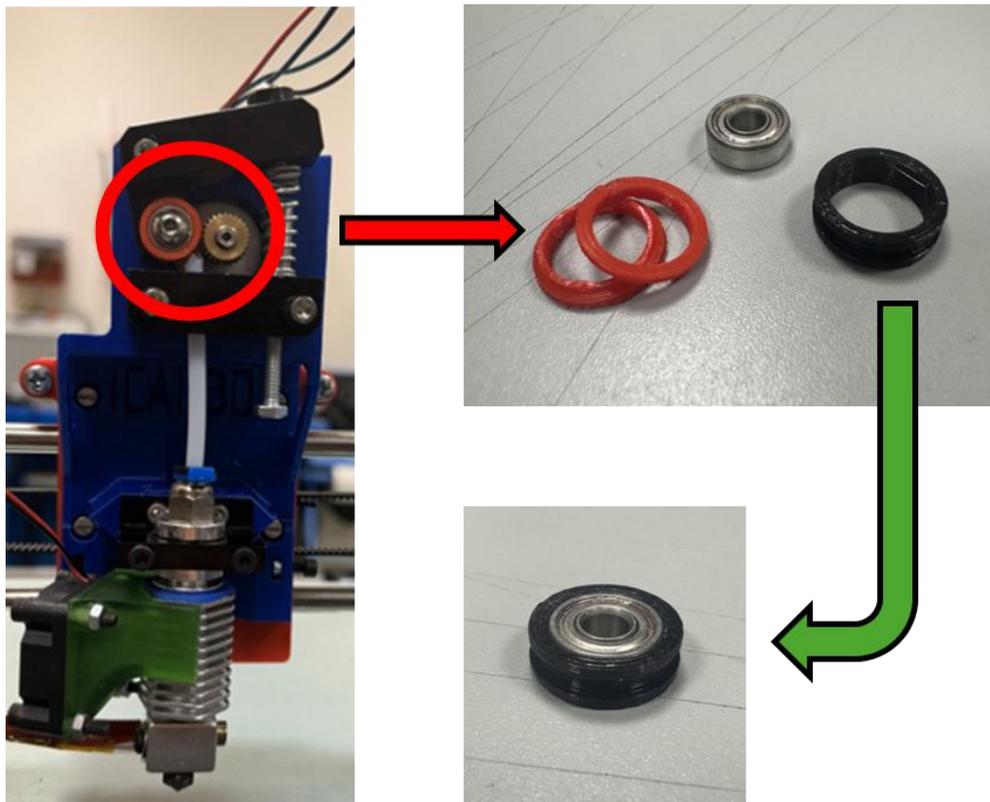


Figura 42. Proceso de reemplazo del anillo de empuje

Se comprobó la calidad del arreglo marcando un margen de 10 mm en el filamento y pidiéndole al motor que extruyera hasta 10 mm de material.

Error de reajuste involuntario temperatura cama

Durante todo el desarrollo del proyecto, este un error que ha persistido en todo momento. A la hora de imprimir, la cama de impresión se va calentando para que el sensor de calibración pueda hacer un correcto mallado de la superficie. La temperatura que alcanza es la misma que durante la impresión en si, 90 °C.

Sin embargo, nada más terminar la calibración, la temperatura objetivo de la cama caliente pasaba de 90 a 140 °C, lo que se alejaba de la temperatura establecida y de la recomendada para el trabajo. Comprobando se llegó a la conclusión de que la temperatura de 140 °C era la máxima que podía dar la cama.

Se realizaron múltiples intentos de corrección, destacando:

- **Reinicio de la memoria EEPROM** para eliminar posibles parámetros de erróneos.
- **Carga y ajuste de un control PID** para la temperatura de la cama en Marlin, buscando una mejor transición a la temperatura objetivo.
- **Modificación de los parámetros de impresión en Cura** a valores cercanos a la temperatura deseada y que puedan cumplir con la impresión (ej. 89 °C).

Esta incidencia no se pudo resolver durante los plazos establecidos del proyecto, por lo que se ha pasado a un segundo plano como trabajo futuro.

4.3.2 VARIABLES IMPRESIONES METÁLICAS OBJETIVO

Tal y como se indica en los parámetros del fabricante para la obtención de piezas metálicas usando Ultrafuse 17-4 PH, hay dos maneras de imprimir las piezas: macizas o con vaciado.

Infill Density (Solid Part)	105% Lines	Rectilinear types have shown to produce highest densities
Infill Overlap	20-35%	Overlap between the infill and the walls must be ensured
Infill type (Hollow)	>60% Gyroid, Grid or Triangle	Minimum infill above 60% for best results, but lower values possible with testing

Figura 43. Tabla fabricante Ultrafuse 17-4 PH. Propiedades de relleno en impresión. Forward AM

Como bien se indica en la figura 42, al imprimirlas totalmente sólidas hay que asegurarse que no queda ningún tipo de porosidad en el interior que pueda afectar al futuro proceso de sinterizado. De igual manera, si se busca obtener piezas más ligeras, aconsejan rellenos de más del 60 % para evitar colapsos estructurales internos durante el sinterizado y recomiendan patrones de relleno con geometrías que tienen la mayor estabilidad interna.

Se establecieron una serie de variables críticas para que las impresiones metálicas deseadas dieran resultados eficientes. Todas estas variables fueron decisiones que afectan directamente a la resistencia estructural, la estabilidad geométrica tras el sinterizado y funcionalidad de las piezas.

En este proyecto se ha querido experimentar imprimiendo componentes con hasta un 50% de relleno con un patrón de relleno rejilla y giroide. Para poder aumentar la resistencia de los componentes, se ha dado el mayor número de paredes externas recomendadas (3 ciclos) por el fabricante del filamento. Estas paredes deberían aportar la rigidez necesaria a la estructura. En la figura 43 se ha representado como sería el interior de un componente con los parámetros dados de porcentaje de relleno, patrón de relleno y paredes externas.

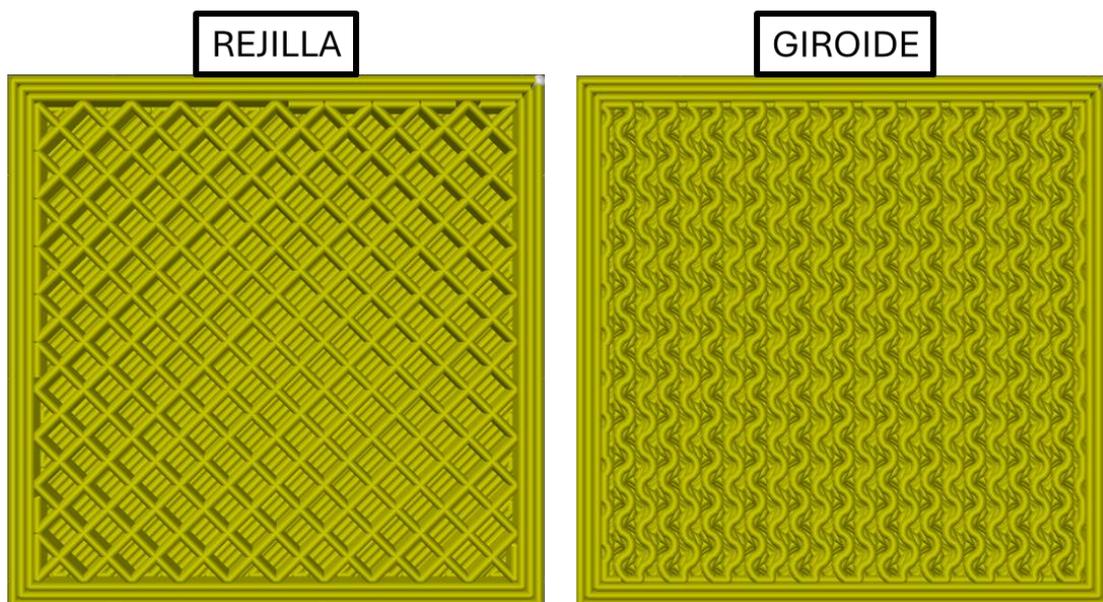


Figura 44. Representación de propiedades de relleno usadas

Por otro lado, las probetas fueron impresas como partes solidas (105% de relleno) para no tener problemas en los ensayos de tracción.

Dado que el objetivo era poder imprimir componentes que formasen parte del mecanismo de garras, se eligieron las piezas de más interés para obtener metálicamente y que cumplieran con dos pautas fundamentales:

- Piezas que en el mecanismo tuvieran una importante implicación dinámica y estructural.
- Piezas que en la impresora FDM metal pudieran imprimirse sin soporte o fueran fácilmente adaptables para cumplir con ello.

Conectores

Este componente cuenta con ajustes interesantes. Por una parte, debe ser capaz de acoplarse a otro conector con un ajuste con apriete y por otro lado debe tener la holgura justa y necesaria para poder transferir correctamente el movimiento rectilíneo del vástago como movimiento circular para la rueda dentada.

No se tuvo que modificar para la impresión, pero es una pieza crítica por ser delgada y contar con detalles justos.

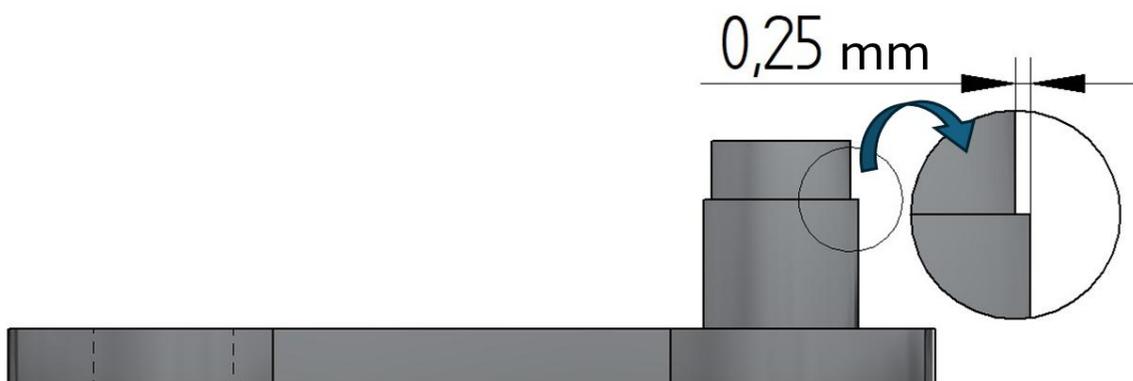


Figura 45. Detalle de piezas conectores de mecanismo de garras

Pinzas

Durante el funcionamiento del mecanismo, este componente es sometido a toda una serie de esfuerzos mecánicos. Para cumplir su función de agarre y manipulación de elementos externos, esta pieza se ve sometida a esfuerzos de compresión, tracción y flexión. Además de que la zona que está en contacto con el mecanismo está en constante fricción y por tanto sometida al desgaste. La impresión metálica de esta pieza resultó totalmente necesaria para poder alargar su vida útil.

Para poder realizar la pieza con la impresora FDM metal del proyecto, se tuvo que modificar parte del perfil de cremallera que se introduce en el mecanismo, no por su contacto con la rueda dentada, sino por su perfil en forma de H que desliza por el rail formado por las carcasas. Para evitar el uso de soportes, se curvó la parte del voladizo de este perfil.

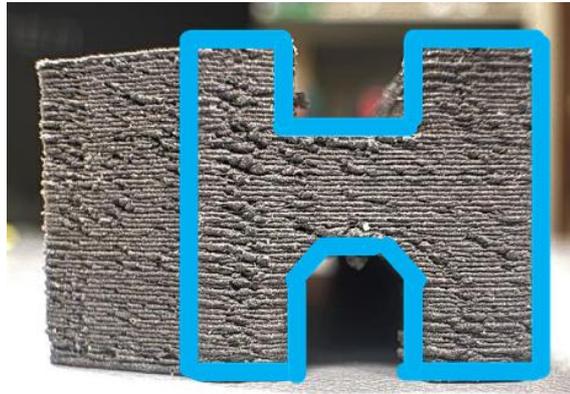


Figura 46. Perfil impreso en la cremallera de las pinzas

Ruedas dentadas

El elemento de transición entre el movimiento de los conectores hasta el contacto directo con la sección de cremallera dentada de las pinzas. Debe tener la holgura justa para cumplir su función.

Dado que se optó por imprimir las piezas metálicas sin necesidad de usar soportes de impresión, se tuvo que adaptar una nueva versión del conector para su nueva sección de unión con la rueda. Por otra parte, también se redondeó la sección en voladizo del perfil

lateral de los dientes, ajustándose para que pueda cumplir con el contacto justo y necesario con la cremallera dentada de la pinza.

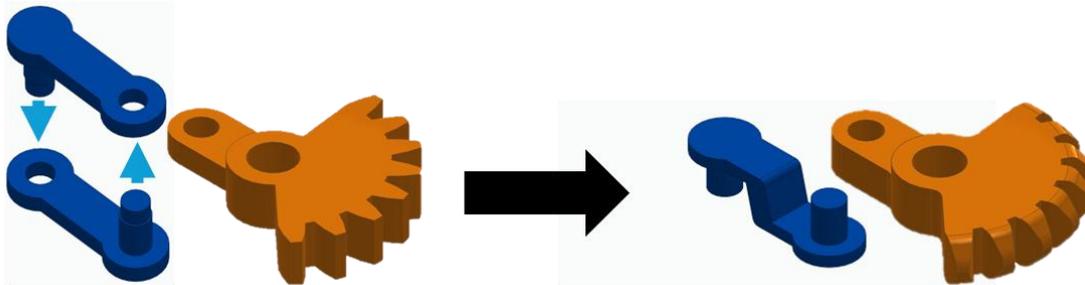


Figura 47. Rediseño CAD rueda dientes y conectores.

4.4 OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA

En esta sección queda desarrollado como, una vez obtenidas las piezas metálicas del mecanismo, se eligió una de estas para optimizar su geometría por una más orgánica y ligera.

4.4.1 ADAPTADA A LA IMPRESORA

Las pinzas fueron las piezas elegidas para optimizar topológicamente, dado que entre las mandadas a imprimir son las que tienen más potencial de aligeramiento.

Las pautas que seguir en el desarrollo de la obtención de la pieza por optimización topológica, (aplicable a cualquier proyecto de diseño generativo) fueron las siguientes:

- 1. Elección del software CAD para rediseño:** En este caso se ha utilizado Solid Edge.
- 2. Elección del material:** la pieza final debe ser de acero 17-4 PH sinterizado. Se dejó indicadas las propiedades generales de este material en el software.
- 3. Simulación estructural:** mediante el Método de Elementos Finitos (FEM – en inglés), se analiza la distribución de esfuerzos y las posibles deformaciones de la pinza cuando se aplican sus cargas de trabajo.
- 4. Diseño generativo:** se debe dejar indicados en la pinza una serie de parámetros:
 - a. Las cargas que se aplican y donde

- b. Las zonas que estarán fijas en la geometría
 - c. Regiones que se quieren conservar
- 5. Ejecución optimización topológica:** se itera con reducciones de masa hasta que se obtiene el resultado deseado. Dicho resultado suele orientarse al que da deformación estructural y tensiones máximas que entren dentro de lo que se busca.
- 6. Refinamiento de la optimización:** Dado que la geometría generada por el proceso de optimización suele ser rugosa, esta será suavizada para poder tener una pieza decente para imprimir. El software utilizado para ello es Altair Inspire.

Para poder hacer un estudio topológico decente aplicable a un caso de mecanismo real, se buscaron unas pinzas que pudieran cumplir con las siguientes características:

- Garra con sistema neumático
- Recorrido de cada diente: 20-25 mm
- Longitud de pinzas: 50 mm o mayor

Gracias al sistema de búsqueda del *grupo Zimmer* se pudieron encontrar las garras idóneas. Dichas garras soportan una fuerza de cierre horizontal de 150 N, así que esta será la fuerza que se aplicará a las garras de este proyecto.[24]



Figura 48. Pinzas ejemplo. Pinzas paralelas Serie GH6000

La carga fue aplicada en los dientes de la pinza, dientes los cuales se pidió que se conservaran en el proceso. Por otra parte, se eliminó para el estudio toda la región de la pinza que formaba la cremallera, ya que no se iba a modificar nada de esa región, así pues, se estableció como zona fija la cara de la pinza que va conectada directamente al perfil de cremallera.

