



GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

Análisis, diseño generativo y fabricación de
componentes de uso final mediante impresión 3D para
aplicación en una bicicleta

Autor: Marta Herrera Aguilar

Director: Mariano Jiménez Calzado

Co-Director: Silvia Fernández Villamarín

Madrid

Agosto de 2025

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
“ANÁLISIS, DISEÑO GENERATIVO Y FABRICACIÓN DE COMPONENTES DE USO
FINAL MEDIANTE IMPRESIÓN 3D PARA APLICACIÓN EN UNA BICICLETA”

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.

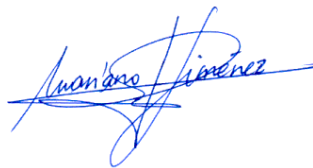


Fdo.: Marta Herrera Aguilar

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.: Silvia Fernández Villamarín

Fecha: 22 / 07 /2025



GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

Análisis, diseño generativo y fabricación de
componentes de uso final mediante impresión 3D para
aplicación en una bicicleta

Autor: Marta Herrera Aguilar

Director: Mariano Jiménez Calzado

Co-director: Silvia Fernández Villamarín

Madrid

Julio de 2025

Agradecimientos

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a toda mi familia por su apoyo incondicional a lo largo de estos años de carrera. En especial, a mi abuelo Américo, que siempre me inculcó la importancia del trabajo y de los estudios, valores que me han acompañado en cada paso de este camino. A mis padres, Javier y Pilar, sin los cuales nada de esto habría sido posible, y a mis hermanos, Beatriz y Javier, por animarme en esos días largos de biblioteca y recordarme siempre la importancia de seguir adelante. Y a mi tía Marta por todo el apoyo recibido.

Extiendo también mi gratitud a todos los amigos que he ido haciendo durante estos años y con los que he compartido esfuerzos, retos y aprendizajes. Juntos hemos crecido no solo para convertirnos en buenos ingenieros, sino, más importante aún, en buenas personas.

Gracias a todo el personal docente de la universidad por su dedicación y por contribuir a mi formación. A Félix, por guiarme en los primeros años y ejercer de mentor durante todo el camino. Y, muy especialmente, a Mariano, por enseñarme tanto, por su paciencia y por hacer posible este proyecto.

ANÁLISIS, DISEÑO GENERATIVO Y FABRICACIÓN DE COMPONENTES DE USO FINAL MEDIANTE IMPRESIÓN 3D PARA APLICACIÓN EN UNA BICICLETA

Autor: Herrera Aguilar, Marta.

Director: Jiménez Calzado, Mariano.

Codirector: Silvia Fernández Villamarín

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO

El presente Trabajo de Fin de Grado tiene como objetivo principal el escaneado, rediseño mediante optimización topológica e impresión 3D de la bieleta de una bicicleta de montaña. Se busca evaluar el beneficio económico derivado del rediseño, sin perder de vista las ventajas mecánicas que aporta la reducción de masa en componentes estructurales.

El desarrollo del proyecto se ha basado en un proceso iterativo que ha combinado herramientas de diseño asistido por ordenador, como *Solid Edge*, con cálculos de cargas reales soportadas por la bieleta. Este análisis previo ha permitido realizar una optimización que respeta las propiedades mecánicas esenciales, garantizando su funcionalidad y resistencia.

Como resultado, se ha obtenido una bieleta optimizada con una reducción de masa del 51 % respecto al modelo original, manteniendo su capacidad estructural. Las tecnologías de impresión 3D empleadas han hecho posible fabricar el prototipo y llevar a cabo un análisis detallado de costes, comparando impresión FDM y SLA. Este estudio ha permitido determinar que, mientras en FDM el ahorro económico es mínimo debido al peso de los costes fijos, en SLA se logra una reducción significativa tanto en consumo de material como en coste total, lo que evidencia la importancia de seleccionar la tecnología de fabricación más adecuada para maximizar los beneficios de la optimización topológica.

Palabras clave: Bieleta, Optimización topológica, Ingeniería inversa, Diseño generativo, Impresión 3D.

1. Introducción

La bieleta es un componente clave del sistema de suspensión trasera de muchas bicicletas de montaña. Se trata de una pieza de enlace que conecta el cuadro con el amortiguador y el tirante superior, permitiendo la correcta transmisión de fuerzas y el movimiento controlado de la suspensión. Su función es fundamental para garantizar el confort, la tracción y el rendimiento, especialmente en terrenos irregulares.

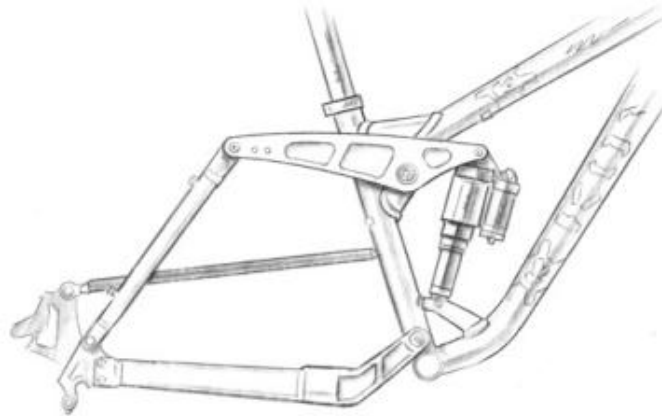


Figura 1 Bieleta de una Kona Stab [1]

En el ciclismo, y de manera más acusada en el ciclismo profesional, la reducción de peso es un objetivo prioritario, ya que influye directamente en la eficiencia del pedaleo y la aceleración de la bicicleta. Un menor peso total contribuye a mejorar el rendimiento del ciclista y a reducir la fatiga, lo que puede marcar la diferencia en competiciones de alto nivel.

2. Definición del Proyecto

El desarrollo del proyecto comienza con el escaneado tridimensional de la bieleta original, a partir del cual se obtiene una nube de puntos que describe su geometría real. Esta malla se procesa para eliminar imperfecciones y generar un modelo digital depurado.

Posteriormente, se realiza un estudio de cargas aplicando la fuerza especificada por la norma correspondiente, con el objetivo de conocer las sollicitaciones reales a las que se somete la pieza en uso. Con esta información, se lleva a cabo una optimización topológica [2] que busca reducir la masa manteniendo la funcionalidad y la resistencia estructural.

Finalmente, los diseños resultantes se fabrican mediante impresión 3D en distintas tecnologías, obteniendo prototipos que permiten estimar de forma precisa los costes de producción y comparar los resultados entre la pieza original y la optimizada.

3. Descripción del modelo/sistema/herramienta

Para desarrollar el proyecto se recurrió a un conjunto variado de herramientas y tecnologías que cubren todo el recorrido, desde la captura inicial de datos hasta la fabricación de prototipos funcionales.

El primer paso fue el escaneado tridimensional de la bieleta original. Se utilizó un escáner de ingeniería inversa, capaz de registrar con gran precisión la geometría real y generar una nube de puntos muy detallada. Este trabajo se llevó a cabo con el software VXelements, que no solo permite adquirir la información sino también realizar el tratamiento inicial: limpiar la nube de puntos, refinar detalles y convertirla en una malla poligonal lista para modificar.

En la fase de diseño y optimización, el protagonista fue Solid Edge. Con esta herramienta CAD se importó la geometría escaneada y se ejecutó el análisis de cargas, además de aplicar

optimización topológica para aligerar la pieza sin comprometer su resistencia ni las restricciones necesarias para su correcto funcionamiento.

Por último, la fabricación se abordó con distintas tecnologías de impresión 3D. Se usaron sistemas FDM y SLA, ajustando tanto los parámetros como el material a cada método. Gracias a ello se obtuvieron prototipos físicos, tanto del modelo original como del rediseñado, lo que permitió realizar comparaciones de costes y valorar la viabilidad real de la nueva versión.



Figura 2 Impresora 3D imprimiendo el prototipo optimizado, fuente propia

4. Resultados

Se ha obtenido un rediseño de la pieza que logra una reducción de masa del 51% respecto al modelo original, manteniendo todos los requisitos mecánicos y conservando su resistencia, rigidez y estabilidad estructural dentro de los límites de seguridad establecidos. Las simulaciones y los prototipos fabricados mediante impresión 3D han confirmado tanto la viabilidad del diseño optimizado como su correcta integración en el conjunto, sin desviaciones dimensionales ni problemas de montaje. En cuanto a los costes, se ha comprobado que en impresión por extrusión de material (FDM) la diferencia económica entre el modelo original y el optimizado es prácticamente nula, mientras que en impresión por resina (SLA) la pieza optimizada resulta más competitiva que la original, ya que la reducción de masa ha permitido disminuir el consumo de material sin afectar a la calidad.



Figura 3 Comparativa entre el prototipo original y el escaneado, fuente propia

5. Conclusiones

En conclusión, este trabajo demuestra que es posible rediseñar piezas mecánicas, como la bieleta de una bicicleta de descenso, para hacerlas mucho más ligeras sin perder resistencia ni funcionalidad. El uso combinado de ingeniería inversa, optimización topológica y fabricación aditiva no solo mejora el rendimiento, sino que también permite comparar distintas tecnologías y entender sus ventajas según el uso. Más allá de los resultados actuales, el proyecto deja claro que existe un gran potencial para seguir innovando, especialmente en el desarrollo de componentes personalizados con materiales avanzados que se adapten mejor a cada ciclista.

6. Referencias

- [1] Kona Bicycle Company, “2024 Kona Owners Manual,” *Kona Bicycle Company Downloads*, publicado en 2024, [en línea]. Disponible: <https://konaworld.com/pages/downloads>
- [2] C. A. Meza, F. Tamayo, and E. E. Franco, “Topological optimization applied to the design of lightweight mechanical structural components,” no. 44, 2014.