Antes de ejecutar la optimización topológica, se pidió al software que mantuviera planas las caras paralelas a la base de impresión y que su región optimizada fuera constante en la dirección Z, ya que la pieza hay que adaptarla para imprimirla sin el empleo de soportes.[25]

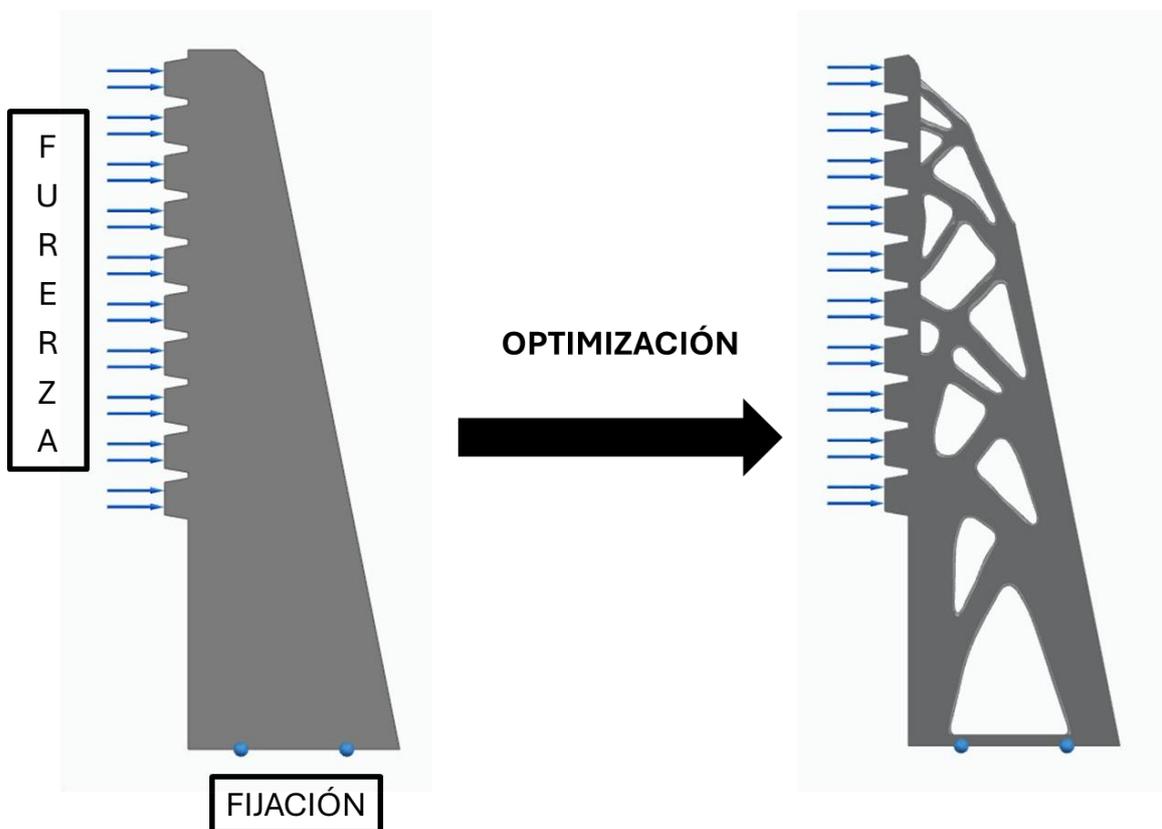


Figura 49. Inicio y final de optimización topológica de garras por diseño generativo en Solid Edge

Tras varias iteraciones, se pudo llegar a una reducción de masa de hasta el 35% (para reducciones mayores entran en conflicto las restricciones). La tensión máxima analizada es de 31.6 MPa, que queda bastante inferior de la tensión máxima admisible de 555 MPa (aplicado coeficiente de seguridad de grado 2 para el límite elástico del material, 1110 MPa).

Para la obtención del modelo final, el software CAD de Altair Inspire sirvió para suavizar la geometría optimizada y para poder juntarla con la parte de cremallera que fue retirada antes de ejecutar la optimización. [26]

4.4.2 CASO DE SOPORTES NECESARIOS

A lo largo de la redacción de este proyecto se ha repetido en varias ocasiones que toda impresión hecha con la tecnología FDM metálica, debe hacerse siempre evitando el uso de soportes. Esto se debe, no al rendimiento de la impresora, sino a una cuestión práctica.

Si los componentes impresos hubieran necesitado soportes, estos no se deberían retirar hasta haber finalizado la fase de sinterizado ya que, de no contar con ello, las partes en voladizo cederían por gravedad durante el horneado y esto provocaría la aparición de grietas o la partición completa de secciones de la pieza, echando a perder todo el proceso anterior. Sin embargo, de haber dejado los soportes, estos terminarían sinterizándose a la pieza y dado que el conjunto final es un componente de acero, el postproceso se convierte en una acción tediosa, complicada y larga, aún más si la pieza tiene soportes en partes de difícil acceso.

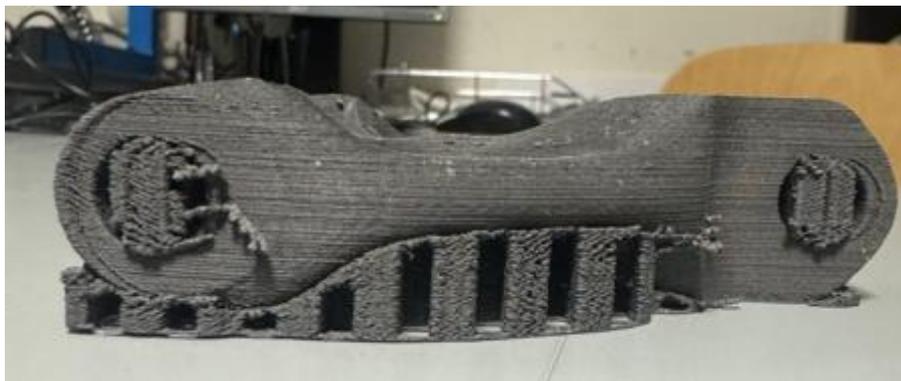


Figura 50. Pieza impresa en FDM Metal en estado “verde” con soportes.

La difícil eliminación de soportes es un problema que afecta seriamente no solo al proceso de piezas metálicas, sino que es un problema que se arrastra desde el principio del uso de la tecnología FDM. Lo bueno es, que ya se han empezado a aplicar soluciones útiles. Ejemplo de ello es, en materiales plásticos, el empleo de filamentos de distinta composición entre soporte y pieza, ya que materiales de distintos compuestos no se adhieren entre ellos.

Hoy en día, se cuenta con *slicers* que dentro de su código pueden contar con una pauta que es crear una interfaz que se interponga entre los soportes y la pieza de un filamento de un material distintos a estos, así cuando se obtiene la pieza esta se separa sin problema de los soportes y quedando en las partes apoyadas con un buen acabado.

Para los filamentos metálicos ocurre algo similar, se crea una barrera entre soportes y pieza que, al pasar por las fases de horneado, mantiene la separación soporte-pieza intacta.

La misma empresa que comercializa con el filamento Ultrafuse 17-4 PH, también cuenta con un filamento de aporte con el nombre de Ultrafuse Support Layer. Dicho filamento está hecho de un material polimérico que se quema por completo en la fase de desaglomerado y deja un hueco limpio entre pieza y soportes antes de sinterizarlo.

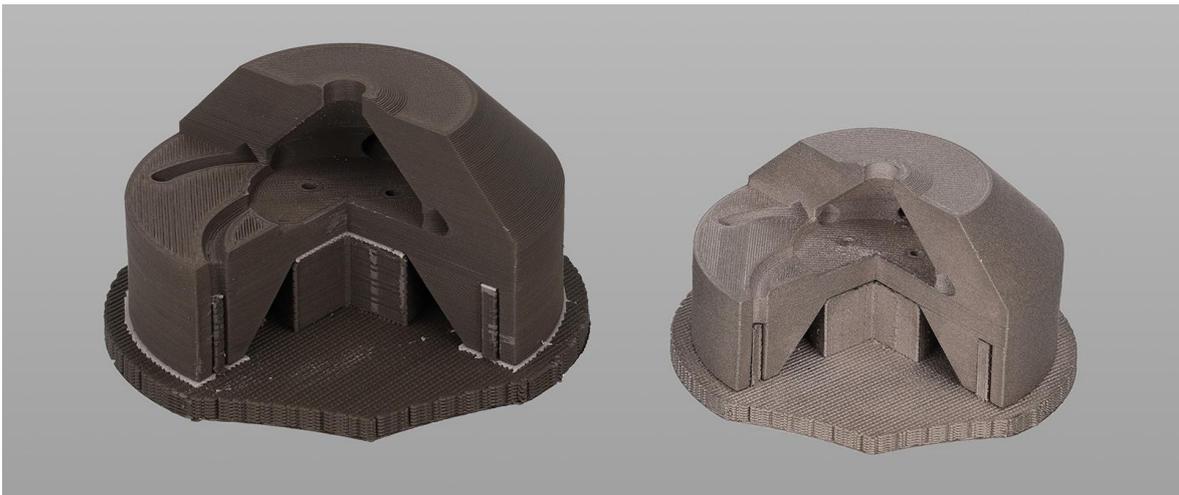


Figura 51. Pieza “verde” con interfaz en soportes y pieza “gris” ya sin interfaz y soportes separados

Aunque esta solución es la más viable, no es accesible para cualquier impresora. Para poder imprimir la capa de aporte, se debe poder contar con un sistema de doble extrusión (dos extrusores, uno por cada filamento distinto) y la impresora utilizada solo usa uno. La instalación de un segundo extrusor se escapa de las limitaciones y plazos establecidos para este proyecto. Es por eso por lo que se ha ideado un sistema que podría servir para todo tipo de impresoras de FDM metálica que no cuenten con doble extrusión:

El proceso desarrollado consistió en lo siguiente:

1. Se extruye un perfil en plano de la cara de la pieza que queda orientada hacia la cama. Para ello se ha utilizado Solid Edge.
2. Se atraviesa el modelo de la pieza con el modelo del perfil extruido, de tal manera que no queden partes en voladizo y que la pieza no sobresalga por la parte inferior de la extrusión.
3. Se aplica un corte en el modelo extruido usando el modelo de la pieza que lo atraviesa como herramienta de corte. Obteniéndose la base de apoyo de la pieza.
4. Se imprime la pieza, con soportes, y la base por separado, pero con los mismos parámetros y orientación.
5. Se retiran los soportes de la pieza
6. Se comprueba que base y pieza encajan.

Para este pequeño experimento se ha utilizado el modelo de una pieza ya optimizada por la entidad universitaria y como interfaz entre la base y la pieza se ha utilizado se ha usado una emulsión de zirconia, creando una película cerámica que durante los horneados se endurece y se convierte en una barrera deslizante entre la pieza y el soporte, por lo que no limita la compresión de las partes durante la sinterización. También se puede emplear alúmina en su lugar. En la figura 51 queda indicado en rojo las zonas con la emulsión de zirconia.

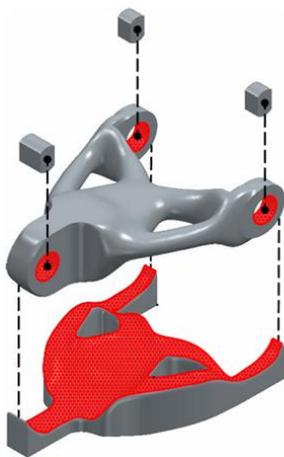


Figura 52. Diseño CAD pieza con base de apoyo junto a su resultado final.

Para hacer la sección de corte en la base se ha utilizado Altair Inspire con la función de booleana y se ha pedido que dejara los bordes de corte suavizados.

4.5 CURADO DE LAS IMPRESIONES

Después de imprimir, se tienen las piezas en su estado verde, es decir, todavía la pieza está compuesta por polímero aglutinante y polvo metálico.

Para obtener las piezas finales hay que eliminar el polímero empleando un proceso de horneado, pero antes de iniciar ese proceso, hay que terminar de preparar las piezas.

4.5.1 POSTPROCESADO

Una de las ventajas que tiene el imprimir piezas con este tipo de filamentos es la facilidad que hay para manipularlos. La pieza en estado verde tiene una textura aparentemente cerámica y quebradiza, que lo hace ideal para la eliminación manual de defectos y soportes. Con el empleo únicamente de papeles de lija de distinto grano se puede dejar piezas con un acabado superficial bastante limpio.

Por otra parte, en el postprocesado también hubo que asegurarse de que la cara de las piezas que debían quedar tocando la superficie debían de estar totalmente lisas y aplanadas, ya que, según datos del fabricante, el más ligero resalto en la base de la pieza podría llevar a la rotura de estas en el proceso de sinterizado.[27]

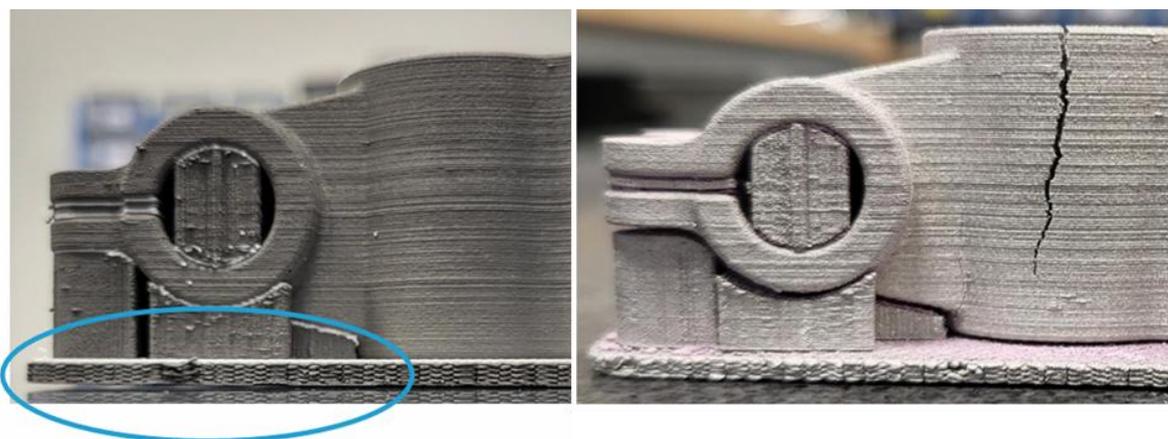


Figura 53. Aparición defecto por falta de contacto con la superficie. Forward AM

4.5.2 ENVIO PARA DESAGLOMERADO Y SINTERIZADO

Al principio del proyecto se planteó la idea de aplicar los procesos de desaglomerado y sinterizado usando los hornos disponibles en la universidad, pero dado que los hornos necesitaban unas características de ambiente y un flujo de temperaturas muy específicos, se descartó esta idea, ya que la aparición de complicaciones en el proceso era elevada y el correcto ajuste de los hornos daría pie a la creación de un nuevo proyecto al completo.

Para asegurar un buen horneado, se tomó la decisión de enviar las piezas a Elnik Systems, una empresa que tiene sus instalaciones en Alemania y que está acostumbrada a hacer procesos de desaglomerado y sinterizado de componentes hechos con filamento Ultrafuse 17-4 PH de la misma marca que se ha empleado en el proyecto.



Figura 54. Logo Elnik Systems. Forward AM

Cuando reciben las piezas, el proceso a seguir es el siguiente:

- Para el desaglomerado, se hornea las piezas a 120 °C con HNO₃ > 98 %. El polímero aglutinante reacciona con agentes oxidantes y se desprende.
- Para el sinterizado, las piezas se envuelven en una atmósfera con hidrógeno 100% limpio y seco. El ciclo de sinterizado sigue la siguiente rampa:
 1. De temperatura ambiente hasta 600 °C (5K/min) y mantener 1 hora
 2. De 600 °C hasta 1300 °C (5K/min) y mantener 3 horas
 3. Enfriamiento del horno (caída lineal) hasta temperatura ambiente

La figura 54 muestra gráficamente el perfil de temperatura del ciclo de sinterización.

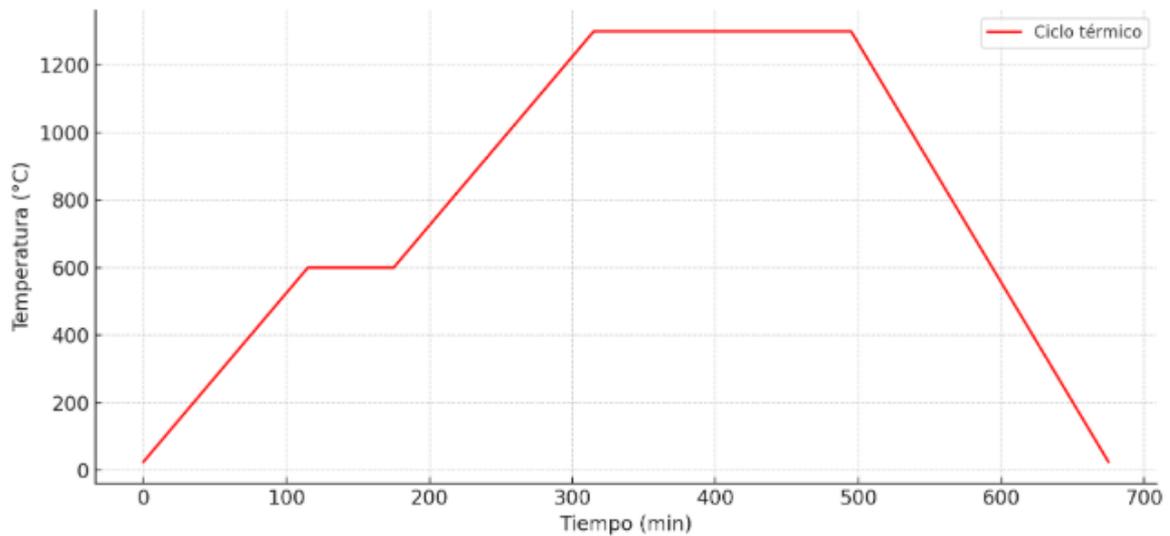


Figura 55. Gráfica temperatura/tiempo en ciclo de sinterización

La empresa alemana también se encarga de la emulsificación de la pieza que tiene base de apoyo en sustitución de los soportes.