ANALYSIS, GENERATIVE DESIGN, AND MANUFACTURING OF END-USE COMPONENTS THROUGH 3D PRINTING FOR APPLICATION IN A BICYCLE

Author: Herrera Aguilar, Marta.

Supervisor: Jiménez Calzado, Mariano.

Co-supervisor: Silvia Fernández Villamarín

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

ABSTRACT

The main objective of this Final Degree Project is the scanning, redesign through topological optimization, and 3D printing of the linkage of a mountain bike. The aim is to evaluate the economic benefit derived from the redesign, while also considering the mechanical advantages provided by mass reduction in structural components.

The development of the project has been based on an iterative process combining computer-aided design tools, such as Solid Edge, with calculations of the real loads supported by the linkage. This preliminary analysis has enabled an optimization that preserves the essential mechanical properties, ensuring its functionality and strength.

As a result, an optimized linkage has been obtained with a 51% mass reduction compared to the original model, while maintaining its structural capacity. The 3D printing technologies employed have made it possible to manufacture the prototype and carry out a detailed cost analysis, comparing FDM and SLA printing. This study has determined that, while in FDM the economic savings are minimal due to the weight of fixed costs, in SLA there is a significant reduction in both material consumption and total cost, highlighting the importance of selecting the most suitable manufacturing technology to maximize the benefits of topological optimization.

Keywords: Bicycle crank, Topological optimization, Reverse engineering, Generative design, 3D printing.

1. Introduction

The bicycle crank is a key component of the rear suspension system in many mountain bikes. It is a connecting element that links the frame to the shock absorber and the upper stay, enabling the proper transmission of forces and the controlled movement of the suspension. Its function is essential to ensure comfort, traction, and performance, especially on uneven terrain.

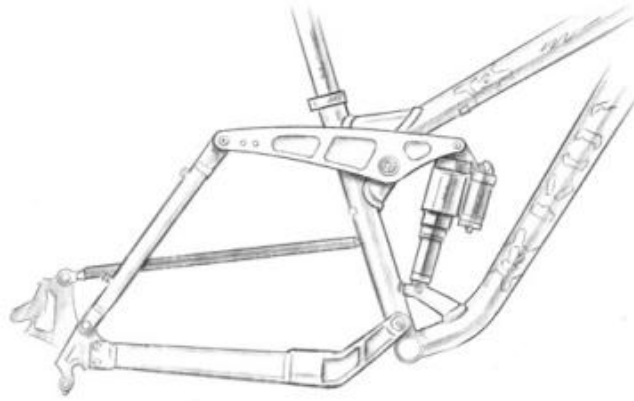


Figure 1 Bicycle crank from a Kona Stab [1]

In cycling, and even more so in professional cycling, weight reduction is a top priority, as it directly affects pedaling efficiency and the bike's acceleration. A lower total weight helps improve the rider's performance and reduce fatigue, which can make the difference in high-level competitions.

2. Project Definition

The development of the project begins with the three-dimensional scanning of the original linkage, from which a point cloud is obtained that accurately represents its real geometry. This mesh is then processed to remove imperfections and generate a refined digital model.

Subsequently, a load study is carried out by applying the force specified by the relevant standard, with the aim of determining the actual stresses to which the component is subjected in operation. Based on this information, a topology optimization [2] is performed to reduce mass while maintaining the functionality and structural strength of the part.

Finally, the resulting designs are manufactured using 3D printing in different technologies, producing prototypes that allow for an accurate estimation of production costs and a comparison between the original and the optimized part.

3. Description of the model/system/tool

To carry out the project, a diverse set of tools and technologies was used, covering the entire process from the initial data capture to the manufacturing of functional prototypes.

The first step was the three-dimensional scanning of the original link. A reverse engineering scanner was employed, capable of capturing the real geometry with high precision and generating a highly detailed point cloud. This task was performed using VXelements software, which not only enables data acquisition but also provides initial processing tools: cleaning the point cloud, refining details, and converting it into a polygonal mesh ready for modification.

For the design and optimization phase, Solid Edge took center stage. With this CAD tool, the scanned geometry was imported, load analysis was carried out, and topological optimization was applied to reduce weight without compromising strength or the necessary constraints for proper functionality.

Finally, manufacturing was approached using different 3D printing technologies. Both FDM and SLA systems were employed, adjusting parameters and materials to suit each method. This made it possible to produce physical prototypes of both the original and the redesigned model, enabling cost comparisons and assessing the real feasibility of the new version.



Figure 1 3D printer producing the optimized prototype, own source.

4. Results

An optimized redesign of the part has been achieved, resulting in a 51% reduction in mass compared to the original model, while maintaining all mechanical requirements and preserving its strength, stiffness, and structural stability within established safety limits. Simulations and 3D-printed prototypes have confirmed both the feasibility of the optimized design and its proper integration into the assembly, with no dimensional deviations or fitting issues. Regarding costs, it has been determined that in material extrusion (FDM) printing, the economic difference between the original and the optimized model is practically negligible, whereas in resin-based (SLA) printing, the optimized part proves more cost-competitive than the original, as the mass reduction has allowed for lower material consumption without compromising quality.



5. Conclusions

In conclusion, this work demonstrates that it is possible to redesign mechanical components, such as the linkage of a downhill bike, to make them significantly lighter without losing strength or functionality. The combined use of reverse engineering, topological optimization, and additive manufacturing not only enhances performance but also enables the comparison of different technologies and a better understanding of their advantages depending on the application. Beyond the current results, the project makes it clear that there is great potential for further innovation, particularly in the development of customized components made from advanced materials that better adapt to each rider.

6. References

- [1] Kona Bicycle Company, "2024 Kona Owner's Manual," Kona Bicycle Company Downloads, published in 2024, [online]. Available: <https://konaworld.com/pages/downloads>
- [2] C. A. Meza, F. Tamayo, and E. E. Franco, "Topological optimization applied to the design of lightweight mechanical structural components," no. 44, 2014.

Índice de la memoria

Capítulo 1. Introducción	7
1.1 Introducción.....	7
1.2 Motivación del proyecto.....	9
1.3 Objetivos del proyecto.....	10
1.4 Alineación con los objetivos de desarrollo sostenibles (ODS).....	11
Capítulo 2. Estado del arte	12
2.1 Bieleta de una bicicleta.....	12
2.2 Ingeniería inversa y escaneo 3D.....	16
2.2.1 Escaneado 3D.....	18
2.3 Diseño generativo.....	20
2.4 Análisis de elementos finitos.....	23
2.5 Fabricación aditiva	25
Capítulo 3. Propuesta del proyecto	30
3.1 Geometría	30
3.2 Material	31
3.3 Condiciones de contorno	32
3.4 Cargas.....	33
3.4.1 Traslado de las cargas a la bieleta	34
Capítulo 4. Desarrollo del trabajo.....	38
4.1 Propuesta de un proceso de diseño y fabricación	38
4.2 Escaneado de la geometría	39
4.3 Trabajo de la nube de puntos y del mallado	42
4.4 Trabajo de diseño en el sólido	45
4.5 Asignación del material.....	47
4.6 Asignación de las cargas y restricciones	48
4.7 Simulación FEM.....	49
4.8 Optimización de la bieleta.....	51
4.8.1 Optimización libre.....	52

4.8.2 Optimización restringida.....	57
4.9 Refinado de la geometría.....	59
Capítulo 5. Fabricación de un prototipo.....	61
5.1 Tecnologías de impresión 3D.....	61
5.2 Impresión del prototipo en 3D.....	64
Capítulo 6. Análisis de Costes.....	71
6.1 Análisis de costes internos	73
6.1.1 Análisis de costes internos para la impresión FDM	73
6.1.2 Análisis de costes internos para la impresión SLA	76
6.2 Análisis de costes externos.....	80
6.3 Comparativa de los costes	83
Capítulo 7. Conclusiones y trabajos futuros.....	85
Capítulo 8. Bibliografía.....	87
ANEXO I: Fichas técnicas de las impresoras empleadas.....	90

Índice de figuras

Figura 1 Bicicleta de descenso con bieleta en su suspensión trasera [2].....	7
Figura 2 La evolución de la bicicleta [5].....	12
Figura 3 Tipos de bicicletas [6]	13
Figura 4 Cuadro de bicicleta fabricado a partir de fibra de carbono [8]	14
Figura 5 Bieleta de la bicicleta Kona Stab [9].....	15
Figura 6 Ingeniería inversa [10]	16
Figura 7 Escaneado 3D mediante escáner de luz blanca [12]	18
Figura 8 Evolución del modelo en el proceso de diseño generativo [13].....	20
Figura 9 Etapas del proceso de optimización topológica [14].....	22
Figura 10 Análisis de elementos finitos de una pieza mecánica [18].....	23
Figura 11 Tecnología de impresión 3D [20]	25
Figura 12 Pieza aeronáutica fabricada mediante impresión 3D [21].....	26
Figura 13 Proceso de postprocesado en fabricación aditiva por fusión de lecho de polvo[22]	27
Figura 14 Funcionamiento de una impresora FDM [23]	28
Figura 15 Proceso de impresión SLA [24]	28
Figura 16 Bieleta, geometría escogida para el proyecto, fuente propia	30
Figura 17 Bieleta modelo CAD en Solid Edge, fuente propia	30
Figura 18 Articulación en el agujero medio de la bieleta en Solid Edge, fuente propia	32
Figura 19 Esquema para el ensayo del cuadro con fuerza en la tija del sillín [27]	34
Figura 20 Geometría y medidas de la Kona Stab [28]	35
Figura 21 Esquema de fuerzas que sufre la bicicleta, fuente propia	35
Figura 22 Esquema de descomposición de fuerzas, fuente propia	36
Figura 23 Esquema bieleta del modelo 2008 de la Kona Stab con aclaraciones de las fuerzas[28].....	37
Figura 24 HandySCAN 3D [29].....	39