Se creo una lista de envío con toda una serie de especificaciones necesarias por pieza. La lista queda adjunta en la memoria en la parte de anexos.

4.6 ENSAYOS FINALES

Ya una vez han vuelto las piezas completamente procesadas, en su estado de solo compuestas por acero inoxidable, se puede desarrollar la última parte del proyecto, los ensayos finales.

4.6.1 ENSAYOS TRACCIÓN DE PROBETAS

Las probetas para ensayar han sido fabricadas siguiendo una orientación de relleno respecto a la perpendicular de la dirección de tracción:

- 5 probetas con inclinación de relleno de 0°: **RELLENO HORIZONTAL**
- 5 probetas con inclinación de relleno de 45°: **RELLENO DIAGONAL**
- 5 probetas con inclinación de relleno de 90°: **RELLENO VERTICAL**

Hay que aclarar que, para el relleno diagonal, las probetas cambiaban la dirección de la diagonal capa por capa, lo que se podría entender también como un **relleno en zig-zag**.

Para estas pruebas, se ha utilizado una máquina de ensayo de la marca Ibertest, con una capacidad de 100 kN y usando unas mordazas de pinza.

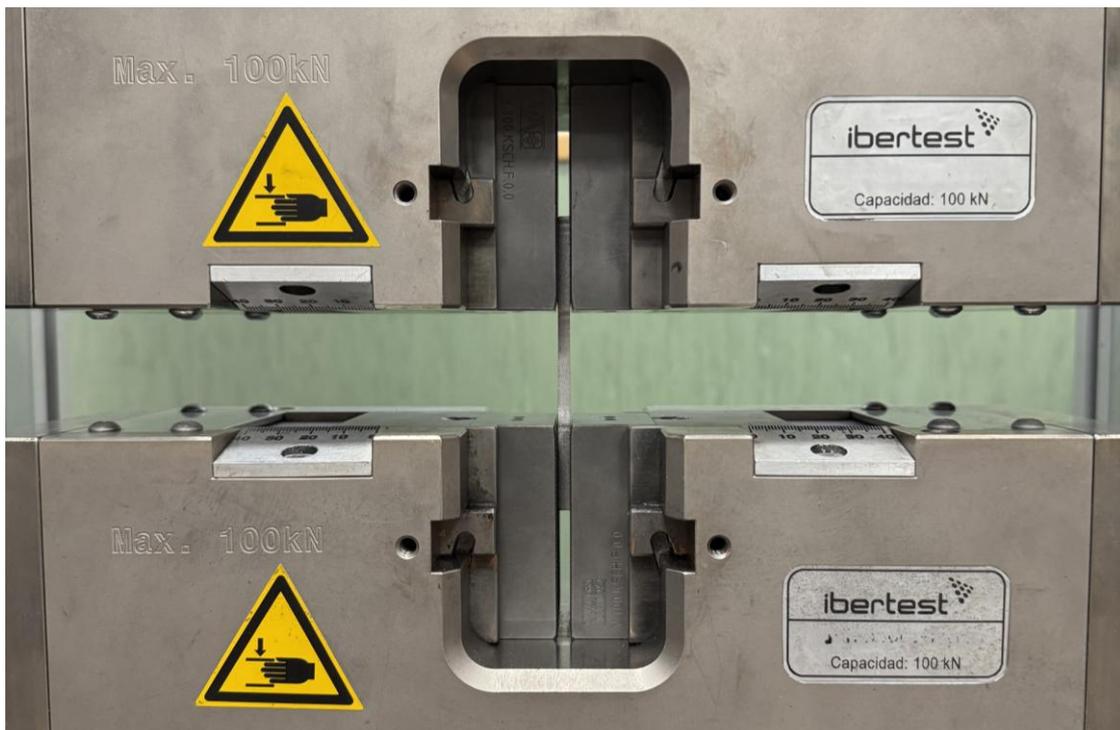


Figura 56. Máquina de ensayo. Ibertest

La máquina recogió los siguientes resultados en forma de datos agrupados:

- Tiempo del ensayo en segundos (s)
- Desplazamiento de las pinzas en milímetros (mm)
- Fuerza aplicada en kilonewtons (KN)

Estos datos, ayudan a hacer los cálculos necesarios para entender el comportamiento del material.

Por una parte, se quiere calcular la tensión de tracción de la probeta.

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

Donde:

$\sigma =$ Tensión normal (Mpa); $F =$ Fuerza normal (N); $A =$ área transversal (mm²)

Y, por otro lado, se quiere calcular la deformación.

$$\varepsilon = \frac{L - L_0}{L_0} = \frac{\Delta L}{L_0}$$

Donde:

$\varepsilon =$ deformación; $\Delta L =$ variación longitud (mm); $L_0 =$ longitud inicial (mm)

Con estos cálculos se pueden obtener gráficas de tracción-deformación y en ellas obtener los siguientes valores de interés:

- Resistencia máxima (Mpa): Pico más alto en la curva de la gráfica.
- Deformación máxima: punto más alejado de la gráfica hasta antes de rotura (cuando hay caída brusca de la tensión).
- Módulo de Young (Gpa): pendiente de la recta que se forma en la zona elástica lineal al comienzo del ensayo. Indica la rigidez del material.

Las probetas impresas y ensayadas siguen la norma ASTM E8/E8M para metales, cumpliendo con las siguientes características pedidas:

- Longitud útil/inicial (L_0) de 25 mm.
- Área transversal (A) de 38 mm².

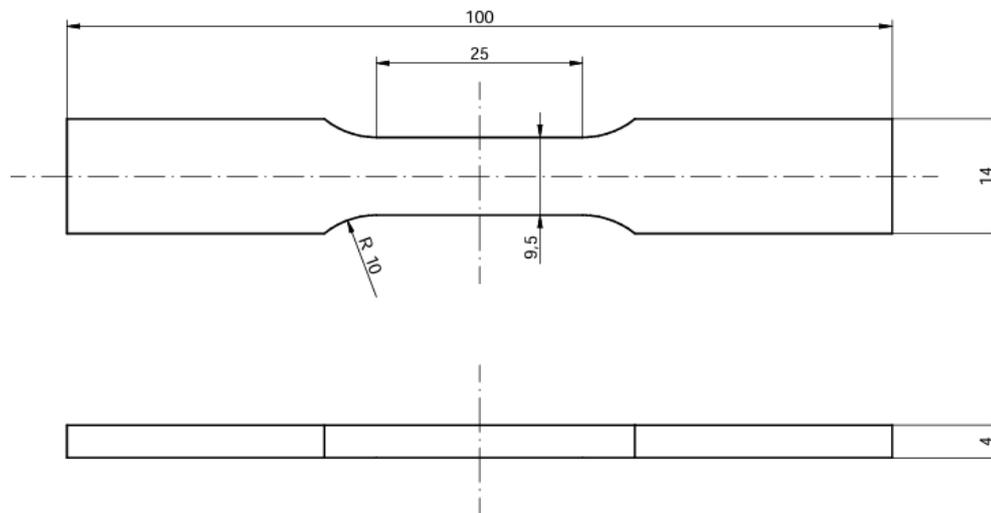


Figura 57. Acotación dimensional de probeta diseñada a partir de la norma ASTM E8/E8M

4.6.2 MONTAJE DEL MECANISMO

Llegado el momento, con los componentes ya solo con su composición metálica, era el momento de montarlos en el mecanismo.

Hubo dos componentes que llegaron con graves deformaciones, la pinza normal y su versión optimizada topológicamente. Es curioso como ambas pinzas presentaron los mismos defectos:

- Curvatura del perfil de cremallera
- Deformación en la forma de los dientes de la cremallera

En la figura 57 se hace evidencia de los defectos, poniendo las pinzas sobre su homólogo impreso en polvo.

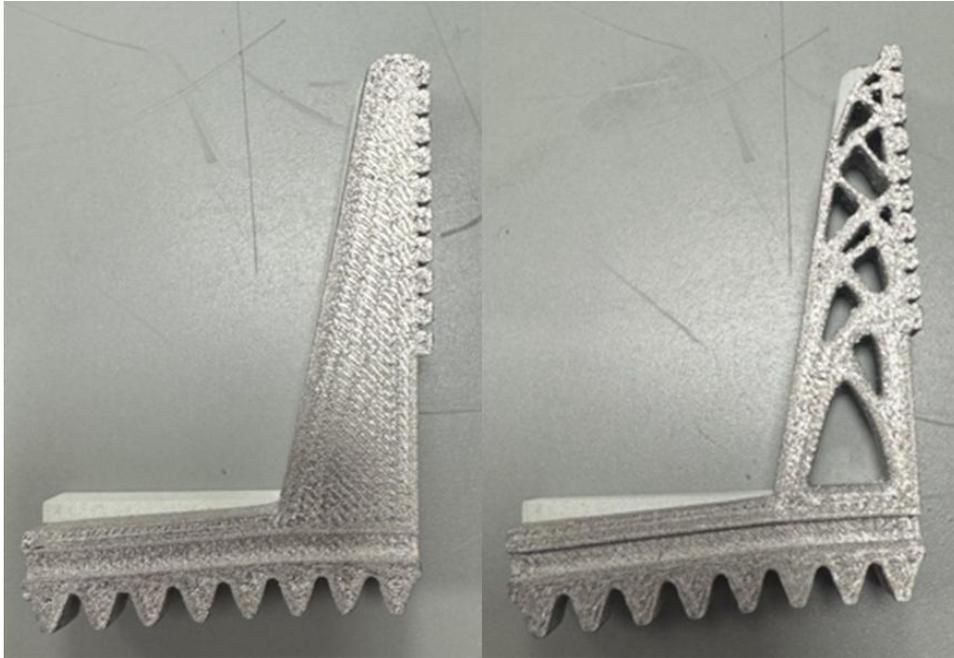


Figura 58. Visualización fallo en pinzas (normal y optimizada) tras sinterización

Estos defectos lo hacen imposible para el montaje en el mecanismo. A diferencia de las pinzas, el resto de los componentes solo necesitaron pequeños ajustes con lijas para formar parte del mecanismo como piezas totalmente funcionales.

Capítulo 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para este capítulo, se recogen y analizan los principales resultados obtenidos a lo largo del desarrollo del proyecto, con el objetivo de evaluar el rendimiento de la impresión metálica FDM, la calidad del material antes y después del postprocesado y la viabilidad de los componentes finales fabricados.

5.1 EFICIENCIA IMPRESORA

Una vez hechos todos los ajustes y correcciones posibles, se ha obtenido una impresora que cumple con una correcta impresión de los componentes pedidos. Es eficiente y gracias al sensor de calibración proporciona piezas con unos resultados geométricos bastante correctos. Como ejemplo de esto último estaría la capacidad de imprimir la pinza optimizada topológicamente, mostrada en la figura 58, haciendo posible imprimir todas las celdas orgánicas con gran resolución.



Figura 59. Pinza optimizada recién impresa

Otro ejemplo igualmente válido, es la obtención de la pieza optimizada con soportes, donde en la figura 59, se compara la última versión impresa con la anterior que sufrió el fallo de impresión.

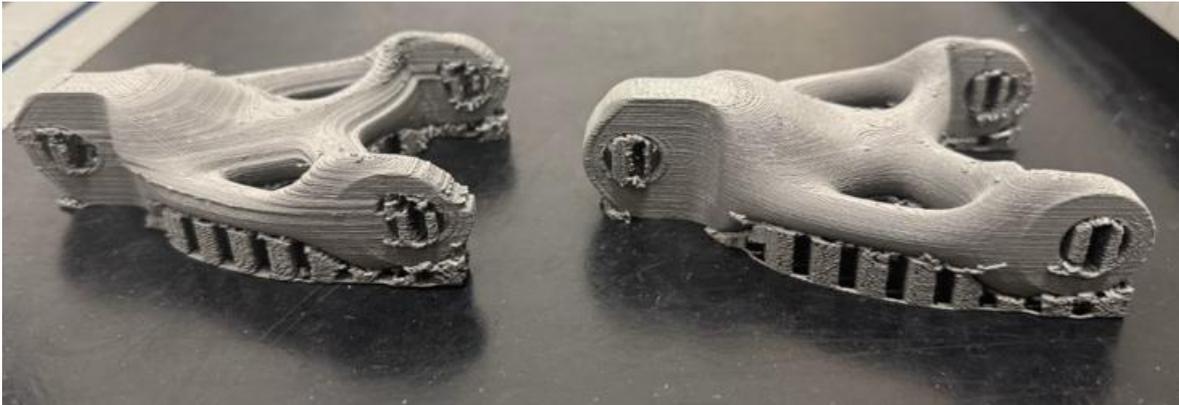


Figura 60. Comparativa de impresión con errores e impresión corregida (de izquierda a derecha)

Por otra parte, a nivel de tiempos de impresión, la impresora es muy lenta. Cada vez que se cargaba un componente, la impresora tardaba unos 19 minutos en prepararse. Ese tiempo se deriva en:

- 0:00 – 11:20. Calentamiento de la cama hasta que llega a 90 °C.
- 11:20 – 15:30 Calibrado de la superficie de impresión punto a punto.
- 15:30 -19:01 Cama y extrusor ajustados a temperatura de impresión.

Dentro de las desventajas más relevantes también está el disparo repentino de la temperatura de la cama de una temperatura objetivo de 90 °C a una de 140 °C. Este error es el más grave porque obliga al usuario a estar pendiente para corregirlo manualmente, porque de no hacerlo, la cama llegaría a su temperatura máxima y podría provocar defectos irreparables en la impresora.

5.2 VALORACIÓN DE PROBETAS

Para empezar, las probetas que han vuelto ya sinterizadas cumplen con el tamaño de diseño deseado con un margen de error dimensional de unos ± 0.2 mm, a excepción de algunos

casos aislados que se van hasta ± 0.8 mm. Por otra parte, se ha comparado el peso de todas y cada una de las probetas y el resultado ha sido bastante equitativo. Dejando en la tabla 5 reflejado el margen de variación.

<i>Probetas en verde (antes de sinterizado)</i>	<i>Probetas en gris (después de sinterizado)</i>	<i>Diferencia</i>
36 gramos	32 gramos	11,11%

Tabla 5. Variación peso de probeta verde a probeta gris

A la hora de preparar los datos en la figura 60 quedan presentes los resultados de las probetas que mejor resistencia han tenido de entre las ensayadas. Hay tres resultados porque cada probeta elegida ha sido la mejor dentro del tipo de orientación de relleno.