Figura 25 Bieleta preparada con los soportes de blu-tack, fuente propia.....	40
Figura 26 Bieleta preparada para el escaneo en mesa, fuente propia	41
Figura 27 Sesión de escaneo, fuente propia	41
Figura 28 Proceso de fusionado de ambos escaneados, fuente propia	42
Figura 29 Construcción de planos y ejes de referencia, fuente propia	43
Figura 30 Sólido exportado desde VX Elements a Solid Edge, fuente propia.....	45
Figura 31 Proceso de vaciado de los agujeros de la pieza, fuente propia.....	46
Figura 32 Bieleta escaneada terminada	46
Figura 33 Bieleta en AL 6061-T6.....	47
Figura 34 Asignación de cargas y restricciones, fuente propia	48
Figura 35 Estudio estático de elementos finitos (esfuerzo), fuente propia.....	49
Figura 36 Estudio estático de elementos finitos (desplazamiento), fuente propia	50
Figura 37 Cargas, condiciones de contorno y regiones a preservar, fuente propia	51
Figura 38 Calidad 25 y reducción de masa del 35%, fuente propia	53
Figura 39 Primera iteración de la optimización topológica, fuente propia	53
Figura 40 Calidad 125 y reducción de masa del 45%, fuente propia	54
Figura 41 Segunda iteración de la optimización topológica, fuente propia	54
Figura 42 Calidad 150 y reducción de masa del 55%, fuente propia	55
Figura 43 Tercera iteración de la optimización topológica, fuente propia.....	55
Figura 44 Calidad 80 y reducción de masa del 51%, fuente propia	56
Figura 45 Cuarta iteración de la optimización topológica, fuente propia	56
Figura 46 Regiones a preservar de la optimización restringida, fuente propia	57
Figura 47 Optimización topológica restringida, fuente propia.....	58
Figura 48 Panel de configuración de PolyNURBS, fuente propia	59
Figura 49 Bieleta refinada (optimización libre), fuente propia	60
Figura 50 Impresora Prusa i3 MK3S[32]	62
Figura 51 Impresora de resina Form 3L [33]	63
Figura 52 Opciones de exportación de STL, fuente propia.....	64
Figura 53 Bieleta original preparada en el UltiMaker Cura, fuente propia.....	65

Figura 54 Bieleta con optimización libre preparada en UltiMaker Cura, fuente propia	65
Figura 55 Bieleta con optimización restringida preparada en UltiMaker Cura, fuente propia	66
Figura 56 Bieleta con optimización libre preparada en Preform, fuente propia.....	68
Figura 57 Bieleta de optimización libre tras sacarla de la impresora de resina, fuente propia	69
Figura 58 Bieleta de optimización libre preparada en el Form Cure para el curado, fuente propia.....	69
Figura 59 Prototipo de la bieleta original impreso (FDM), fuente propia.....	70
Figura 60 Prototipo de la bieleta con optimización libre impreso (FDM), fuente propia ...	70
Figura 61 Prototipo de la bieleta con optimización libre impreso (SLA), fuente propia	70
Figura 62 Prototipo de la bieleta con optimización restringida impreso (FDM), fuente propia	70
Figura 63 Punto de cruce de costes entre impresión 3D y fabricación tradicional [36].....	71
Figura 64 Presupuesto obtenido en i.materialise para la pieza optimizada, fuente propia..	81
Figura 65 Presupuesto obtenido en i.materialise para la pieza original, fuente propia	81

Índice de tablas

Tabla 1 Tabla de propiedades del Aluminio 6061-T6, de MatWeb[25]	31
Tabla 2 Fuerza a aplicar según la norma ISO 4210-6 [27].....	34
Tabla 3 Tabla de propiedades del AL 6061-T6 en Solid Edge, fuente propia	47
Tabla 4 Datos del servicio para la impresora Prusa-I3KS, fuente propia.....	74
Tabla 5 Cálculo de costes del servicio para la impresora Prusa-I3KS, fuente propia.....	74
Tabla 6 Datos del pedido y de la pieza para la impresora Prusa-I3KS, fuente propia	75
Tabla 7 Coste total del pedido para la impresora Prusa-I3KS, fuente propia	75
Tabla 8 Datos del servicio para la impresora FormLabs 3L, fuente propia	77
Tabla 9 Cálculo de costes del servicio para la impresora FormLabs 3L, fuente propia.....	78
Tabla 10 Datos del pedido y de la pieza para la impresora FormLabs 3L, fuente propia ...	78
Tabla 11 Coste total del pedido para la impresora FormLabs 3L, fuente propia	79
Tabla 12 Comparativa de costes en las tres tecnologías de fabricación aditiva, fuente propia	83

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN

La bieleta es un componente esencial en el sistema de suspensión de una bicicleta de descenso. Su función principal es conectar el cuadro con el amortiguador y la rueda trasera, transmitiendo y modulando las cargas que se generan durante la conducción. Debido a las altas sollicitaciones a las que está sometida, impactos, vibraciones y esfuerzos dinámicos, su diseño requiere un equilibrio preciso entre resistencia, rigidez y peso.[1] Una bieleta demasiado pesada penaliza el rendimiento y la maniobrabilidad, mientras que una con baja resistencia puede comprometer la seguridad del ciclista.



Figura 1 Bicicleta de descenso con bieleta en su suspensión trasera [2]

En este proyecto, la bieleta original se toma como punto de partida para un proceso de rediseño completo que combina ingeniería inversa, optimización topológica y fabricación aditiva. Mediante escaneado tridimensional, se obtiene un modelo digital preciso de la pieza, que sirve como base para su análisis estructural y para el desarrollo de nuevas geometrías

optimizadas. La optimización topológica permite eliminar material innecesario sin sacrificar las propiedades mecánicas, lo que se traduce en una reducción de masa significativa.

La complejidad de las formas resultantes hace que la fabricación aditiva en sus diferentes tecnologías sea la opción idónea para materializar el diseño, permitiendo reproducir geometrías imposibles de lograr con métodos convencionales. Este trabajo no solo persigue mejorar el rendimiento estructural y reducir el peso de la bieleta, sino también evaluar el comportamiento de distintas tecnologías de impresión 3D en términos de coste, calidad y prestaciones mecánicas.

1.2 MOTIVACIÓN DEL PROYECTO

El diseño y fabricación de componentes optimizados es un área de creciente interés en la ingeniería, especialmente en sectores como el transporte, donde la reducción de peso y la mejora de prestaciones se traducen en ventajas claras de eficiencia, seguridad y sostenibilidad. En el caso concreto de una bicicleta de descenso, cada gramo cuenta: un menor peso facilita el manejo, mejora la aceleración y reduce la fatiga del ciclista, sin que ello suponga sacrificar la resistencia necesaria para soportar impactos y cargas extremas.

La bieleta, al ser una pieza clave del sistema de suspensión, representa un candidato ideal para aplicar técnicas de rediseño avanzado. Partir de un escaneado 3D de alta precisión permite capturar fielmente la geometría original y reproducirla en un entorno digital, lo que facilita el análisis y la optimización posterior. La ingeniería inversa, unida a la optimización topológica, ofrece la oportunidad de eliminar material innecesario, mejorar el comportamiento estructural y, al mismo tiempo, reducir costes de producción y huella ambiental.

El uso de fabricación aditiva añade otra capa de motivación: posibilita materializar formas complejas que los procesos tradicionales no pueden producir, y permite explorar diferentes tecnologías y materiales en busca del equilibrio ideal entre coste, prestaciones mecánicas y durabilidad. Además, esta metodología abre la puerta a la personalización de componentes, ajustando sus propiedades a las necesidades y estilo de conducción de cada ciclista, algo cada vez más demandado en el mercado actual.

En este contexto, el proyecto busca no solo mejorar una pieza específica, sino también demostrar que la combinación de ingeniería inversa, optimización topológica y fabricación aditiva constituye una estrategia viable y eficaz para el desarrollo de componentes de alto rendimiento, eficientes en el uso de recursos y con un gran potencial de innovación para la industria ciclista y otros sectores.

1.3 OBJETIVOS DEL PROYECTO

El proyecto busca ofrecer una visión integral de la viabilidad técnica, económica y funcional de combinar ingeniería inversa, optimización topológica y fabricación aditiva para la creación de componentes mecánicos de alto rendimiento, con un enfoque orientado tanto a la innovación como a la sostenibilidad. Entre sus objetivos se encuentran los siguientes:

- Rediseño y fabricación de la bieleta mediante impresión 3D y optimización topológica: el objetivo principal es fabricar una bieleta optimizada para una bicicleta de descenso aplicando un proceso que combina ingeniería inversa y optimización topológica. Con ello, se persigue maximizar el rendimiento de la pieza, reducir su masa y mejorar su eficiencia económica, tanto en términos de coste de producción como de consumo de material.
- Análisis de tecnologías de fabricación aditiva: un objetivo secundario es profundizar en el conocimiento de las principales tecnologías de impresión 3D aplicables a piezas estructurales (FDM, SLA, SLS y otras), evaluando su estado actual, sus limitaciones y su potencial de aplicación en la fabricación de componentes optimizados. Este análisis incluirá la comparación de costes, tiempos de producción, calidad superficial y prestaciones mecánicas.
- Diseño optimizado mediante herramientas CAD y simulación: se pretende desarrollar la pieza utilizando software de optimización topológica, sometiendo el modelo a simulaciones de cargas y tensiones representativas de su uso real. El objetivo es reducir al mínimo la cantidad de material empleado sin comprometer la capacidad de la bieleta para soportar los esfuerzos críticos que se generan durante el uso en descenso. Esto permitirá obtener una geometría más eficiente y funcional, adaptada a los requisitos del sistema de suspensión.