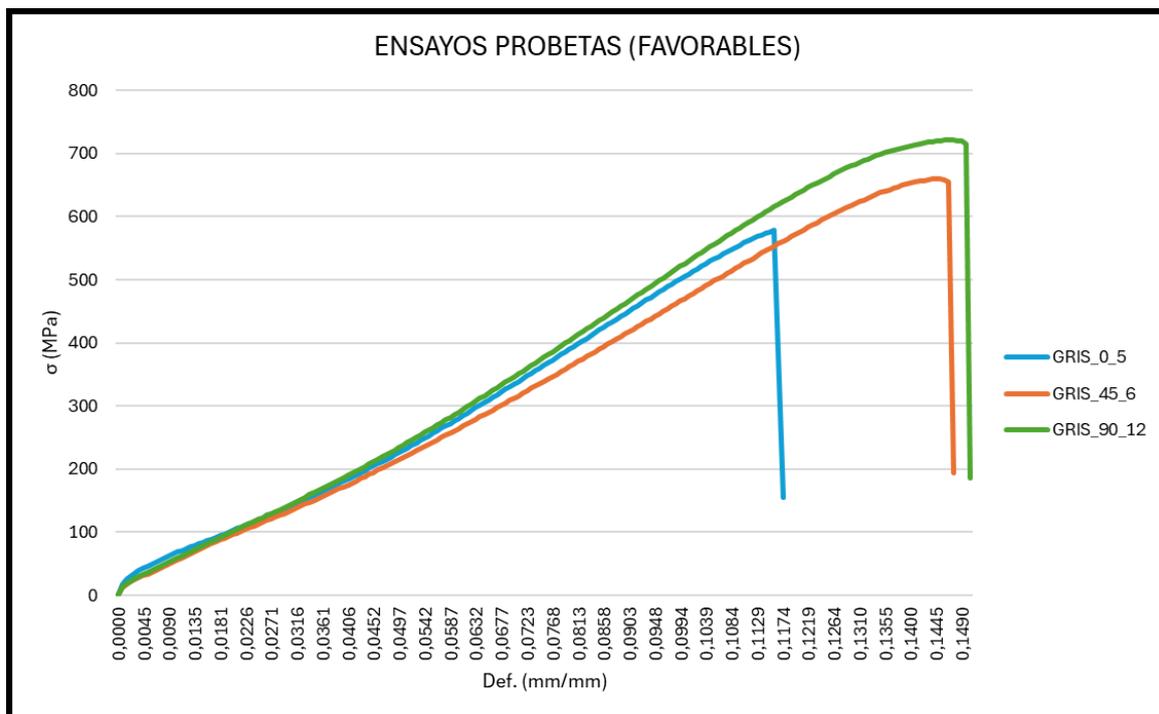


Figura 61. Gráfica de ensayos tracción más favorable de cada categoría de probeta

Los resultados de la gráfica entran dentro de lo esperado para su geometría estructural, observándose que la probeta con mayor resistencia es la rellena con capas de líneas a 90°

de la perpendicular del esfuerzo de tracción, es decir, longitudinal al esfuerzo y la que rompe antes es aquella con un relleno a 0° de la perpendicular, transversal al esfuerzo aplicado.

La Tabla 6 es una tabla Excel donde queda comparado la suma de todos los resultados de las probetas con los datos que interesaban de estudio.

	GRIS_0		GRIS_45		GRIS_90	
	MEDIA	DESV. ESTAND.	MEDIA	DESV. ESTAND.	MEDIA	DESV. ESTAND.
Resistencia atracción (MPa)	532,17	62,12	630,79	45,23	672,70	35,24
Módulo de Young (GPa)	22,09	0,85	17,25	1,69	19,11	0,96
Deformación máxima	10,89	1,03	13,79	1,16	14,21	0,73

Tabla 6. Tabla de resultados de los ensayos de tracción. Media y desviación típica

Comparando los resultados con los parámetros del fabricante aparecen discrepancias importantes.

Dirección de impresión	Norma	XY	
		Plana	
Resistencia a la tracción	ISO 6892-1		
Ultrafuse® 17-4 PH ¹		990 MPa / 143.6 ksi	1276 MPa / 185.1 ksi ³
Módulo de Young	ISO 6892-1		
Ultrafuse® 17-4 PH ¹		191000 MPa / 27702 ksi	198000 MPa / 28718 ksi ³
Alargamiento a la rotura	ISO 6892-1		
Ultrafuse® 17-4 PH ¹		4 %	6 % ³

Figura 62. Tabla de ensayos tracción con Ultrafuse 17-4 PH según fabricante. Forward AM

Aunque el tipo de probeta utilizado sea distinto, los resultados no deberían salir tan dispares. Comparando con otros proyectos externos es verdad que los valores de resistencia de tracción se pueden asemejar a los ensayos del proyecto, sin embargo, estos resultados de resistencia entran dentro de la gamma de los menos resistentes dentro de lo esperado, lo que puede deberse a porosidades internas o deformaciones inesperadas en el interior de las probetas.

Lo realmente preocupante aparece en el módulo de Young, que independientemente de los resultados de fuerza, este debería ser como mínimo de 191 GPa para piezas de acero 17-4 PH y en los ensayos los resultados son casi 10 veces menores de lo esperado. Aun así, se

descubrió que hay una respuesta razonable para ello. Si se analiza en profundidad, todas las probetas ensayadas muestran valores similares entre ellas, como bien se muestra en la tabla 6, por tanto, no es un error de fabricación, sino de la metodología de medición.

Gracias a la investigación en foros y distintos estudios externos, se ha podido hallar otros ensayos de tracción con los mismos problemas en el módulo de Young, los cuales, en todos los casos, eran causa de no usar extensómetro en las mediciones. Al no haber extensómetro, la deformación se midió a partir de desplazamientos de la máquina, donde puede haber holguras o deformaciones de las pinzas y, por tanto, se introduce una sobreestimación sistemática en todo el ensayo. Esto explica también porque la deformación obtenida (~13 %) supera ampliamente el 4–6 % típico reportado por el fabricante. Como resultado, la deformación aparentemente es mayor de lo real, inclinando más la curva inicial de los ensayos, reduciendo significativamente la pendiente y con ello el cálculo del módulo de Young.

Dado que es un error que afecta a todas las probetas por igual, los valores obtenidos servirán para realizar comparativas entre sus distintas orientaciones de relleno y entre distintos estados, probetas verdes, sin sinterizar, probetas grises, sinterizadas.

Y para poder contrastar estos datos, las figuras 62, 63 y 64 mostrarán una media de resultados de cada categoría de probetas acompañado de su desviación típica. No se han comparado datos de resistencia a cesión porque las probetas han tenido deformación plástica nula, presentando una ruptura casi elástica, lo que es muy raro en aceros, pero al ser por impresión FDM, posiblemente esto sea consecuencia de esa porosidad residual mencionada anteriormente, lo que daría también sentido a no poder alcanzar la resistencia a tracción adecuada.

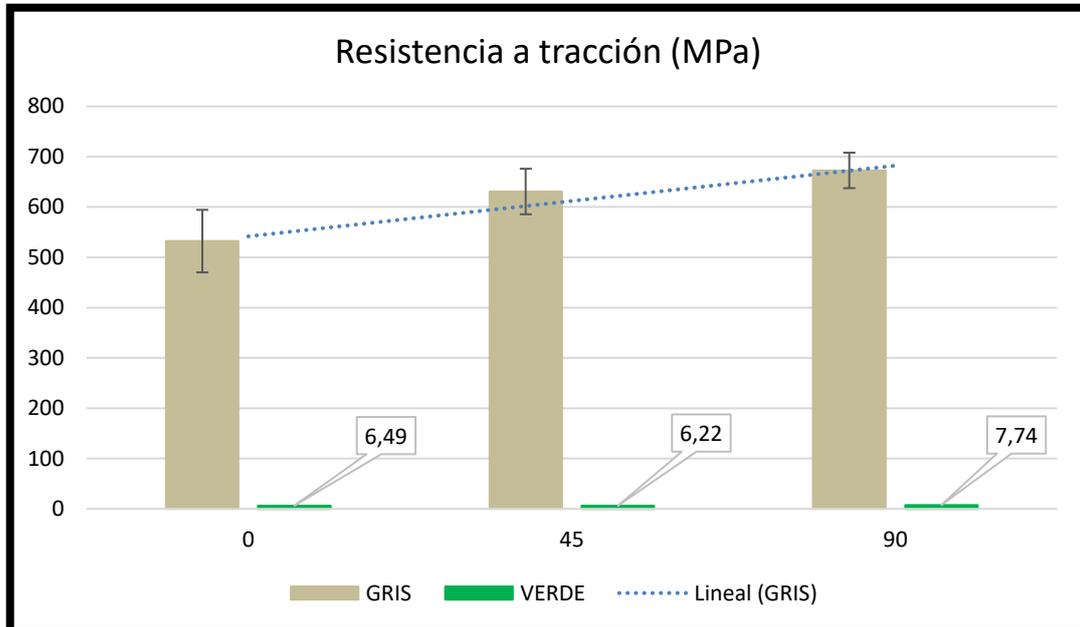


Figura 63. Gráfico de barras resultados resistencia a tracción. Probetas “gris” y “verde”

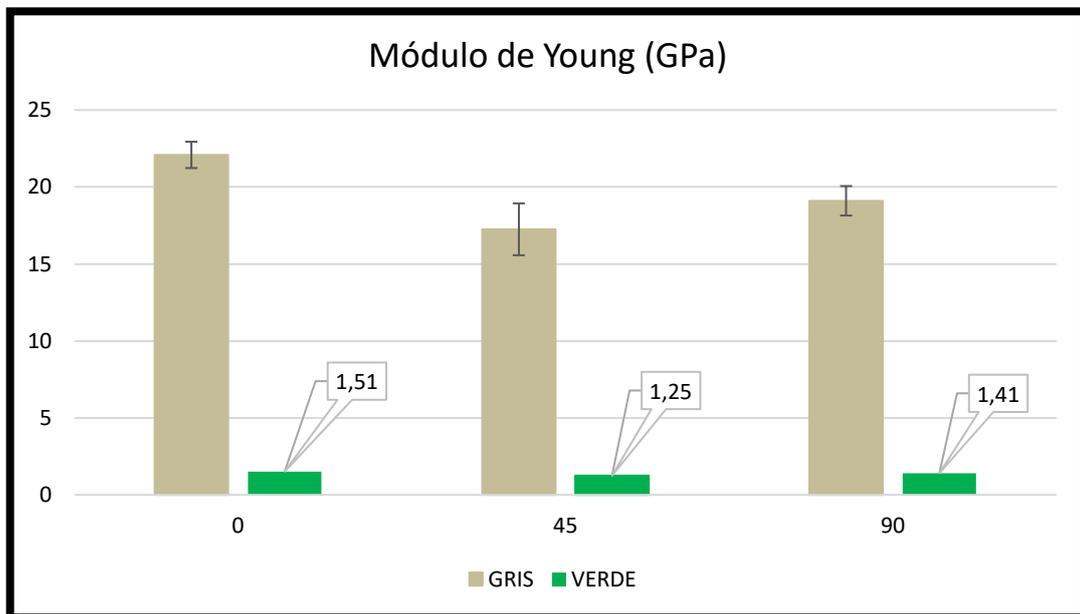


Figura 64. Gráfico de barras resultados módulo de Young. Probetas “gris” y “verde”

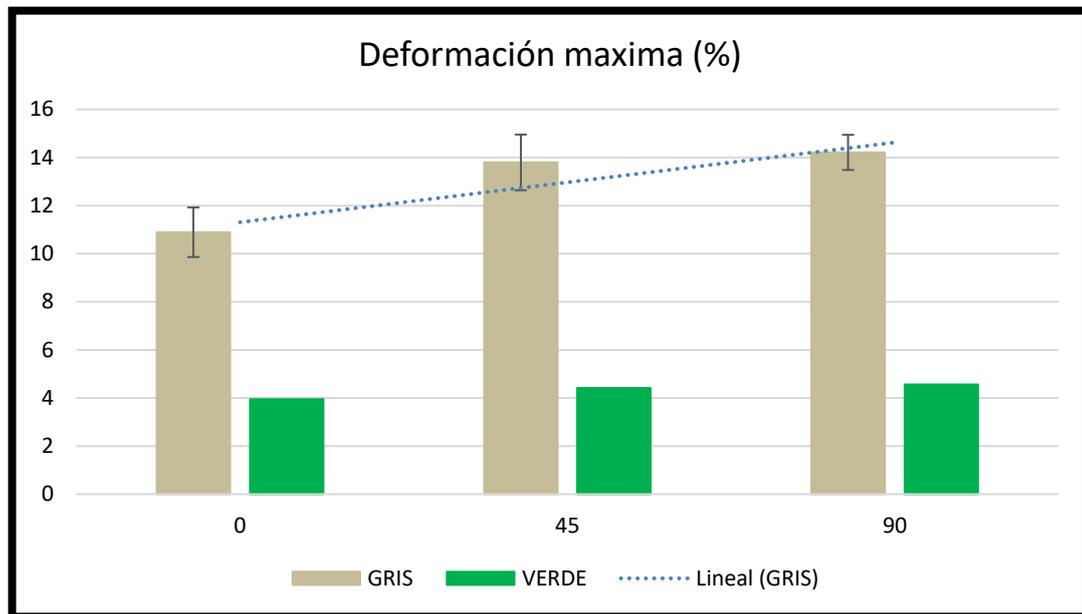


Figura 65. Gráfico de barras resultados deformación máxima. Probetas “gris” y “verde”

Comparando las probetas grises entre sí, se puede apreciar como tensión y deformación máxima aumentan progresivamente según el relleno va más orientado en la dirección de aplicación de la fuerza, lo que tiene sentido cuando se comparan fuerzas longitudinales frente a transversales, por lo que, mecánicamente hablando, las probetas tienen buen funcionamiento.

Queda evidente como las probetas verdes tienen valores ridículamente pequeños en comparación con las probetas grises, lo que tiene sentido ya que, en las probetas verde, el polvo metálico de las probetas tiene poca influencia mecánica mientras que es la malla formada por el aglutinante polimérico el que aplica resistencia en el ensayo. Por tanto, el comportamiento de las probetas verdes se acerca más al de una pieza hecha por termoplástico que por metal.

5.3 CALIDAD DE COMPONENTES FINALES

A excepción de las probetas, el resto de los componentes que se imprimieron tenían un relleno del 50% con patrones giroide en su mayoría y algunos con relleno rejilla.

Gracias al postproceso que se llevó a cabo tras la impresión, no aparecieron fallos de rotura críticos en ningún componente. Lo que tampoco evita la aparición de fallos dimensionales.

Componentes mecanismo

A excepción de las pinzas, el resto de los componentes cumplieron dimensionalmente, solo aparecieron ligeros errores:

- En la rueda dentada, el ajuste de unión de la carcasa tenía un poco de apriete, revisando el orificio de la rueda, solo necesitó ajustarse unos 0.5 mm con una lima para darle la holgura necesaria.
- Los conectores cuentan con la suficiente holgura para transformar movimiento lineal del vástago en circular para la rueda dentada. También encajan bien unos con otros, aunque el ajuste por apriete es menor del esperado. Se llegaron a imprimir cuatro conectores, de entre los cuales hay algunos que encajan directamente sin ningún tipo de apriete.

Como se ha comentado en apartados anteriores, la única impresión que ha venido con fallos graves es la pinza y su versión optimizada. Aunque visualmente parezca todo correcto, la sección de cremallera quedó ligeramente curvada, lo que provoca que no pueda desplazarse sobre el rail de las carcasas y menos aún hacer juego de engranaje con las ruedas dentadas. Tras analizar el fallo, se llegó a la conclusión de que la causa responsable fue la aparición de fricción adhesiva entre la pieza y la superficie del horno durante el sinterizado.

Cuando la pieza está siendo calentada, aún puede tener restos del aglutinante que en altas temperaturas hace que la superficie de la pieza se vuelva en parte pegajosa. Al estar la pieza en contacto directo con la superficie, puede adherirse y dificultar su desplazamiento durante la contracción volumétrica. Aquellas zonas de la pieza con mayor área de contacto con la superficie quedarán más adheridas que las de menos, lo que dará lugar a tensiones diferenciales entre estas zonas provocando flexión en la pieza y curvando distintas secciones.

En el caso de las pinzas, la zona de menor área de contacto y que no quedo adherida fue el perfil de cremallera, por eso es la única zona que presenta curvatura hacia abajo y por eso se repite en ambas pinzas.

Aun existiendo el fallo estructural en las pinzas, se empleó una pistola de aire caliente, mordazas y martillos de cabeza de goma para corregir la desviación. Se consiguió corregir la desviación casi al completo, pero en consecuencia por el calentamiento de la pistola y las repetidas colisiones con los martillos, acabaron apareciendo grietas pronunciadas en el cuerpo de las pinzas, lo que inevitablemente afectará a su rendimiento. El ajuste final del perfil se consiguió limando con intensidad las partes del perfil que entraban en contacto con el rail de las carcassas (tratando de dejarlo lo más paralelo posible a dicho rail) y parte del cuerpo lateral de los dientes de la cremallera que entran en contacto con los de la rueda dentada (ya que, al seguir ligeramente curvo, hace que parte de los dientes se presionen más que otros en el sistema de engranaje). Dicho problema se podría haber evitado pidiendo que emulsificaran de la pieza la cara de contacto a la superficie.

Una vez terminados todos los ajustes, se tiene un mecanismo que cuenta con algunas partes metálicas en combinación con otros componentes impresos en 3D y que presenta una fluidez mecánica suficientemente decente.

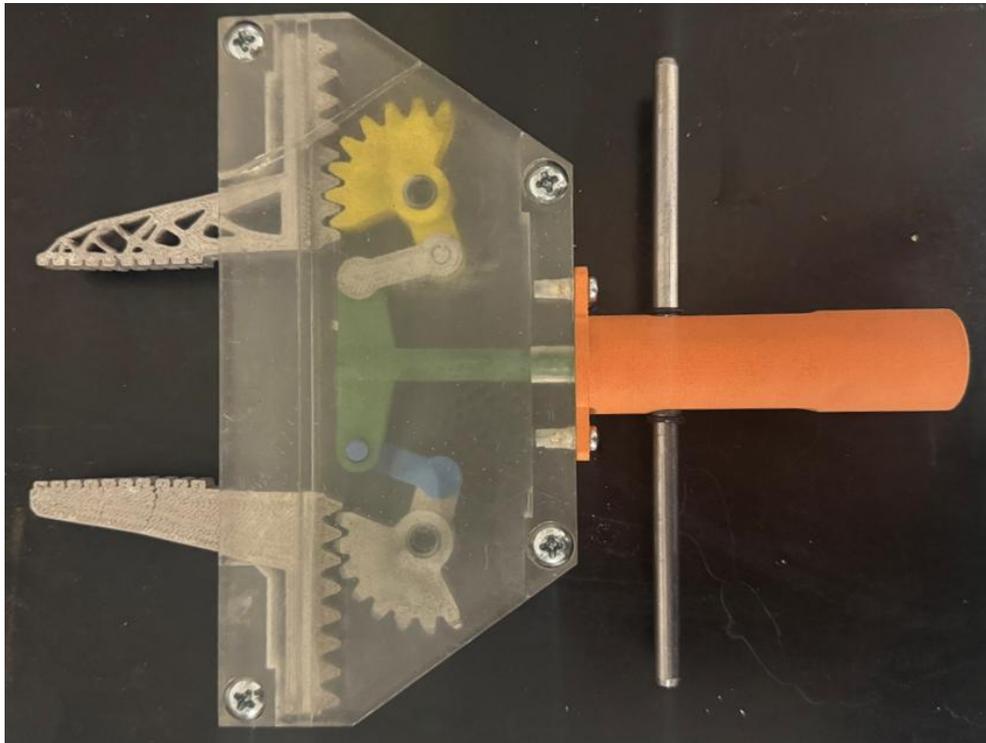


Figura 66. Mecanismo de garras final con partes fabricadas con tecnología FDM Metálica

Por curiosidad, se pesó el mecanismo de garras antes y después de incorporar los componentes hechos en acero. Las garras originales pesaban 290 gramos y la última versión con sus partes de acero pesa 390 gramos, lo que se acaba traduciendo en un aumento de 100 gramos, lo que tiene sentido porque el acero es más denso que cualquier material polimérico.

Experimento pieza optimizada con base de apoyo

Como se puede observar en la figura 66, tanto la base como la pieza tienen parte de la emulsión de zirconia. En la base no supone un problema, ya que es un elemento de sacrificio, por eso su superficie de apoyo se lijó hasta el límite antes de enviarla al horneado, por lo que la aparición de grietas en su parte inferior también es de esperar. Pero el componente no se puede dejar así, es por ello por lo que se metió en una cámara que chorrea aire con arena, que sirve para limpiar ese polvo sobrante de la pieza.



Figura 67. Modelo experimento soporte sinterizado y limpiado

A nivel de acabado ha tenido muy buenos resultados, sin embargo, las partes más delgadas han quedado ligeramente curvadas y esto se debe por la compresión en el sinterizado, por lo que se podría haber evitado añadiendo paredes gruesas laterales en la base. En la figura 67 se puede apreciar el defecto mencionado, donde la pieza inferior es una versión hecha por fundición y la superior es la versión sinterizada.



Figura 68. Comparativa modelo por FDM Metal (parte superior) con modelo por fundición

Capítulo 6. CONCLUSIONES

6.1 ANÁLISIS RESULTADOS PROYECTO

Con este proyecto se ha conseguido dar valor al uso de una tecnología de fabricación aditiva, FDM para piezas metálicas, de fácil manejo, montaje y más accesible, por su bajo coste, para empresas y particulares.

La impresora, aunque eficiente, debe mostrar algún defecto de calibración por lo cual las probetas ensayadas no cumplen con las resistencias mínimas esperables, aunque mecánicamente presentan buenos resultados, por lo que, con más variedad de ensayos de calibración se puede llegar a corregir dicho problema.

A nivel de funcionamiento tiene una preparación de impresión lenta (19 minutos) y está también el error de disparo de la temperatura objetivo de la cama a 140 °C. Aunque son defectos corregibles al principio del proceso, ya que la actualización del nivelado automático ha conseguido dar impresiones muy completas.

La obtención de piezas más ligeras disminuyendo el relleno es posible siempre y cuando se entienda como prepararla para que no sufra su integridad estructural. En este caso, la impresión de componentes con un relleno del 50% es totalmente viable. Y no solo eso, sino que también un correcto entendimiento del material puede permitir imprimir piezas que necesitarían soportes sin necesidad de contar con un sistema de doble extrusión, lo que abre aún más el abanico de impresoras FDM disponibles.

Y lo más importante, componentes del mecanismo impresos con FDM metálica en su mayoría válidos con una calidad de funcionalidad asegurada. Caso crítico de las garras, pero fácilmente corregible una vez se entiende bien lo que puede suceder durante las fases de desaglomerado y sinterizado. De enviar las mismas pinzas impresas ya no habría el mismo error.

A nivel educativo y personal, se considera que ha sido un proyecto bastante completo donde se ha adquirido un amplio conocimiento del mundo de la impresión metálica, se ha aprendido a llevar a cabo el montaje y funcionamiento de una impresora FDM, probar todo tipo de experimentos tanto con probetas de ensayo como con piezas metálicas y poder rediseñar un mecanismo completo junto con diseño generativo para demostrar la calidad de resultados del proyecto.

6.2 COSTES PROYECTO

Dada la naturaleza de este proyecto, se hace necesario hacer un análisis de coste completo para valorar lo que ha supuesto el desarrollo de éste. Dichos costes van orientados al volumen de impresiones que se han debido llevar a cabo para el éxito del estudio, tanto prototipos iniciales como piezas funcionales finales. Para ello, se analizarán costes según los distintos tipos de tecnologías de fabricación aditiva empleadas, donde se tendrán en cuenta los tiempos de impresión, cantidad de materiales usados y costes de mantenimiento y energéticos de las distintas impresoras.

En el capítulo de anexos quedan indicadas las propiedades técnicas de las impresoras utilizadas a parte de la montada en este proyecto.

En su totalidad, los costes del proyecto alcanzan los 1.053,18 €.

Por otro lado, hay que diferenciar los costes del proceso completo de la obtención de piezas metálicas. Teniendo en cuenta la impresión (tiempo, material y energía), los procesos de horneado (desaglomerado y sinterizado) y el transporte para llevar las piezas a hornear, se obtiene un coste total de 690,21 €.

A través de repositorios online de coste de fabricación, se ha calculado cuanto habría sido el coste de la impresión metálica si se hubiera hecho con DMLS, elevándose los costes hasta 2.125,86 € y eso solo mandando a imprimir las probetas de ensayo. Gracias a este cálculo, que aun siendo una estimación no se aleja de la realidad, queda respaldada la reducción de costes de la tecnología FDM frente a uno de sus homólogos más usados en la actualidad.[28]

6.3 TRABAJOS FUTUROS. RECOMENDACIONES

Para concluir este proyecto, se presenta una lista de propuestas que darán pie a mejoras en el estudio realizado:

- Mejorar aspecto físico y seguridad de la impresora FDM metálica. Actualizar componentes y placa base.
- Más ensayos de impresión para mejorar flujos y velocidades de impresión.
- Arreglar disparo de temperatura objetivo de la cama caliente.
- Incorporar sistema de doble extrusión para filamento de soporte y así evitar rediseñar soportes para los procesos de desaglomerado y sinterizado.
- Ensayar impresiones de piezas metálicas con distintos rellenos (reducir masa) hasta encontrar el caso más crítico.
- Probar con más filamentos con polvo metálicos y hacer la practicar con los hornos de la entidad universitaria. Se ha encontrado el catálogo de un comerciante, *The Virtual Foundry*, con gran variedad de filamentos metálicos, incluido un filamento de acero inoxidable 17-4 y supuestamente, fases de horneado más simples que las vistas con el material del proyecto *Ultrafuse 17-4 PH*.

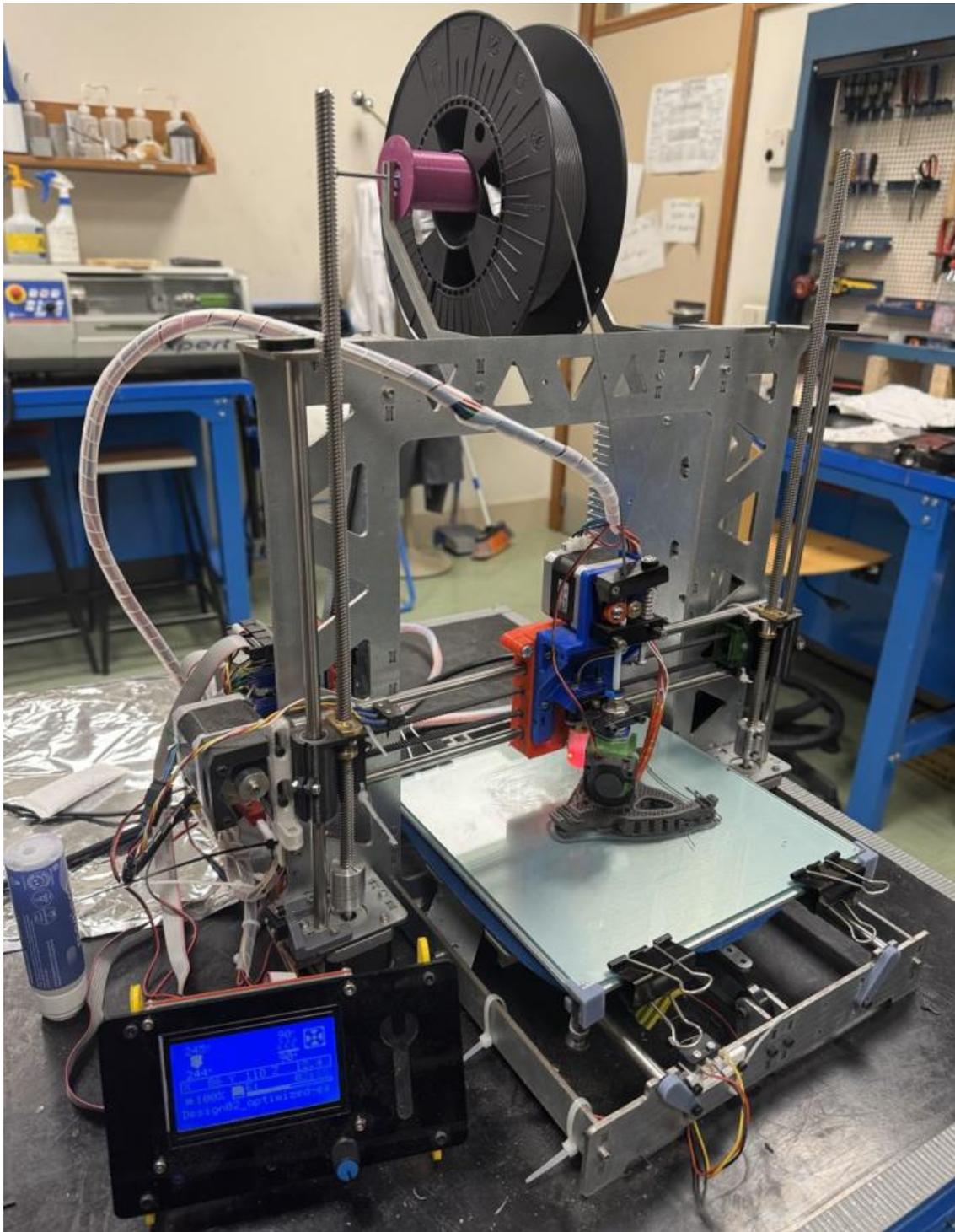
BIBLIOGRAFÍA

- [1] «Objetivos y metas de desarrollo sostenible - Desarrollo Sostenible». Accedido: 20 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
- [2] «Crecimiento económico - Desarrollo Sostenible». Accedido: 22 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/economic-growth/>
- [3] «Infraestructura - Desarrollo Sostenible». Accedido: 22 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/infrastructure/>
- [4] «Consumo y producción sostenibles - Desarrollo Sostenible». Accedido: 22 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/sustainable-consumption-production/>
- [5] «Alianzas - Desarrollo Sostenible». Accedido: 22 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/globalpartnerships/>
- [6] L. S. Escalona, «MECÁNICA DE PIEZAS DE ACERO INOXIDABLE OBTENIDAS MEDIANTE IMPRESIÓN 3D», n.º 3.
- [7] «Understanding Additive Manufacturing vs Subtractive Manufacturing - Goldsupplier». Accedido: 22 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://blog.goldsupplier.com/additive-manufacturing-vs-subtractive-manufacturing/>
- [8] H. Ramazani y A. Kami, «Metal FDM, a new extrusion-based additive manufacturing technology for manufacturing of metallic parts: a review», *Prog Addit Manuf*, vol. 7, n.º 4, pp. 609-626, ago. 2022, doi: 10.1007/s40964-021-00250-x.
- [9] R. C. Pack y B. G. Compton, «Material Extrusion Additive Manufacturing of Metal Powder-Based Inks Enabled by Carrageenan Rheology Modifier», *Adv Eng Mater*, vol. 23, n.º 2, feb. 2021, doi: 10.1002/adem.202000880.
- [10] «Powder Bed Fusion (PBF) | ACAM Aachen | Navigating AM Complexity». Accedido: 22 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://acam.rwth-campus.com/powder-bed-fusion-pbf_/
- [11] «DED kit | Prima Additive». Accedido: 22 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.primaadditive.com/en/technologies/direct-energy-deposition/ded-kit>
- [12] A. Choudhari, A. Kumar, H. Liang, y T. Borkar, «Binder jetting additive manufacturing of AISI M2 tool steel: Investigating the influence of sintering parameters on wear behavior», *Wear*, vol. 576-577, p. 206094, ago. 2025, doi: 10.1016/j.wear.2025.206094.
- [13] «Catalyzing Commercialization: Additively Manufactured Pure Copper Revolutionizes Thermal Management | AIChE». Accedido: 22 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.aiche.org/resources/publications/cep/2024/march/catalyzing-commercialization-additively-manufactured-pure-copper-revolutionizes-thermal-management>

- [14] «Metal Binder Jetting - gevinst for virksomheder med højvolumenproduktioner - GTS». Accedido: 22 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://gts-net.dk/metal-binder-jetting-gevinst-for-virksomheder-med-hoejvolumenproduktioner/>
- [15] D.-G. Ahn, «Directed Energy Deposition (DED) Process: State of the Art», *Int. J. of Precis. Eng. and Manuf.-Green Tech.*, vol. 8, n.º 2, pp. 703-742, mar. 2021, doi: 10.1007/s40684-020-00302-7.
- [16] «Introduction to DED in Additive Manufacturing | Explore Directed Energy Deposition in Metal 3D Printing - 3DEO». Accedido: 22 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.3deo.co/manufacturing/metal-3d-printing-processes-directed-energy-deposition-ded/>
- [17] «Spain's Ibarria Mixes Perfect Combination of New & Traditional Technology to Make ADD + PROCESS 3D Printer - 3DPrint.com | Additive Manufacturing Business». Accedido: 22 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://3dprint.com/104226/ibarmia-3d-printer/>
- [18] A. I. Nurhudan, S. Supriadi, Y. Whulanza, y A. S. Saragih, «Additive manufacturing of metallic based on extrusion», *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 66, pp. 228-237, jun. 2021, doi: 10.1016/j.jmapro.2021.04.018.
- [19] J. Mesicek, M. Pagac, J. Petru, P. Novak, J. Hajnys, y K. Kutiova, «TOPOLOGICAL OPTIMIZATION OF THE FORMULA STUDENT BELL CRANK», *MM SJ*, vol. 2019, n.º 03, pp. 2964-2968, oct. 2019, doi: 10.17973/MMSJ.2019_10_201893.
- [20] «Generative Design Versus Topology Optimization - 3DHeals». Accedido: 22 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://3dheals.com/generative-design-versus-topology-optimization/>
- [21] «Ultrafuse® 17-4 PH Metal Filament for 3D Printers | BASF Forward AM». Accedido: 20 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://forward-am.com/material-portfolio/ultrafuse-filaments-for-fused-filaments-fabrication-fff/metal-filaments/ultrafuse-17-4-ph/>
- [22] «Debinding-and-Simulation-Guidelines.pdf». Accedido: 20 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://forward-am.com/wp-content/uploads/2021/01/Debinding-and-Simulation-Guidelines.pdf#:~:text=The%20follow%20procedure%20will%20guide%20users%20through%20the%20setup%20and>
- [23] «Robot Gripper Gear Rack STEP - Google Drive». Accedido: 22 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://drive.google.com/drive/folders/145XX6AQ_yObJhC2FDVlkUM9mtLfTwctO
- [24] «Serie GH6000 - Zimmer Group». Accedido: 21 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.zimmer-group.com/es/productos/componentes/tecnologia-de-manipulacion/pinzas-paralelas/serie-gh6000>
- [25] G. Xie, R. Holladay, L. Chin, y D. Rus, «In-Hand Manipulation With a Simple Belted Parallel-Jaw Gripper», *IEEE Robot. Autom. Lett.*, vol. 9, n.º 2, pp. 1334-1341, feb. 2024, doi: 10.1109/LRA.2023.3346750.
- [26] T. Miki, «Self-support topology optimization considering distortion for metal additive manufacturing», *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 404, p. 115821, feb. 2023, doi: 10.1016/j.cma.2022.115821.
- [27] «green part and shipping V1.1».