1.4 ALINEACIÓN CON LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLES (ODS)

Los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) [3] son una serie de propósitos globales que definió la ONU en el año 2015 con la finalidad de abordar los problemas globales que afectan a la humanidad en estos tiempos, promoviendo así un planeta más sostenible. Es muy importante que estas metas se implementen en nuestra forma de vida y en nuestros proyectos para entre todos ayudar a superar los problemas más graves que atraviesa la humanidad. A continuación, se exponen los ODS con los que se alinea este proyecto.



Objetivo 8: “Promover el crecimiento económico inclusivo y sostenible, el empleo y el trabajo decente para todos” El desarrollo de las tecnologías de impresión 3D y su implementación a nuevos sectores supone la creación de nuevos trabajos y la mejora de las condiciones en los mismos, además de estimular a las pequeñas y medianas empresas.



Objetivo 9: “Construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización sostenible y fomentar la innovación” La optimización de la geometría de las piezas con el objetivo de reducir el material empleado impulsa una fabricación más sostenible. Además, el proceso de impresión 3D permite el desarrollo de tecnologías innovadoras en la fabricación de piezas.



Objetivo 12: “Garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles” La fabricación aditiva permite una producción más eficiente y sostenible al reducir el desperdicio de material. La optimización topológica asegura que solo se use el material estrictamente necesario.

Capítulo 2. ESTADO DEL ARTE

2.1 BIELETA DE UNA BICICLETA

La bicicleta, tal y como la conocemos hoy, es el resultado de más de dos siglos de evolución técnica. Su origen se remonta a principios del siglo XIX, cuando Karl Drais presentó en 1817 la *Laufmaschine* o “máquina andante”, un vehículo de dos ruedas alineadas impulsado con los pies, considerado el precursor de la bicicleta moderna [4]. A finales del siglo XIX, la introducción de pedales, cadenas y ruedas de igual tamaño dio lugar a la “safety bicycle”, mucho más segura y eficiente que los modelos anteriores. Desde entonces, la bicicleta ha experimentado avances continuos en ergonomía, transmisión, materiales y geometrías, adaptándose a una amplia variedad de usos: transporte urbano, competición, ocio o deporte extremo.

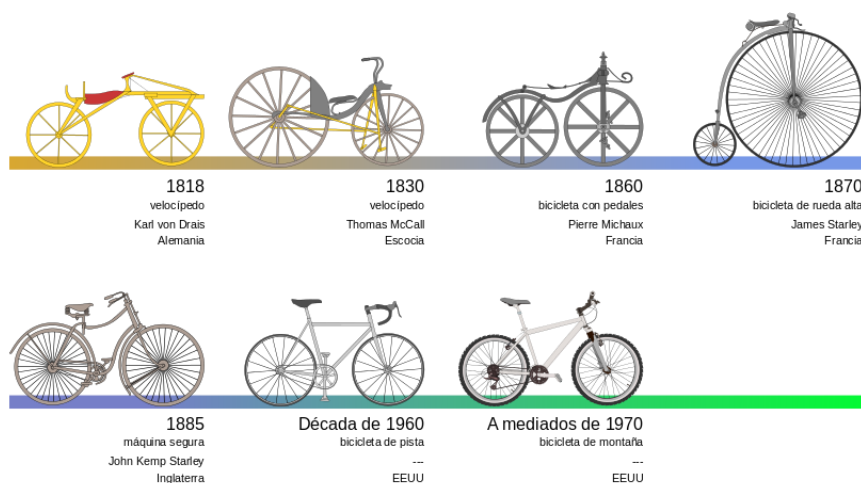


Figura 2 La evolución de la bicicleta [5]

En la actualidad, el mercado ofrece una gran diversidad de modelos, cada uno diseñado para un uso específico. Las bicicletas de carretera destacan por su ligereza, neumáticos estrechos

y geometría enfocada a la velocidad en asfalto. Las bicicletas de montaña, más robustas y con suspensión, están preparadas para terrenos irregulares. Las híbridas combinan características de ambas para un uso recreativo y urbano. Las de descenso presentan geometrías específicas y sistemas de suspensión de largo recorrido para afrontar pistas técnicas a alta velocidad. A ello se suman las bicicletas eléctricas, que incorporan asistencia al pedaleo para ampliar el rango de usuarios y usos. Estas diferencias se basan en la geometría del cuadro, el sistema de suspensión, la transmisión, el tipo de frenos, el ancho de las ruedas y, por supuesto, el peso total.



Figura 3 Tipos de bicicletas [6]

Dentro de las bicicletas de montaña con doble suspensión, la bieleta es un componente clave. Se trata de una pieza que conecta el cuadro con el amortiguador y, en algunos diseños, con el basculante trasero. Su función es transmitir y modular las fuerzas que provienen de la rueda trasera hacia el sistema de amortiguación, asegurando que las irregularidades del

terreno se absorban de forma eficiente. Un diseño adecuado de la bieleta influye directamente en la progresividad, sensibilidad y capacidad de absorción de la suspensión, así como en la estabilidad general de la bicicleta durante el descenso.

En cualquier disciplina ciclista, el peso de la bicicleta es un factor determinante para el rendimiento. Una bicicleta más ligera requiere menos energía para ser acelerada y facilita su manejo, especialmente en subidas o maniobras técnicas. Actualmente, una bicicleta de montaña de gama alta puede pesar entre 12 y 15 kg, mientras que hace dos o tres décadas era común encontrar modelos que superaban los 17 o incluso 20 kg [7]. Esta reducción ha sido posible gracias a la optimización de diseños y a la introducción de nuevos materiales que combinan resistencia y ligereza.

Históricamente, los cuadros y componentes de bicicleta se fabricaban en acero, valorado por su resistencia, pero penalizado por su peso. Posteriormente, el aluminio se convirtió en el material predominante, gracias a su buena relación rigidez-peso y resistencia a la corrosión. En las últimas décadas, la fibra de carbono ha revolucionado la industria, permitiendo fabricar cuadros y piezas extremadamente ligeros, rígidos y con geometrías complejas. También existen componentes en titanio, magnesio y composites híbridos, aunque su uso está más limitado por cuestiones de coste.



Figura 4 Cuadro de bicicleta fabricado a partir de fibra de carbono [8]

Para este proyecto se ha seleccionado una bicicleta de descenso equipada con un sistema de suspensión trasera de doble bieleta, diseñada para soportar altas cargas y absorber impactos de gran magnitud. La bieleta objeto de análisis conecta el amortiguador con el basculante, y su geometría original se ha tomado como punto de partida para un proceso de optimización que busca equilibrar ligereza y resistencia. El trabajo comienza con el escaneado tridimensional de la pieza original, que proporciona un modelo digital preciso sobre el que aplicar técnicas de optimización topológica y, finalmente, fabricar mediante impresión 3D. El objetivo es obtener una nueva versión de la bieleta con menor masa, manteniendo o incluso mejorando el rendimiento estructural respecto al diseño original.



Figura 5 Bieleta de la bicicleta Kona Stab [9]

2.2 INGENIERÍA INVERSA Y ESCANEEO 3D

La ingeniería inversa es un proceso que consiste en analizar un producto existente para comprender su diseño, funcionamiento y características, con el fin de reproducirlo, mejorarlo o adaptarlo a nuevas necesidades. A diferencia del diseño convencional, que parte de una idea para crear un objeto, la ingeniería inversa parte del objeto físico para llegar a un modelo digital o esquema técnico.



Figura 6 Ingeniería inversa [10]

El concepto de ingeniería inversa se remonta a la Segunda Guerra Mundial, cuando era habitual que las potencias intentaran replicar la tecnología de vehículos, armas y equipamientos capturados al enemigo [11]. Con el tiempo, su uso se extendió a sectores como la automoción, la aeronáutica, la fabricación industrial y, más recientemente, la medicina, la arqueología y el diseño de productos de consumo.

En las últimas décadas, el desarrollo de tecnologías de digitalización tridimensional y software de modelado ha permitido que la ingeniería inversa sea más rápida, precisa y

accesible. Actualmente, su aplicación se ve potenciada por la fabricación aditiva, ya que facilita la reproducción o modificación de piezas con geometrías complejas que antes resultaban imposibles o demasiado costosas de fabricar.

Entre sus aplicaciones más comunes destacan:

- Reparación y mantenimiento de componentes sin planos originales: en sectores como la automoción, la aeronáutica o la maquinaria industrial, es habitual encontrar piezas antiguas o descatalogadas para las que no existen planos ni modelos digitales. La ingeniería inversa permite escanear estos componentes, generar un modelo 3D preciso y, a partir de él, fabricar piezas idénticas o compatibles.
- Rediseño y optimización de piezas para mejorar rendimiento o reducir peso: una vez obtenida la geometría digital, es posible modificarla para mejorar sus prestaciones. Esto incluye la reducción de masa mediante optimización topológica, la incorporación de refuerzos en zonas críticas o la adaptación de la pieza para un nuevo sistema de montaje.
- Digitalización del patrimonio en arte, arqueología y arquitectura: el escaneo 3D es ampliamente utilizado para registrar esculturas, monumentos y artefactos arqueológicos, generando copias digitales exactas que permiten su estudio, restauración o reproducción sin manipular el original.
- Creación de prótesis y adaptaciones personalizadas en el ámbito médico: en medicina y odontología, la ingeniería inversa permite fabricar prótesis, implantes y órtesis perfectamente adaptadas a la anatomía de cada paciente.
- Integración en procesos de fabricación aditiva para prototipado o producción final: una vez digitalizada la pieza, esta puede integrarse en un flujo de trabajo de fabricación aditiva. Esto agiliza la creación de prototipos, ya que elimina la necesidad de modelado manual, y también permite producir piezas finales directamente a partir del archivo 3D.