- [28] «Xometry Europe: Fabricación bajo demanda | 15 procesos de fabricación». Accedido: 22 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://xometry.eu/es/>
- [29] «▷Marco P3Steel / Prusa I3 Steel - Galvanizado / Inoxidable - HTA3D ». Accedido: 22 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.hta3d.com/es/marco-p3steel-prusa-i3-steel-galvanizado-inoxidable>
- [30] «▷Montaje y configuración de 3DTouch - HTA3D - HTA3D ». Accedido: 22 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.hta3d.com/es/blog/configuracion-3dtouch>

ANEXO 1. IMPRESORA FDM METAL



ANEXO 2. CABLEADO PLACA RAMPS v1.4

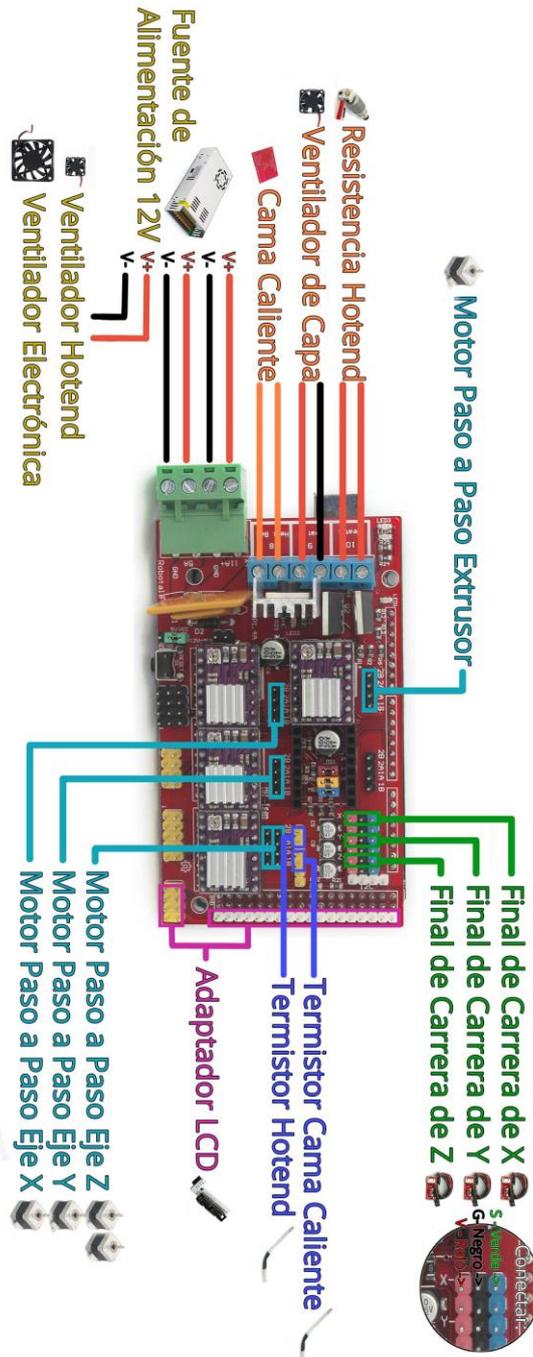


Figura 69. Conexión a impresora con placa Ramps v1.4[29]

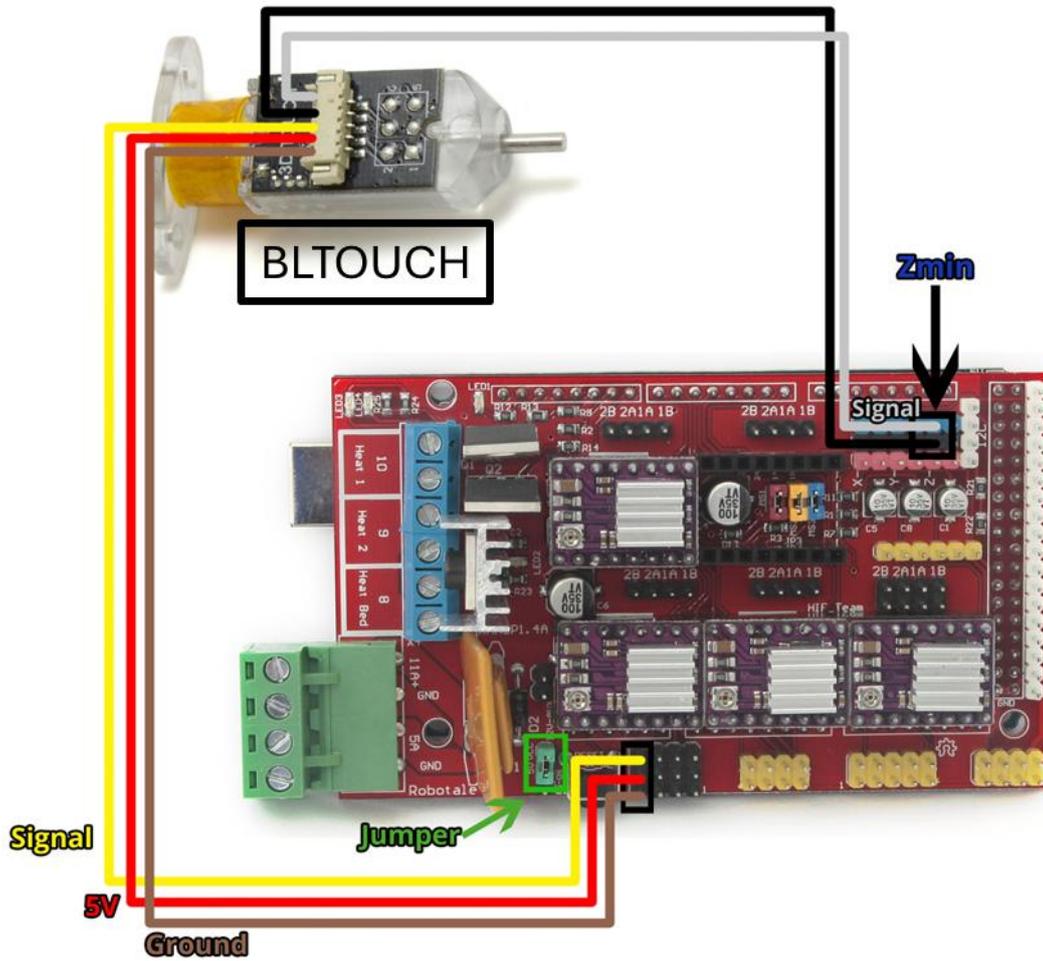


Figura 70. Instalación sensor calibración BLTouch. [30]

ANEXO 3. CARO ENVIO A ELNIK SYSTEMS



Material: 17-4 PH

Date issued: 10/04/25
Universidad Pontificia Comillas

Send printed green parts to:

Elnik Systems GmbH
Produktion
Knechtsäcker 12
72224 Ebhausen-Ebershardt
Germany

C/ Alberto Aguilera, 23

28015 Madrid
España

Subject: Green parts (Ultrafuse) for debinding & sintering service

Please ensure that no foreign materials (glue, other residues) are attached to the parts as otherwise, the processing of these parts cannot be guaranteed. The general component size must not exceed 100 mm x 100mm x 100mm and the maximum wall thickness is 30mm. If this size is exceeded, further processing can be refused.

No.	Quantity of parts	Part description	Part infill (in %)	Max. wall thickness (in mm)	Size of part (x/y/z in mm)	Comment including weight in kg
1	2	Short T_P	105	1.6	99.6/17/5	0.030_kg/each
2	13	Large T_P	105	1.6	120/17/5	0.036_kg/each
3	4	Connector	50	1.6	36/12/10	0.002_kg/each
4	1	Gear	50	1.6	50/42/10	0.027_kg
5	1	Claw_Teeth	50	1.6	61/16/10	0.024_kg
6	1	TO_Claw	50	1.6	86.5/60.6/10	0.053_kg
7	1	Claw	50	1.6	87.5/60.6/10	0.056_kg
8.1	1	Model	50	1.6	72/100/28	0.129_kg
8.2	1	N_Model	50	1.6	72/100/18	0.121_kg
8.3	2	Button_Model_S	50	1.6	8/7/11.6	0.0003_kg/each
8.4	1	Button_Model_L	50	1.6	8/11/11.6	0.0004_kg/each
	28			1.6		0.947_kg

Pre-Payment required prior to shipping after receiving our invoice.

Price per shelf: 230 € / ½ shelf 115 € (200mm*300mm or 200mm*150mm; maximum 2kg)

Delivery must be free of charge to Elnik (DDP for non EU countries)

Shipping information: Please provide your carrier information:

Carrier:

Account number:

Service to be used:

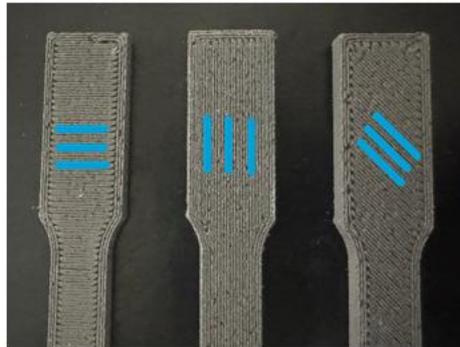
By sending in this order, you agree with the conditions above.

c/ Alberto Aguilera,23. 28015 Madrid. Tel.:(+34)91 542 28 00

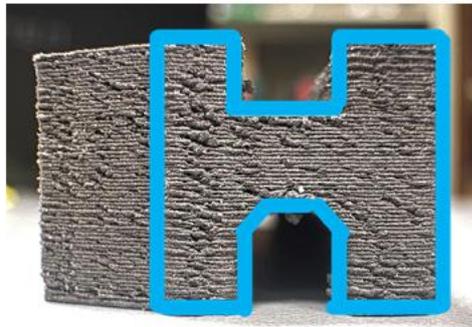


FURTHER INSTRUCTIONS

- **No. 1-2 (Large T_P and Short T_P):** These correspond to large and short test pieces. An irregular face was left in each test piece for research purposes. The smooth face should be the bottom during debinding and sintering process. The next pictures represent the top face with the three patterns that should be seen.

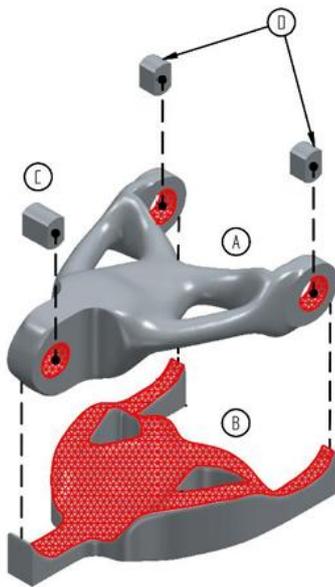


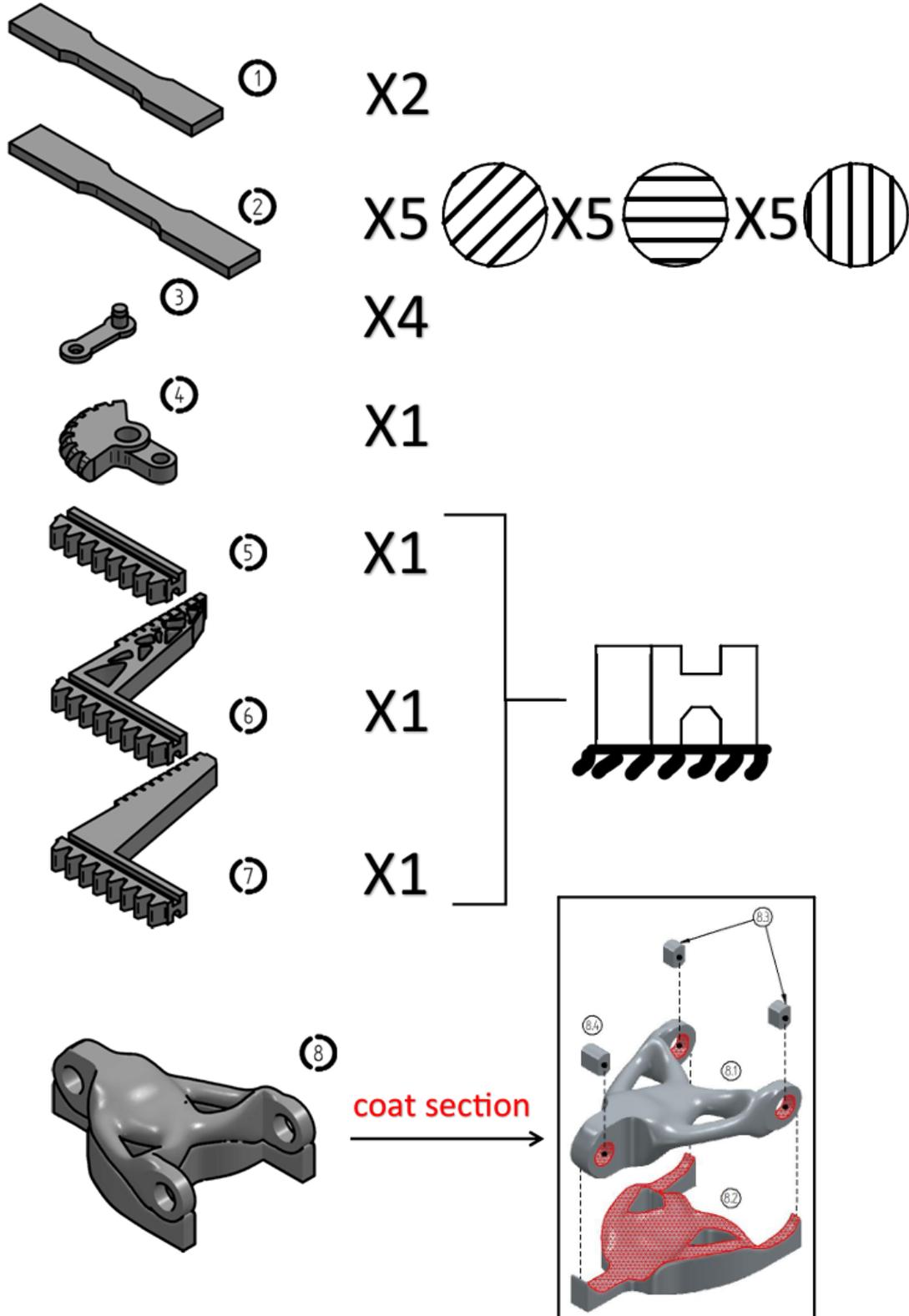
- **No. 5-6-7:** These parts should be treated following the same position as seen in the side face of the next picture.



- **No. 8 (Full Model structure):** The following pictures represent the assembly of the different parts, consisting of the model piece and its supports. Coating the parts with zirconia emulsion as a separator will be necessary, the red marks represent the areas that should be coated.

- Model (irregular face at the top)
- N_Model
- Button_Model_L
- Button_Model_S





ANEXO 4. COMPARATIVA DE IMPRESIONES



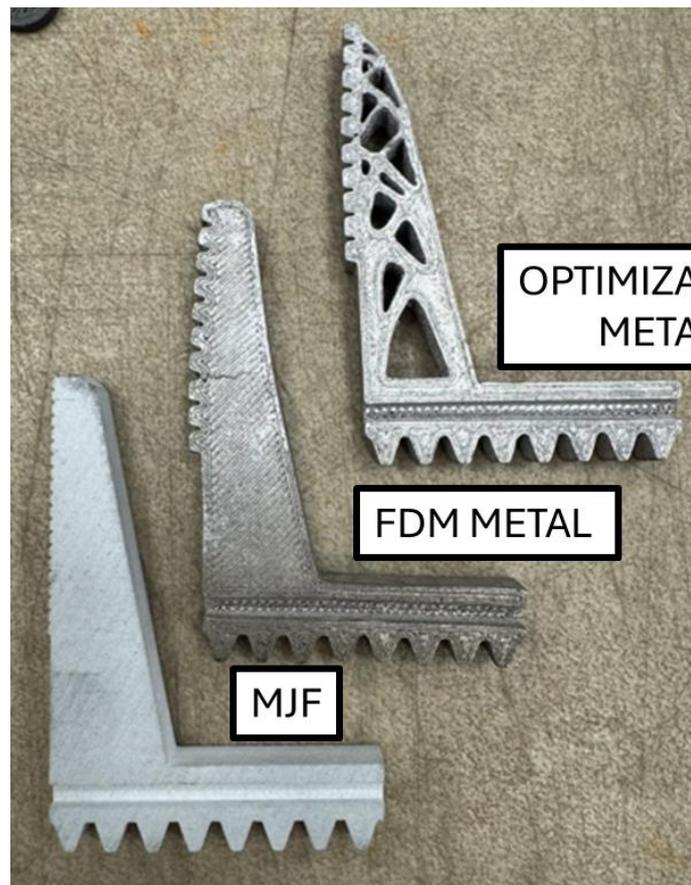
PIEZA GRIS



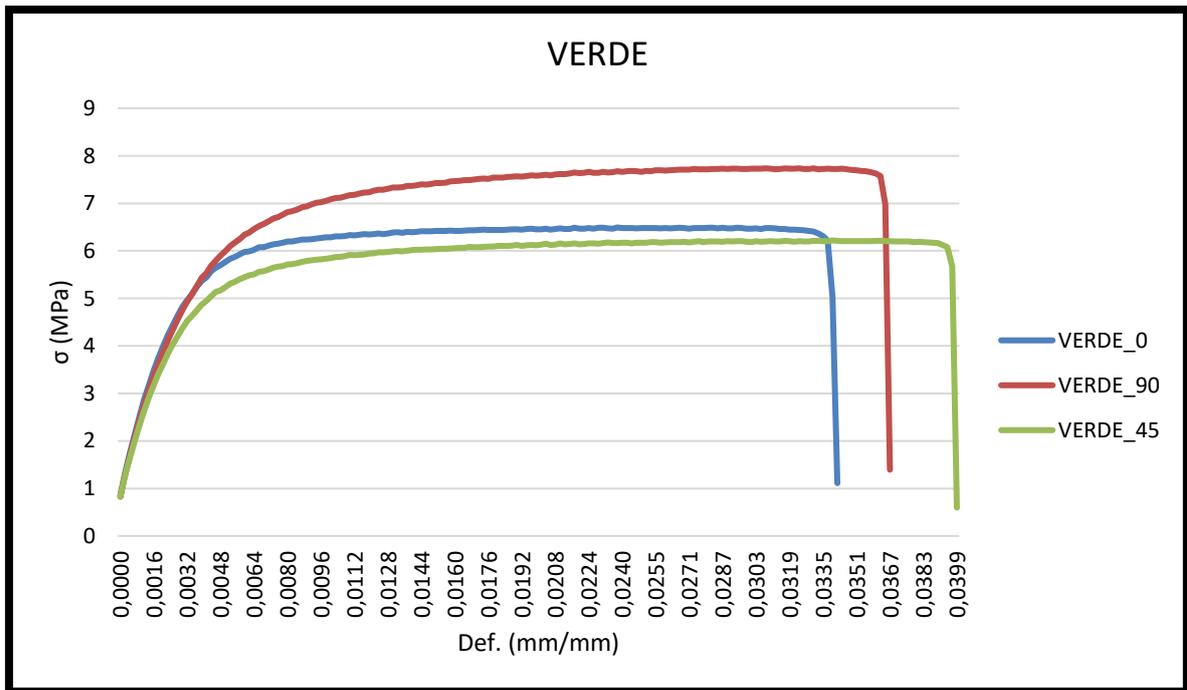
PIEZA VERDE

FDM METAL

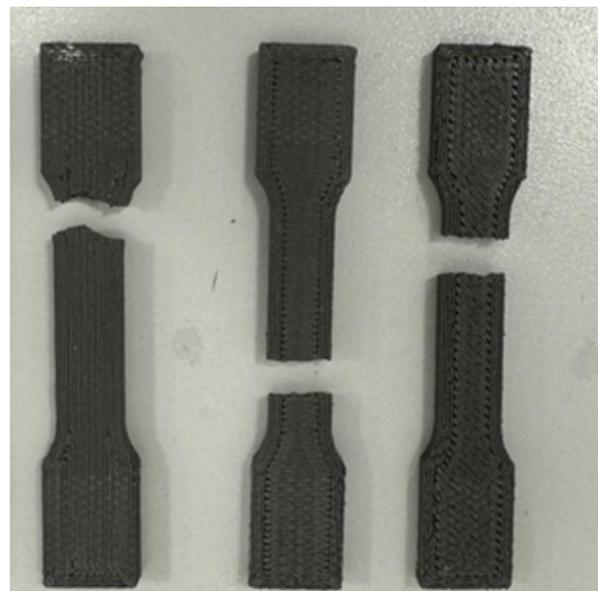
MJF



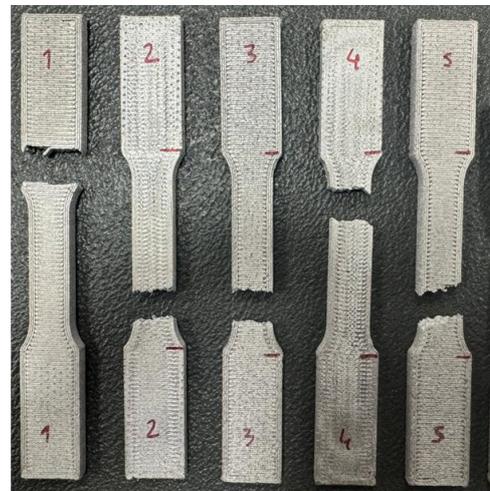
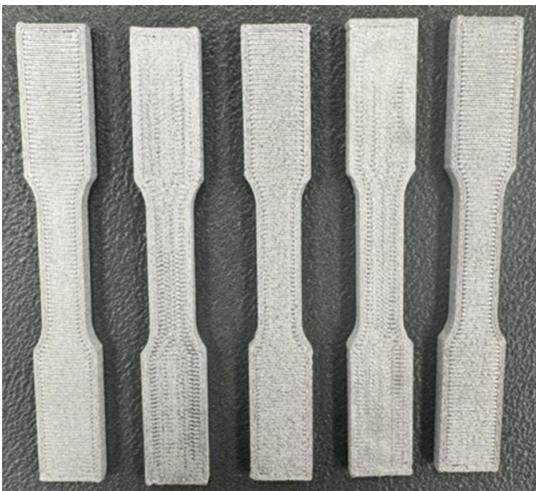
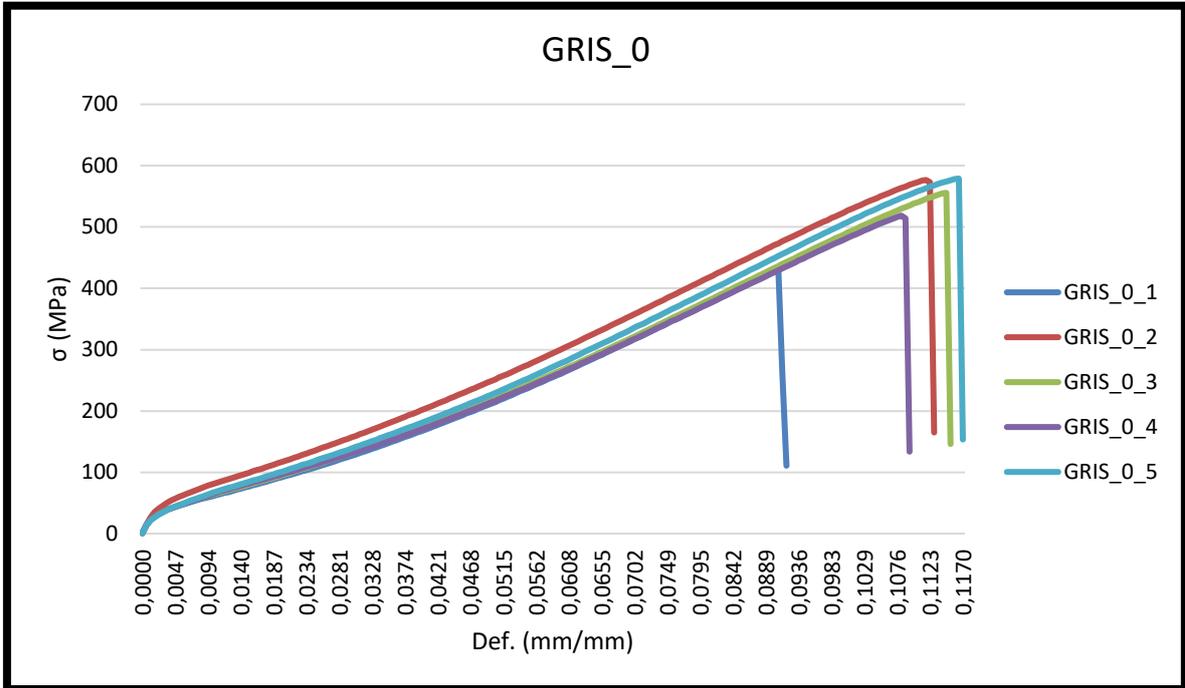
ANEXO 5. RESOLUCIÓN PROBETAS

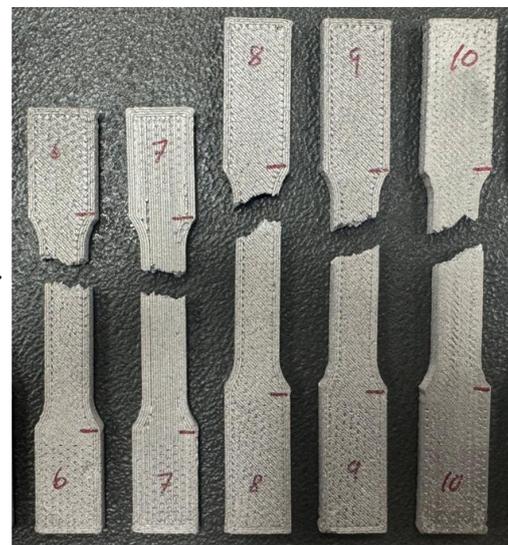
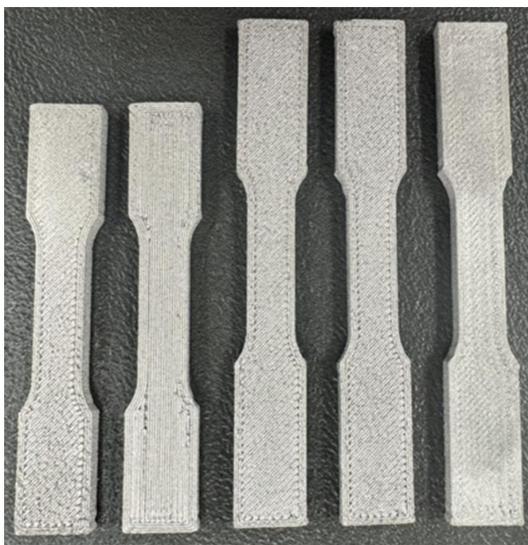
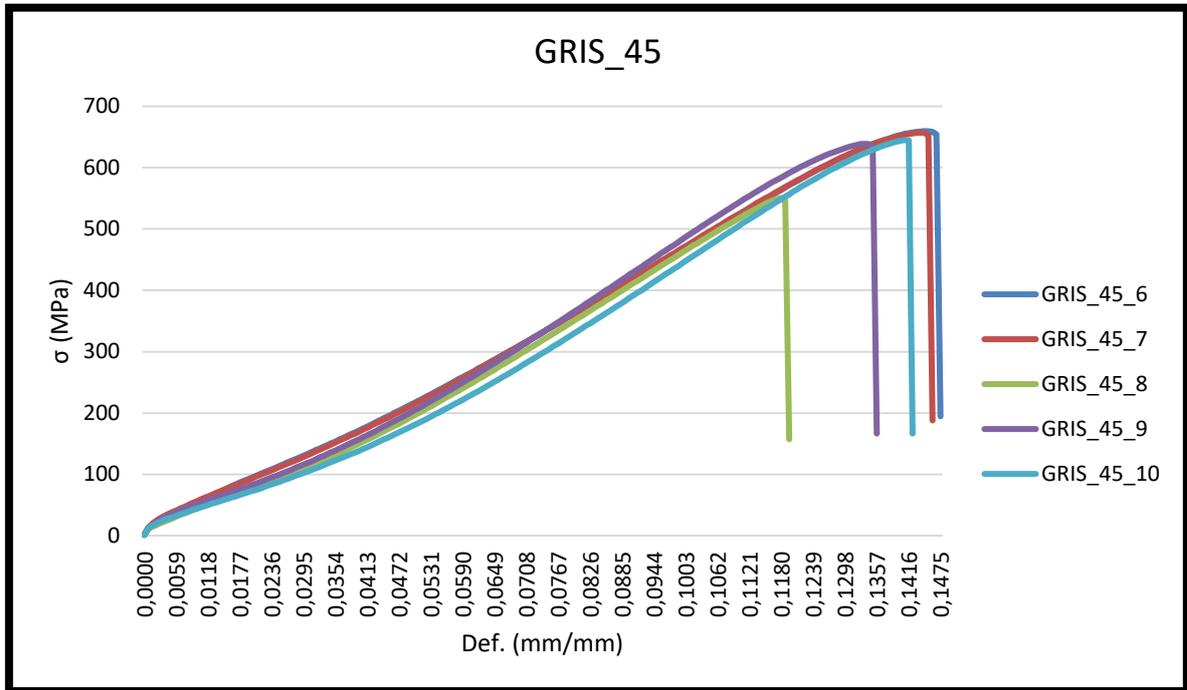


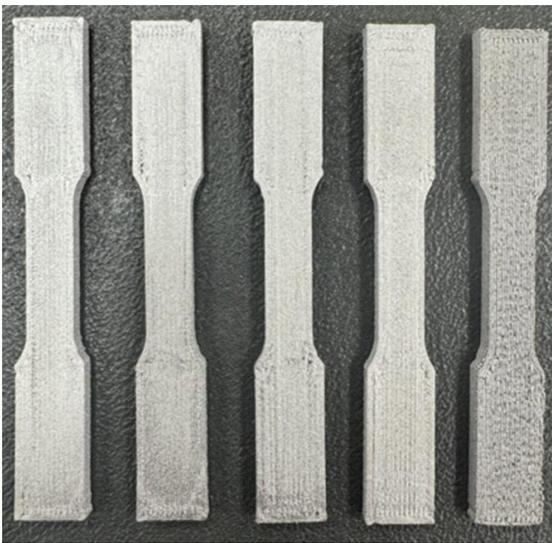
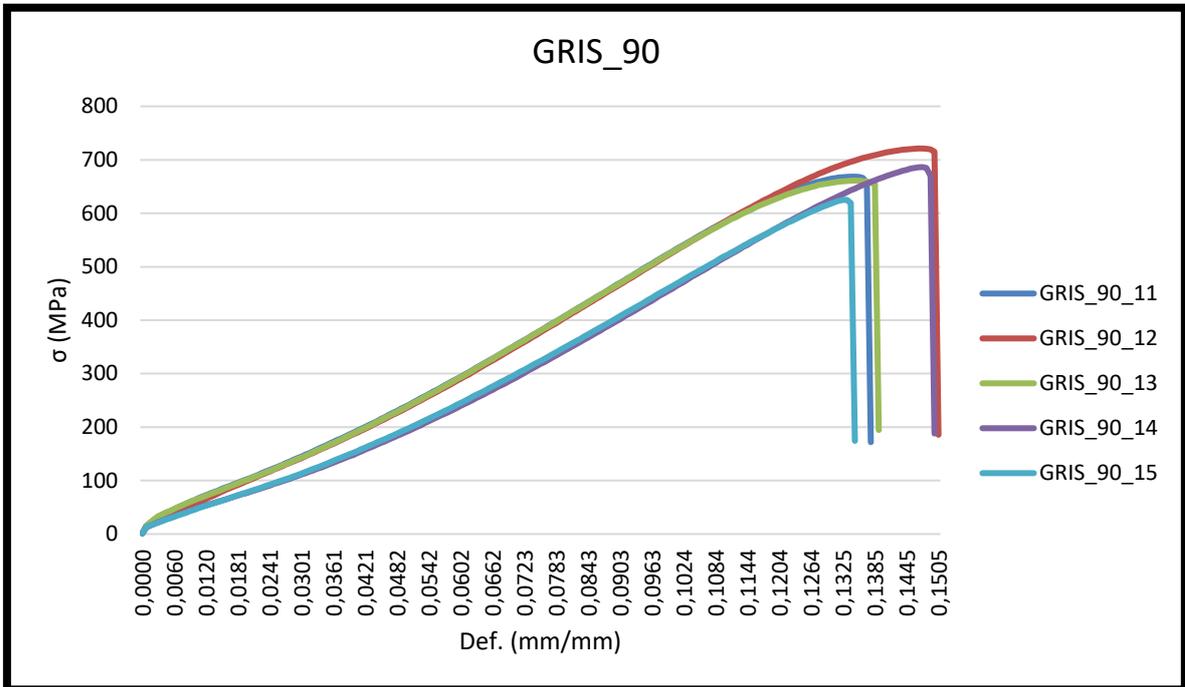
 90°
  0°
  45°