2.2.1 ESCANEADO 3D

El escaneado 3D es la herramienta principal para capturar la geometría de un objeto físico y generar un modelo digital de alta precisión. Existen diferentes tecnologías, clasificadas principalmente por el principio físico que emplean:

- Escaneo láser: proyecta un haz láser sobre la superficie y registra el tiempo o ángulo de retorno de la señal. Posee una alta precisión y alcance, adecuado para piezas grandes.
- Fotogrametría: utiliza imágenes tomadas desde múltiples ángulos para reconstruir un modelo 3D. Más económica pero menos precisa para detalles finos.
- Escaneo por luz estructurada: proyecta un patrón de luz sobre la pieza y mide la deformación de ese patrón para calcular la geometría.
- Escaneo por luz blanca: variante de la luz estructurada que emplea luz blanca en lugar de azul o láser, ofreciendo alta precisión y sin riesgos para la vista.
- Escaneo por contacto: utiliza una sonda física para registrar puntos sobre la superficie; es extremadamente preciso, pero lento y no adecuado para piezas frágiles o con geometrías muy complejas.



Figura 7 Escaneado 3D mediante escáner de luz blanca [12]

Para este proyecto se ha optado por un escáner de luz blanca sin contacto, ya que ofrece un equilibrio óptimo entre precisión, velocidad y facilidad de uso para piezas de tamaño medio como una bieleta. Al no requerir contacto físico, evita dañar la superficie o alterar la geometría, y su capacidad para capturar detalles finos resulta ideal para reproducir fielmente las zonas críticas de la pieza.

Sin embargo, el escaneado no se reduce solo a escanear la pieza, sino que constituye un largo proceso. El proceso comienza con la preparación de la pieza, asegurándose de que su superficie esté limpia y estable, y aplicando, si es necesario, marcadores de referencia para facilitar el registro.

A continuación, se configura el escáner de luz blanca y el software de adquisición, definiendo parámetros como resolución, área de trabajo y condiciones de iluminación. El escaneo se realiza capturando la geometría desde múltiples ángulos para evitar zonas ocultas, con registro en tiempo real en el software. Los datos obtenidos se procesan en el software donde se alinean y combinan las capturas en una nube de puntos única, eliminando ruido y puntos erróneos.

Esta nube se convierte en una malla poligonal optimizada, reparando agujeros, suavizando superficies y, si es necesario, simplificando su geometría. Finalmente, la malla se exporta a un software CAD para reconstruir la pieza mediante superficies y sólidos, obteniendo un modelo editable que servirá como base para la optimización topológica y el rediseño final.

2.3 DISEÑO GENERATIVO

El diseño generativo es una metodología de desarrollo de productos que utiliza algoritmos avanzados y capacidad de cálculo para explorar, de forma automática, múltiples soluciones de diseño a partir de un conjunto definido de requisitos y restricciones. A diferencia del diseño tradicional, en el que el ingeniero propone una solución concreta, el diseño generativo plantea un problema y deja que el software genere y evalúe cientos o miles de alternativas posibles, optimizando según criterios como resistencia, peso, coste o materiales. Esta técnica, cada vez más extendida gracias a la mejora de las herramientas CAD y la potencia de cálculo, permite obtener geometrías complejas e innovadoras que difícilmente surgirían de un proceso de diseño convencional [13].



Figura 8 Evolución del modelo en el proceso de diseño generativo [13]

En el caso de la bieleta analizada en este proyecto, el diseño generativo se plantea con el objetivo de mejorar la versión original, reduciendo su masa y manteniendo la resistencia y rigidez necesarias para soportar las solicitaciones propias de una bicicleta de descenso. Las restricciones de diseño incluyen las zonas de unión con el cuadro, el amortiguador y el basculante, así como las fuerzas y presiones transmitidas durante el uso real. Otras

limitaciones importantes son las condiciones de fabricación, en este caso, ligadas a la impresión 3D, y el mantenimiento de tolerancias críticas. Durante el proceso, es imprescindible comprobar de forma continua la viabilidad estructural y funcional de las propuestas generadas, para descartar aquellas que, aunque optimizadas en peso, no cumplan con los requisitos mecánicos mínimos.

La optimización topológica es una técnica estrechamente relacionada con el diseño generativo, pero no idéntica. Mientras que la optimización topológica consiste en redistribuir el material de una pieza existente para mejorar su eficiencia estructural, el diseño generativo parte de un espacio de diseño definido y genera desde cero múltiples soluciones posibles, evaluando automáticamente su rendimiento [14]. La optimización topológica, por su parte, suele centrarse en la reducción de peso y el aumento de rigidez, eliminando material en zonas que no contribuyen significativamente a la resistencia. Entre sus ventajas destaca su contribución a la sostenibilidad, ya que permite reducir el consumo de material y, por tanto, el impacto ambiental de la fabricación, además de disminuir el consumo energético durante el uso en aplicaciones como el transporte.

El proceso de diseño generativo seguido en este proyecto comienza con la creación del modelo de la pieza original en un entorno CAD. A partir de ahí, se definen las restricciones geométricas, las cargas y las condiciones de contorno. El software genera múltiples iteraciones, evaluando parámetros como desplazamiento, tensiones y peso. Una vez se selecciona la geometría más prometedora, se verifica su viabilidad estructural y se realizan ajustes para adaptarla a los requisitos de fabricación. Finalmente, se obtiene un modelo optimizado listo para ser fabricado y evaluado físicamente.

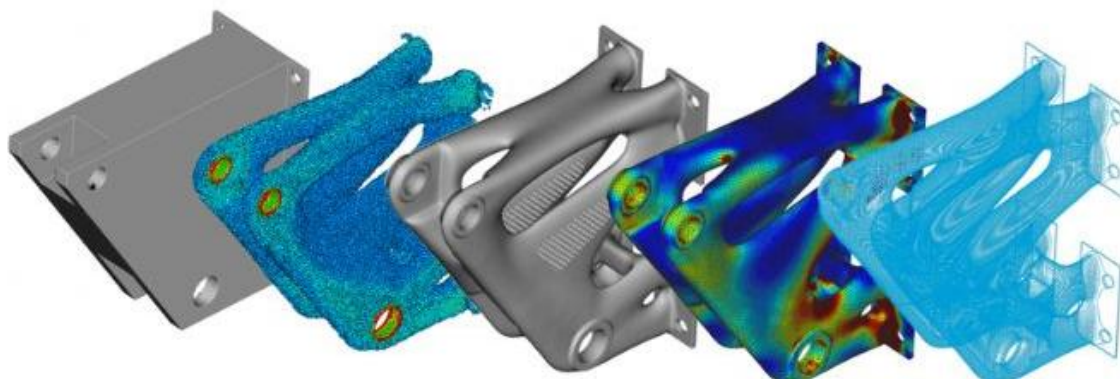


Figura 9 Etapas del proceso de optimización topológica [14]

En cuanto al software de diseño generativo existen distintas soluciones CAD que han incorporado módulos de diseño generativo, como Autodesk Fusion 360, Siemens NX, PTC Creo o SolidWorks 3DEXPERIENCE [15]. Estas herramientas se han expandido rápidamente en sectores como la automoción, la aeronáutica, el diseño industrial o la ingeniería biomédica, permitiendo reducir drásticamente los tiempos de desarrollo y obtener estructuras con un nivel de optimización imposible de alcanzar mediante métodos convencionales.

En el caso concreto de este proyecto, el diseño generativo se ha desarrollado con Solid Edge [16], software de Siemens que integra modelado paramétrico, simulación y capacidades generativas en un mismo entorno de trabajo. Esta herramienta permite definir las zonas de material que deben conservarse, establecer condiciones de carga y contorno, y fijar objetivos como la reducción de peso o la mejora de rigidez. A partir de esos parámetros, Solid Edge genera automáticamente diversas alternativas, que pueden evaluarse y refinarse antes de seleccionar el diseño final más adecuado para su fabricación mediante impresión 3D.

2.4 ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS

El Análisis de Elementos Finitos es una técnica numérica utilizada para predecir el comportamiento de un objeto o estructura bajo diferentes condiciones de carga. Se basa en dividir la geometría del modelo en un conjunto finito de elementos interconectados, sobre los cuales se resuelven de forma aproximada las ecuaciones que describen su respuesta física [17]. Este método permite evaluar parámetros como tensiones, deformaciones, desplazamientos o temperaturas, proporcionando una visión detallada del rendimiento estructural antes de fabricar la pieza real.