 90°
  0°
  45°







ANEXO 6. CÁLCULOS COSTES IMPRESIONES

COSTES		
Orden	Impresora 3D	Coste € (sin IVA)
1	MARKFORGED X7	66500
2	PRUSA I3KS – MK3S+	825 (impresora) + 500 (carenado)
3	HP 580C	110600
4	FORMLABS – FORM 3	5500 (paquete completo)
5	5 FORMLABS – FORM 3L	17300 (paquete completo)

IMPRESORA FDM METAL		
Coste material	1,36	(€/m)
Coste luz	0,25	(€/KWh)
Potencia media	0,625	(KW)
Tiempo de calibrado	0,32	(h)
Material impresión	15,69	(m)
Tiempo de impresión (h)	4,67	(h)
COSTE IMPRESION	21,34	(€)
COSTE TOTAL	22,12	(€)

POTENCIA MEDIA IMPRESORA FDM METAL	
Componente	Potencia (W)
Cama caliente E3D (High Temp)	500
Placa controladora	10
Motores (total)	12,48
Pantalla LCD	10
Ventiladores	20
Hotend / Extrusión estándar	65
MOSFET externo (estimado)	5
BLTouch (estimado)	2
Potencia total	624,48

MARKFORGED X7



Propiedades de la impresora	Proceso	Fabricación con filamento fundido, fabricación con filamento continuo
	Volumen de construcción	330 x 270 x 200 mm
	Peso	48 kg
	Tamaño de la máquina	584 x 483 x 914 mm
	Lecho de impresión	Acoplamiento cinemático, plano con una precisión de 80 µm
	Láser	Inspección durante el proceso, calibración de la impresión activa, nivelación del lecho
	Sistema de extrusión	Extrusor de segunda generación, detección de falta de plástico y fibra
	Alimentación	100-240 V CA, 150 W (pico 2 A)
	Módulo de RF	Banda de frecuencias 2,4 GHz, estándar Wi-Fi 802.11 b/g/n
Materiales	Plásticos disponibles	Onyx, Onyx retardante de llama (FR), Onyx ESD, Nylon White, P-PLA, S-TPU 95A**
	Fibras disponibles	Fibra de carbono, fibra de carbono retardante de llama (FR), fibra de vidrio, fibra de aramida (Kevlar®), fibra de vidrio HSHT
	Resistencia a la tracción	800 MPa (25,8 veces más que el ABS, 2,6 veces más que el aluminio 6061-T6)*
	Módulo de elasticidad a la tracción	60 GPa (26,9 veces más que el ABS, 0,87 veces más que el aluminio 6061-T6)*
Propiedades de las piezas	Altura de capa	100 µm predeterminada, 50 µm mínima, 250 µm máxima
	Relleno	Relleno de celdas cerradas: varias geometrías disponibles
Software	Eiger Cloud	Laminador, gestión de piezas/lotos (más opciones disponibles a un coste adicional)
	Seguridad	Autenticación de dos factores, acceso del administrador de la organización, inicio de sesión único
	Blacksmith	Plataforma de fabricación adaptativa (a un coste adicional)

DATOS AMORTIZACIÓN MÁQUINA		
Precio máquina (€)	66.000	
Coste mantenimiento anual (€)	6.600	
Años de amortización	5	
Amortización (h/año) - 223 días-año / 12 horas-día	2000	
Precio Hora máquina-amortización (€/h)	8,58	
Precio Hora venta-público (€/h)	8,58	
DATOS COSTE MATERIAL		
Coste material modelo: filamento abs (€/cc) (240 €-750 cc)	0,32	
DATOS COSTE TÉCNICO ANALISTA		
Coste técnico analista del modelo - inc. desmoldeo (€/h)	20	
DATOS TÉCNICOS DE DEPOSICIÓN		
<i>Tipo de modelo</i>	Malla	Sólido
Tasa de deposición (cc/h)		
Precio hora máquina-deposición (€/h)		
PIEZA monica-lucia4-maxilar - Orientación HORIZONTAL		
CONCEPTOS PRESUPUESTADOS	Opción Sólido	Costes parciales
Material modelo (cc)	7,00	2,24 €/ud
Soporte modelo (cc)	0,00	0,00 €/ud
Tiempo modelo (h)	0,85	7,29 €/ud
Piezas por bandeja (ud)	1,00	0,00 €/ud
Tiempo técnico-analista (h)	0,25	5,00 €
Cantidad de piezas	1,00	
Coste unitario (€) en ICAI + IVA	14,53 €/Ud	
Coste total (€) en ICAI + IVA	14,53 €	

PRUSA I3KS – MK3S+



PARÁMETROS TÉCNICOS

Volumen de Impresión	25×21×21 cm (9.84"×8.3"×8.3")
Altura de capa	0.05 - 0.35 mm
Nozzle	0.4mm por defecto, amplia gama de otros diámetros/boquillas compatibles
Diámetro del filamento	1.75 mm
Materiales compatibles	Amplia gama de termoplásticos, incluyendo PLA, PETG, ASA, ABS, PC (Policarbonato), CPE, PVA/BVOH, PVB, HIPS, PP (Polipropileno), Flex, nGen, Nylon, Carbon filled, Woodfill y otros materiales rellenos.
Velocidad máxima de desplazamiento	200+ mm/s
Temperatura máxima de la boquilla	300 °C / 572 °F
Temperatura máxima de la base	120 °C / 248 °F
Extrusor	Accionamiento directo, engranajes Bondtech, hotend E3D V6
Superficie de impresión	Láminas de acero magnético desmontables(*) con diferentes acabados de superficie, base calefactable con compensación de esquinas frías
Dimensiones de la impresora (sin bobina)	7 kg, 50×55×40 cm; 19.6×21.6×15.7 in (X×Y×Z)
Consumo de energía	Ajustes PLA: 80W / Ajustes ABS: 120W

DATOS AMORTIZACIÓN MÁQUINA		
Precio máquina (€)	1.325	
Coste mantenimiento anual (€)	133	
Años de amortización	2	
Amortización (h/año) - 223 días-año / 8 horas-día	1784	
Precio Hora máquina-amortización (€/h)	0,48	
Precio Hora venta-público (€/h)	0,72	
DATOS COSTE MATERIAL		
Coste material modelo: filamento PLA (€/cc) (18,20€-750 cc)	0,02	
Coste material soporte: filamento PLA (€/cc) (20€-750 cc)	0,00	
Coste material bandeja (€/Ud.): (20€-100 uds.)	0,20	
DATOS COSTE TÉCNICO ANALISTA		
Coste técnico analista del modelo - inc. desmoldeo (€/h)	30	
DATOS TÉCNICOS DE DEPOSICIÓN		
<i>Tipo de modelo</i>	Malla	Sólido
Tasa de deposición (cc/h)		
Precio hora máquina deposición (€/h)		
PIEZA monica-lucia4-maxilar - Orientación HORIZONTAL		
CONCEPTOS PRESUPUESTADOS	Opción Sólido	Costes parciales
Material modelo (cc)	2,00	0,05 €/ud
Soporte modelo (cc)	0,00	0,00 €/ud
Tiempo modelo (h)	0,25	0,18 €/ud
Piezas por bandeja (ud)	1,00	0,20 €/ud
Tiempo técnico-analista (h)	0,00	0,00 €
Cantidad de piezas	1,00	
Coste unitario (€) en ICAI + IVA	0,43 €/Ud	
Coste total (€) en ICAI + IVA	0,43 €	

HP 580C



Información técnica

Impresora 3D HP Jet Fusion 580 Color

Rendimiento de la impresora	Tecnología	Tecnología HP Multi Jet Fusion
	Volumen de producción efectivo	Hasta 332 × 190 × 248 mm (13,1 × 7,5 × 9,8 pulgadas)
	Velocidad de producción ²	1817 cm ³ /h (111 in ³ /h)
	Tiempo de producción completo para una altura de 248 mm (9,8 pulgadas)	Desde solo 14 horas: Limpieza y recuperación rápidas ³ Desde solo 20 horas: Limpieza y recuperación automáticas ⁴
	Grosor de la capa	0,08 mm (0,003 pulgadas)
	Resolución del cabezal de impresión	1200 ppp
Dimensiones (ancho × largo × alto)	Impresora	1565 × 955 × 1505 mm (61,6 × 37,6 × 59,3 pulgadas)
	Envío	1770 × 1143 × 2013 mm (69,7 × 45 × 79,3 pulgadas)
	Área de funcionamiento	2785 × 2530 × 2440 mm (109,6 × 99,3 × 96 pulgadas)
Peso	Impresión	650 kg (1433 lb)
	Envío	850 kg (1874 lb)
Condiciones ambientales	Temperatura operativa	20-30 °C (68-86 °F)
	Humedad operativa	20-70 % sin condensación
Emisiones acústicas⁵	Posición frontal de operador	72 dB (sin silenciador) / 70 dB (con silenciador)
	Posición posterior de observador	80 dB (sin silenciador) / 75 dB (con silenciador)
Red⁶	Gigabit Ethernet (10/100/1000Base-T), compatible con los siguientes estándares: TCP/IP, DHCP (solo IPv4) y TLS/SSL	
Disco duro	Disco duro de 1 TB (cifrado AES 256 y borrado seguro de datos DoD 5220M) y SSD de 1 TB (cifrado AES 256)	
Software	Software incluido	HP SmartStream 3D Build Manager HP SmartStream 3D Command Center
	Formatos de archivo compatibles	3MF, STL, OBJ y VRML v.2
	Consumo	6300 W
Alimentación	Requisitos	Configuración de un circuito dedicado: voltaje de entrada 221 - 240 V, 32 A o 200 - 220 V, 36 A, 50/60 Hz
	Certificados y declaración	Seguridad
Compatibilidad electromagnética		EN 55032:2012 Clase A; CISPR 32:2012 Clase A; FCC CFR 47 Parte 15 Clase A; ICES-003, Publicación 6 Clase A; EN 61000-3-12:2011; IEC 61000-3-12:2011; EN 61000-3-11:2000; IEC 61000-3-11:2000; EN 55024:2010; CISPR 24:2010
Declaración medioambiental		Cumplimiento del reglamento REACH
Garantía y asistencia	Un año de garantía de hardware limitada	

DATOS AMORTIZACIÓN MÁQUINA		
Precio máquina (€)		80.000
Coste mantenimiento anual (€)		2.000
Años de amortización		5
Días impresión/año		48
Impresiones/día		1
Precio impresión (€)		375,00
Precio Impresión venta-público (€)		375,00
DATOS COSTE MATERIAL		
Coste material: (€/kg)		100,00
Coste material: (€/cc)		0,11
Volumen Total (cc)		15634,75
Densidad de Empaquetado		10,00%
DATOS COSTE TÉCNICO ANALISTA		
Coste técnico analista del modelo - inc. limpieza (€/h)		20
PIEZA monica-lucia4-maxilar - Orientación HORIZONTAL		
CONCEPTOS PRESUPUESTADOS	Opción Solido	Costes parciales
Material modelo (cc)	9,54	1,00 €/ud
Impresión	-	2,29 €/ud
Tiempo técnico-analista (h)	0,17	3,33 €/ud
Tiempo Limpieza (h)	0,08	1,67 €/ud
Cantidad de piezas	1,00	
Coste unitario (€) en ICAI + IVA	8,29 €/Ud	
Coste total (€) en ICAI + IVA	8,29 €	

FORMLABS – FORM 3 – 3L



Tech Specs	Form 3	Form 3L
TECHNOLOGY	Low Force Stereolithography (LFS) [™]	
BUILD VOLUME W x D x H	14.5 × 14.5 × 18.5 cm 5.7 × 5.7 × 7.3 in	33.5 × 20 × 30 cm 13.2 × 7.9 × 11.8 in
LAYER THICKNESS	25 - 300 microns (0.001 - 0.012 in)	
LASER POWER	1x 250 mW laser	2x 250 mW laser
LASER SPOT SIZE	85 microns	
WARRANTY AND SERVICE	One Year Warranty included. Extended Warranty, Pro Service, and Enterprise Plan available.	One Year Warranty included Additional service options available once shipping.
SOFTWARE COMPATIBILITY	Windows 7 and up // Mac OSX 10.6.8 and up	
FILE TYPE	STL or OBJ	

DATOS AMORTIZACIÓN MÁQUINA		
Precio máquina (€)	20.000	
Coste mantenimiento anual (€)	2.000	
Años de amortización	5	
Amortización (h/año) - 223 días-año / 12 horas-día	1784	
Precio Hora máquina-amortización (€/h)	2,91	
Precio Hora venta-público (€/h)	3,21	
DATOS COSTE MATERIAL		
Coste material modelo: filamento abs (€/cc) (150€-950 cc)	0,14	
DATOS COSTE TÉCNICO ANALISTA		
Coste técnico analista del modelo - inc. desmoldeo (€/h)	20	
DATOS TÉCNICOS DE DEPOSICIÓN		
<i>Tipo de modelo</i>	Malla	Sólido
Tasa de deposición (cc/h)	11	16
Precio hora máquina-deposición (€/h)		
PIEZA monica-lucia4-maxilar - Orientación HORIZONTAL		
CONCEPTOS PRESUPUESTADOS	Opción Solido	Costes parciales
Material modelo (cc)	239,66	33,55 €/ud
Soporte modelo (cc)	0,00	0,00 €/ud
Tiempo modelo (h)	5,72	18,33 €/ud
Piezas por bandeja (ud)	1,00	0,00 €/ud
Tiempo técnico-analista (h)	1,20	24,00 €
Cantidad de piezas	1,00	
Coste unitario (€) en ICAI + IVA	75,88 €/Ud	
Coste total (€) en ICAI + IVA	75,88 €	

ANEXO 6. CÁLCULOS COSTES IMPRESIONES

	X7 (GRF)	PRUSA (FDM)	HP (MJF)	FORMILABS (SLA)	FDM METAL	
	cantidad	coste	cantidad	coste	cantidad	coste
prot_conducto_carcasa	2	14,07				14,07 €
prot_rail_carcasa	1	8,82	1	0,51		8,82 €
prot_tapon_superior	1	6,61				6,61 €
prot_tapon_inferior	1	6,75				6,75 €
cabezal_extusor			1	3,4		
carcasa_inf					1	75,88
carcasa_sup						
dientes_garra			1	0,62		
garra_v1	1	14,53	1	0,99	2	16,59
garra_v2			1	1,21	1	8,29
garra_OT			1	1,31	1	7,65
conector	2	7,36			4	16,73
rueda_dentada	1	10,14			2	13,21
rueda_dentada_metal			1	0,54	1	6,63
cruceta	1	6,89			1	5,56
vástago			2	13,85		
culeta			1	13,04		
carcasa_parcial_sup			1	1,26	1	32,97
carcasa_parcial_inf			1	2,17	1	53,52
tapa_conducto_vástago			1	0,43	1	23,88
pieza_OT						
negativo_pieza_OT					1	22,12
probetas_cortas_prueba					3	17,41
probetas_cortas					2	12,64
probetas_largas					13	8,36
						67,45 €
						32,44 €
						38,08 €
						522,66 €
						COSTE TOTAL
						460,00 €
						DES_SINT
						690,21 €
						COSTE FDM METAL
						1,053,18 €
						COSTE FINAL

ANEXO 7. COSTE DMLS. XOMETRY

Pos.	Descripción	Cantidad	Precio unitario	Total
10.	 <p>Dim: 100.0 x 14.0 x 4.0 mm</p> <p>Nombre de la pieza: PROBETA_MTL_LARGA.stl Caja contenedora: 100.0mm x 14.0mm x 4.0mm Proceso: 3D Printing DMLS - Direct Metal Laser Sintering Material: Stainless 17-4 Resolution, µm: >60 Acabado: Standard Insertos: - Roscas y agujeros roscados: -</p>	13	€117.32	€1,525.16
20.	 <p>Dim: 83.0 x 14.0 x 4.0 mm</p> <p>Nombre de la pieza: PROBETA_MTL_iso 6892-1_2.stl Caja contenedora: 83.0mm x 14.0mm x 4.0mm Proceso: 3D Printing DMLS - Direct Metal Laser Sintering Material: Stainless 17-4 Resolution, µm: >60 Acabado: Standard Insertos: - Roscas y agujeros roscados: -</p>	2	€130.64	€261.28
Gastos de envío a: , Spain. (Delivery terms: DAP)				€0.00
VAT (19.0%)				€339.42
Valor total del pedido, neto:				€1,786.44
Valor total del pedido, bruto:				€2,125.86