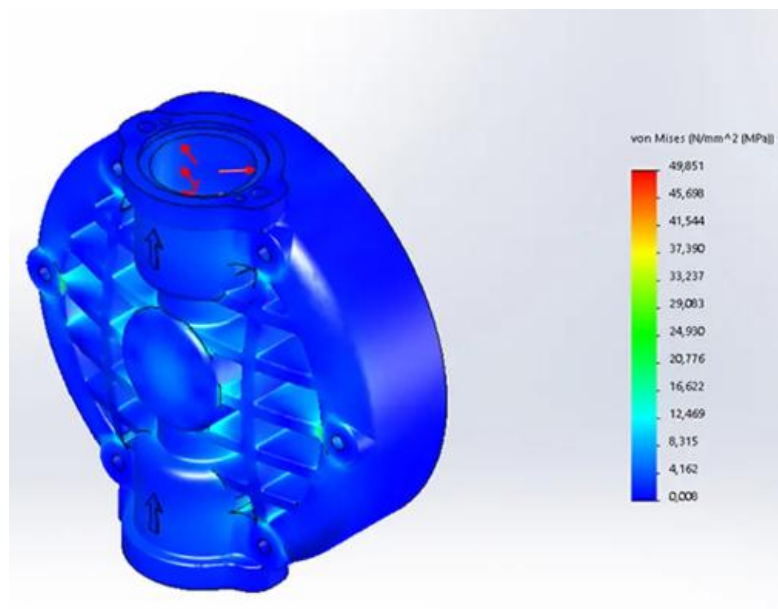


Figura 10 Análisis de elementos finitos de una pieza mecánica [18]

El procedimiento consiste, en primer lugar, en importar o generar el modelo CAD de la pieza y definir sus propiedades materiales (módulo de elasticidad, coeficiente de Poisson, densidad, etc.). Posteriormente, se establece una malla que divide el volumen en elementos más pequeños, sobre los que se aplican las condiciones de contorno y cargas representativas del uso real: fuerzas, presiones, momentos, aceleraciones o restricciones de movimiento.

Una vez definido el problema, el software resuelve las ecuaciones para cada elemento y obtiene la respuesta global del modelo.

Este análisis es ampliamente utilizado en sectores como la ingeniería mecánica, la automoción, la aeronáutica o la biomecánica, ya que permite optimizar diseños, validar su seguridad y reducir el número de prototipos físicos necesarios. Existen numerosos programas que integran módulos de análisis por elementos finitos, como ANSYS, Siemens NX Nastran, SolidWorks o Solid Edge, entre otros.

Uno de los resultados más utilizados en este tipo de análisis es la tensión equivalente de Von Mises, que combina las diferentes componentes de tensión en un solo valor para facilitar la comparación con el límite elástico del material. Si la tensión de Von Mises en cualquier punto de la pieza supera la resistencia del material, existe riesgo de fallo estructural. Otro resultado clave es el desplazamiento, que indica la deformación global de la pieza bajo carga y permite verificar si se mantiene dentro de los límites funcionales.

2.5 FABRICACIÓN ADITIVA

La fabricación aditiva, también conocida como impresión 3D, es un conjunto de procesos de manufactura en los que el material se deposita de manera controlada, capa a capa, para construir un objeto a partir de un modelo digital tridimensional [19]. A diferencia de los métodos tradicionales, que suelen partir de un bloque de material al que se le elimina materia (mecanizado) o emplean moldes (fundición), en la fabricación aditiva el objeto se crea directamente mediante la adición de material únicamente donde es necesario.

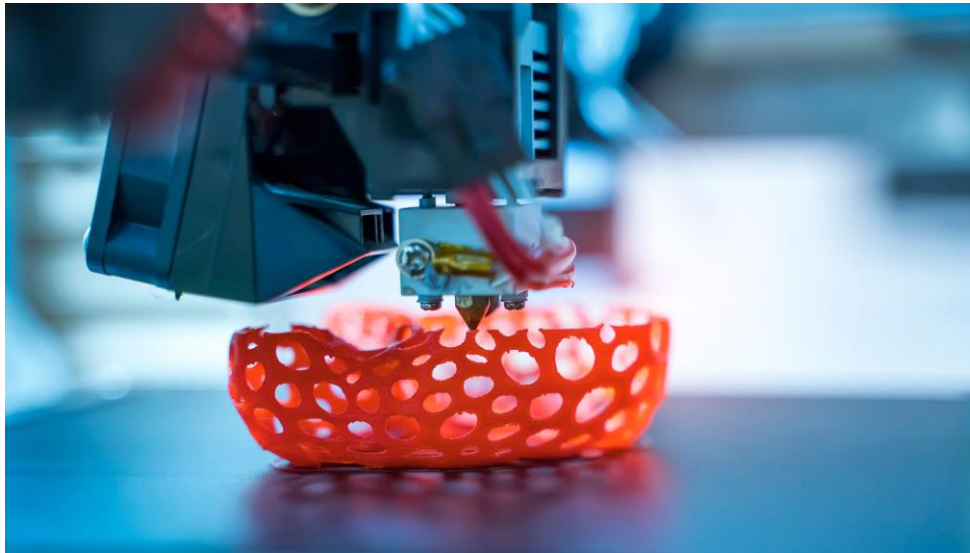


Figura 11 Tecnología de impresión 3D [20]

Esta tecnología permite producir geometrías que serían imposibles o muy costosas de fabricar mediante procesos convencionales, como estructuras internas huecas, entramados complejos o canales internos curvos. Por ejemplo, en el sector aeronáutico se han fabricado componentes estructurales con entramados ligeros que reducen significativamente el peso de la aeronave, y en el ámbito médico se diseñan prótesis personalizadas que encajan de forma exacta con la anatomía del paciente.

Entre las principales ventajas de la fabricación aditiva destaca, en primer lugar, la libertad de diseño, ya que los ingenieros y diseñadores no se ven limitados por las restricciones

geométricas propias de procesos como el mecanizado o el moldeo, lo que abre la puerta a soluciones innovadoras. A ello se suma la capacidad de producir geometrías complejas, integrando en una sola pieza funciones que antes requerían múltiples componentes y reduciendo así el número de ensamblajes necesarios.

Otra ventaja importante es la personalización, pues resulta viable fabricar piezas adaptadas a las necesidades específicas de un usuario o aplicación sin que esto suponga un incremento significativo de los costes, algo especialmente valioso en sectores como la medicina o el deporte de alto rendimiento. Finalmente, la fabricación aditiva favorece la optimización de material, ya que se deposita únicamente lo necesario para la pieza, lo que minimiza el desperdicio y contribuye a la sostenibilidad del proceso productivo.

Cuando se planifica la fabricación de una pieza mediante impresión 3D, todo el proceso de diseño debe enfocarse a este objetivo. Esto implica optimizar la geometría pensando en la orientación de impresión, minimizar la necesidad de soportes, seleccionar materiales compatibles con la tecnología elegida y prever tolerancias y acabados que se ajusten a los requisitos finales.

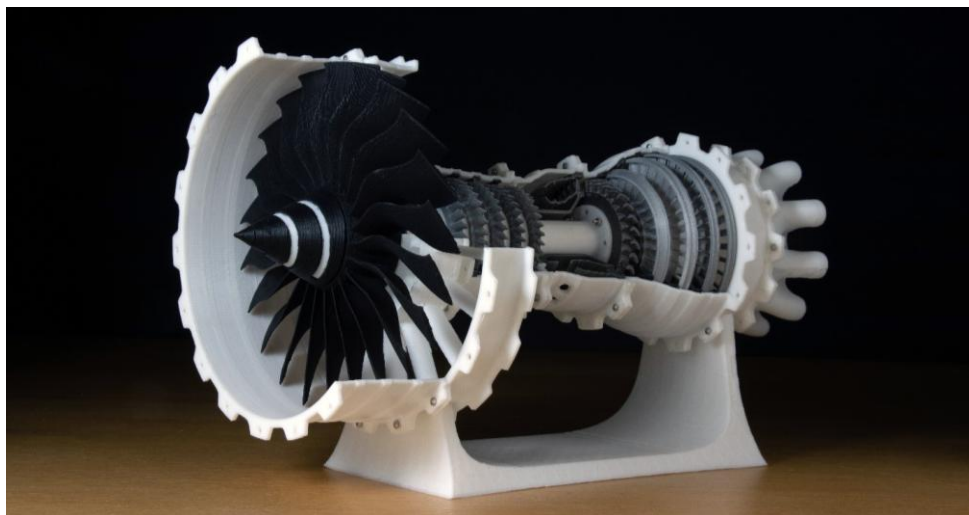


Figura 12 Pieza aeronáutica fabricada mediante impresión 3D [21]

La fabricación aditiva es un campo en rápido crecimiento, con mejoras constantes en velocidad, calidad de materiales, precisión y tamaño de las piezas que se pueden producir. Lo que hace pocos años estaba restringido a prototipos, hoy se emplea en producción de piezas finales en sectores como el automovilismo, la medicina o el deporte de alto rendimiento.

Entre los procesos más comunes de impresión 3D se encuentran:

- Fusión por lecho de polvo (PBF): en esta tecnología una fina capa de polvo metálico o polimérico se funde mediante láser o haz de electrones para formar la pieza. Los materiales más comunes para esta tecnología son el acero inoxidable, el titanio, el aluminio o poliamidas reforzadas.



Figura 13 Proceso de postprocesado en fabricación aditiva por fusión de lecho de polvo[22]

- Extrusión de material (FDM): consiste en la fundición de un material termoplástico que se extruye a través de una boquilla, depositándose capa a capa. Los materiales más comunes empleados en este proceso son el PLA, ABS, PETG, nylon o compuestos con fibra de carbono.

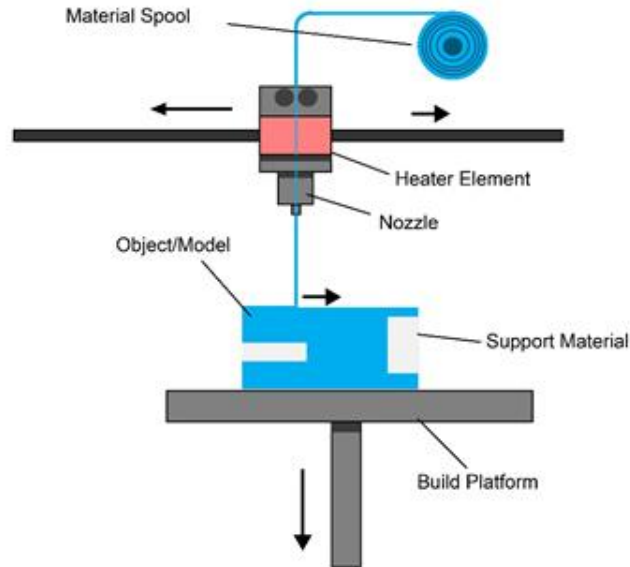


Figura 14 Funcionamiento de una impresora FDM [23]

- Estereolitografía (SLA): En este proceso una resina líquida fotosensible se solidifica capa a capa mediante un láser UV. Los materiales más empleados son resinas estándar, resinas de alta resistencia, biocompatibles o resistentes a altas temperaturas.

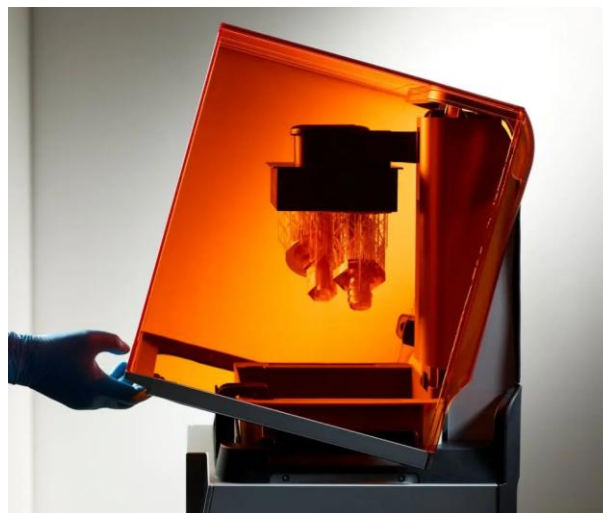


Figura 15 Proceso de impresión SLA [24]

En muchos casos, tras la impresión, es necesario un postprocesado para obtener la calidad final requerida. Esto puede incluir la eliminación de soportes, lijado, pulido, tratamientos térmicos para mejorar propiedades mecánicas o sinterizado adicional en el caso de metales.

A pesar de sus ventajas, la fabricación aditiva también presenta limitaciones, especialmente en el ámbito económico. El control de calidad puede ser complejo debido a la variabilidad entre piezas, los materiales de alto rendimiento suelen tener costes elevados y, para grandes volúmenes de producción, los tiempos de fabricación y el coste por pieza pueden resultar menos competitivos que los procesos tradicionales como el mecanizado o la fundición.

Capítulo 3. PROPUESTA DEL PROYECTO

3.1 GEOMETRÍA

Para este proyecto se ha escogido como geometría la bieleta de una bicicleta Kona Stab, el modelo de 2008. La geometría viene dada por la propia pieza ya existente y la obtención de todas las medidas se llevarán a cabo a través de la ingeniería inversa.



Figura 16 Bieleta, geometría escogida para el proyecto, fuente propia

Se escaneará el modelo original y se pasará a CAD a tamaño real. La siguiente figura muestra el modelo CAD en Solid Edge [16]. Para llegar a este modelo es necesario el escaneado y un trabajo de edición de malla y de conversión a sólido.

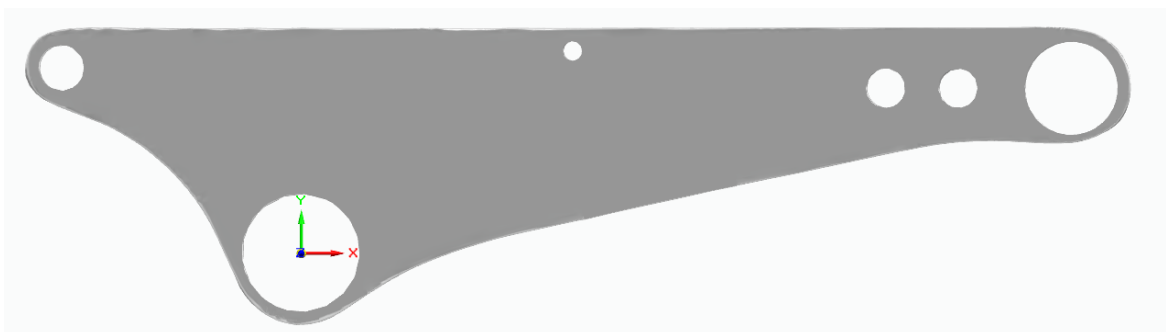


Figura 17 Bieleta modelo CAD en Solid Edge, fuente propia

3.2 MATERIAL

Para este proyecto se emplea como material el aluminio, concretamente la aleación 6061-T6, ya que se trata del material original con el que está fabricada la bieleta escaneada. Esta elección no solo mantiene la coherencia con el diseño inicial, sino que también responde a las excelentes propiedades mecánicas que ofrece esta aleación en aplicaciones estructurales. El **aluminio 6061-T6** es ampliamente utilizado en la industria del ciclismo, especialmente en cuadros y componentes de bicicletas, debido a su buena relación entre resistencia y peso, alta resistencia a la corrosión y buena soldabilidad. Presenta un límite elástico de 275,79 MPa y una densidad de 2,7 g/cm³, lo que lo convierte en un material ligero y a la vez suficientemente resistente para soportar las cargas propias del uso en una bicicleta de montaña.

En comparación con otros materiales comúnmente empleados en bicicletas, como el acero y la fibra de carbono, el aluminio 6061-T6 ofrece un equilibrio intermedio. El acero, aunque más resistente, es considerablemente más pesado, lo que penaliza el rendimiento en términos de peso total del sistema. Por otro lado, la fibra de carbono es más ligera y puede alcanzar mayores rigideces, pero resulta mucho más costosa, menos resistente a impactos y más difícil de reparar. Por tanto, el aluminio 6061-T6 representa una opción óptima para este tipo de componentes, combinando ligereza, resistencia estructural, durabilidad y un coste razonable, lo que justifica su elección en el presente proyecto.

Tabla 1 Tabla de propiedades del Aluminio 6061-T6, de MatWeb[25]

Physical Properties	Metric	English	Comments
Density	2.70 g/cc	0.0975 lb/in ³	AA; Typical
Mechanical Properties	Metric	English	Comments
Hardness, Brinell	95	95	AA; Typical; 500 g load; 10 mm ball
Hardness, Knoop	120	120	Converted from Brinell Hardness Value
Hardness, Rockwell A	40	40	Converted from Brinell Hardness Value
Hardness, Rockwell B	60	60	Converted from Brinell Hardness Value
Hardness, Vickers	107	107	Converted from Brinell Hardness Value
Tensile Strength, Ultimate	310 MPa	45000 psi	AA; Typical

3.3 CONDICIONES DE CONTORNO

En el contexto del análisis estructural de una pieza, las condiciones de contorno son aquellas restricciones mecánicas que se aplican para simular cómo la pieza está sujeta o conectada a otros elementos dentro de un conjunto. Estas condiciones limitan los grados de libertad de la pieza.

En el caso de la bieleta analizada, el agujero central se define como una articulación fija, lo que significa que ese punto no se desplaza ni rota en ninguna dirección. Esta restricción simula la unión de la bieleta con el chasis de la bicicleta, donde normalmente se encuentra un eje pasante que mantiene la bieleta firmemente unida. Esta condición de contorno es fundamental para asegurar que las simulaciones y la optimización estructural se realicen bajo condiciones de carga reales, ya que cualquier deformación o desplazamiento debe calcularse respecto a este punto fijo.



Figura 18 Articulación en el agujero medio de la bieleta en Solid Edge, fuente propia

3.4 CARGAS

Los requisitos de seguridad para bicicletas se recogen en la norma UNE-EN ISO 4210 [26], titulada: “Requisitos de seguridad para bicicletas”, en concreto, la sexta sección de esta norma que se centra en los métodos de ensayo del cuadro y la horquilla. Aunque esta sección está enfocada específicamente en el cuadro y la horquilla de la bicicleta, se puede aplicar al caso de la bieleta, ya que forma parte del sistema estructural de la suspensión trasera y soporta esfuerzos similares.

Esta norma se basa en los ensayos de bicicletas para adultos y propone las cargas según la disciplina de ciclismo. En este proyecto se estudiarán los ensayos propuestos para bicicletas pertenecientes a la categoría de bicicletas de montaña para uso severo (severe off-road use), puesto que la bieleta analizada pertenece a una Kona Stab, un modelo diseñado específicamente para descenso (down hill). Esta categoría es la que contempla las condiciones de carga más exigentes, debido a la intensidad de uso y los bruscos impactos que sufren las bicicletas de descenso. Por lo tanto, escoger esta categoría como referencia no solo se ajusta al uso real que va a tener la pieza, sino que también resulta clave para poder optimizarla con sentido, asegurando que su comportamiento estructural este a la altura.

Según la norma, hay distintos ensayos posibles en el cuadro. Este trabajo se centra en el ensayo de fatiga con una fuerza vertical, que sitúa la carga sobre la tija del sillín.

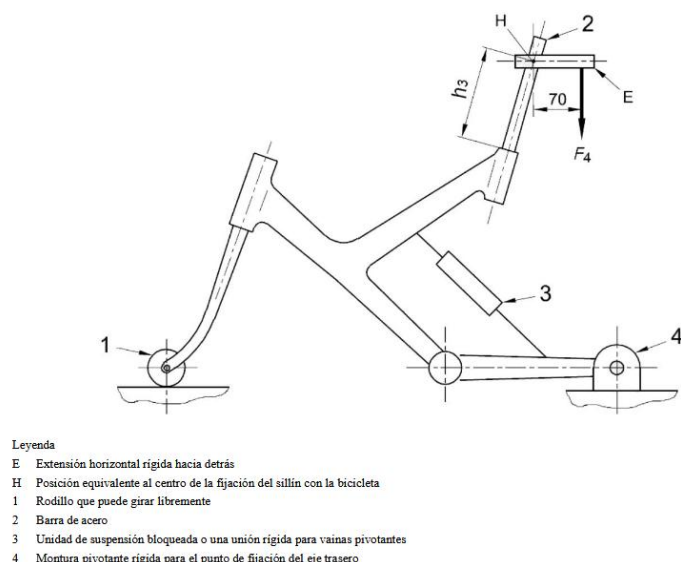


Figura 19 Esquema para el ensayo del cuadro con fuerza en la tija del sillín [27]

El diagrama del ensayo ubica la fuerza en la tija del sillín, y la carga de la misma se especifica en la siguiente tabla de la norma.

Tabla 2 Fuerza a aplicar según la norma ISO 4210-6 [27]

Tipo de bicicleta	Fuerzas en newtons			
	Bicicletas de paseo	Bicicletas para adultos jóvenes	Bicicletas de montaña	Bicicletas de carreras
Fuerza, F_4	1 000	500	1 200	1 200

En este caso, se emplea la carga $P=1200\text{N}$, puesto que la pieza estudiada es una bieleta perteneciente a una bicicleta de montaña. Es necesario trasladar la carga descrita por la norma al punto de referencia, es decir, a la bieleta. Para ello, se han realizado los siguientes cálculos.

3.4.1 TRASLADO DE LAS CARGAS A LA BIELETA

Para realizar los cálculos pertinentes que permiten trasladar la fuerza aplicada sobre la tija del sillín hasta la bieleta, es necesario conocer la geometría y medidas de la bicicleta.

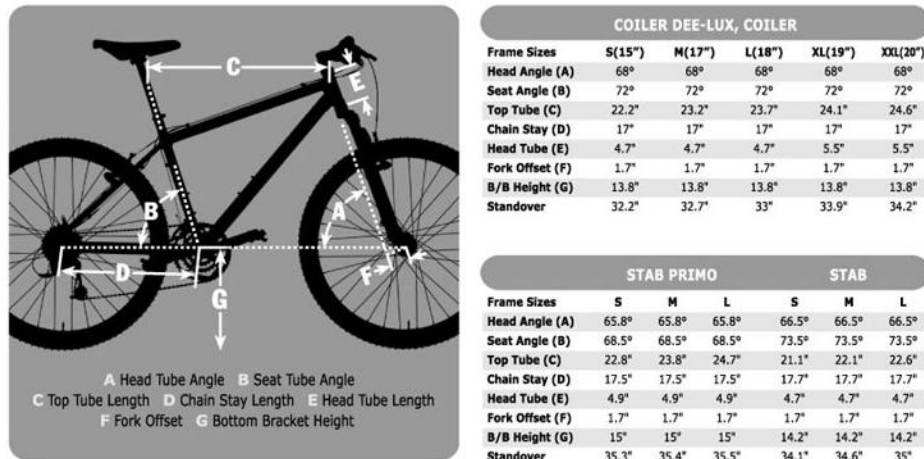


Figura 20 Geometría y medidas de la Kona Stab [28]

Se modela el cuadro de una bicicleta tipo Kona Stab (modelo 2008) como un sistema articulado plano. La fuerza aplicada es de 1200N en un punto del sillín a 70 mm del centro, según lo establecido por la norma UNE-EN ISO 4210-6. Al trasladar esta primera carga al centro del sillín aparece un momento de valor 84Nm y sentido antihorario.

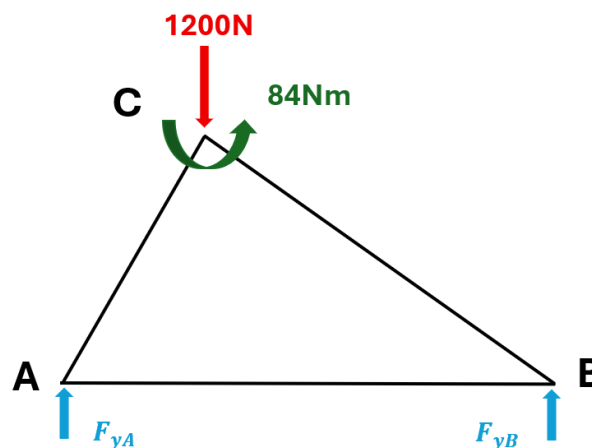


Figura 21 Esquema de fuerzas que sufre la bicicleta, fuente propia

El punto A representa el eje de la rueda trasera, el punto B el eje de la rueda delantera y el punto C es el de aplicación de la fuerza vertical en el sillín.

A partir del equilibrio de fuerzas y momentos ($\sum F_x = 0$, $\sum F_y = 0$, $\sum M = 0$) se resuelven las fuerzas verticales que sufren los ejes de cada una de las ruedas:

$$F_{yA} = 963,143N \text{ y } F_{yB} = 236,857N$$

Esto indica que aproximadamente el 80% de la carga es soportada en el punto A, mientras que el 20% restante lo asume el eje de la rueda delantera (punto B).

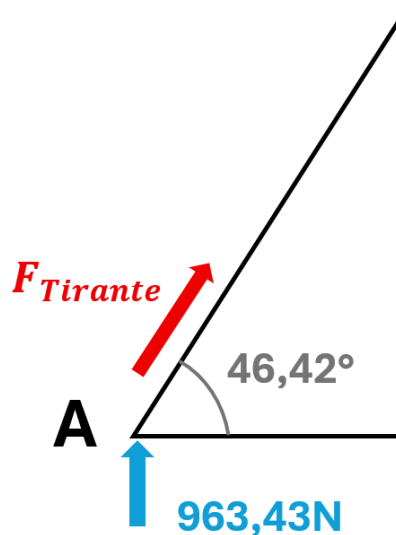


Figura 22 Esquema de descomposición de fuerzas, fuente propia

Mediante la geometría de la bicicleta se puede conocer también el componente de la fuerza que se transmite desde el eje de la rueda trasera hacia el tirante superior. Carga que posteriormente será transmitida a la bieleta.

$$F_{Tirante} = \frac{F_{yA}}{\sin(\alpha)} = \frac{963,143}{\sin(46,42^\circ)} = 1327,94N$$

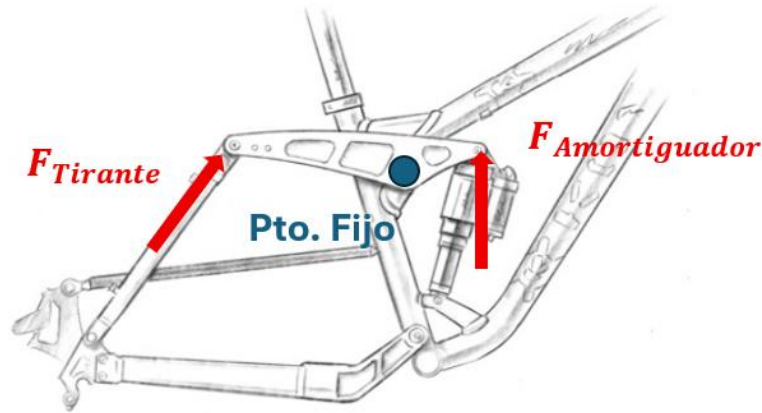


Figura 23 Esquema bieleta del modelo 2008 de la Kona Stab con aclaraciones de las fuerzas[28]

A continuación, se aplica la condición de equilibrio que asegura que respecto el punto fijo de la bieleta el sumatorio de momentos debe ser nulo. A través de esta condición se determina el valor de la fuerza que sufre el extremo de la bieleta conectado con el amortiguador.

$$F_{\text{tirante}} \times \text{brazo}_{\text{tirante}} = F_{\text{amortiguador}} \times \text{brazo}_{\text{amortiguador}}$$

$$F_{\text{amortiguador}} = \frac{1329,94 \times 73}{190} = 510,98N$$

Por lo tanto, las fuerzas que llegan a la bieleta a partir de la carga original sobre la tija del sillín son de 1329,94N desde el tirante superior, que descompuesta está formada por un componente vertical de 963,43N y un componente horizontal de 916,82 N. Y una fuerza vertical de 510,98N que llega desde el amortiguador trasero.

Capítulo 4. DESARROLLO DEL TRABAJO

4.1 PROPUESTA DE UN PROCESO DE DISEÑO Y FABRICACIÓN

El proceso seguido en el desarrollo de este trabajo de fin de grado se basa en una propuesta metodológica que integra herramientas de ingeniería inversa, optimización topológica y fabricación aditiva.

Todo el desarrollo parte de una pieza original ya existente, sobre la cual se aplicó ingeniería inversa como punto de partida. Para ello, se recurrió al escaneado 3D de la pieza, obteniendo una malla que reproduce su geometría. Aunque dicha malla presentaba algunas imperfecciones inherentes al proceso de digitalización, fue tratada cuidadosamente hasta convertirse en una geometría limpia y válida, apta para su posterior trabajo en un entorno CAD.

Una vez reparada y adaptada la malla, esta se exportó al software Solid Edge, donde se llevaron a cabo técnicas de optimización topológica. A través de la definición de cargas, restricciones y zonas funcionales, fue posible reducir el volumen de la pieza sin comprometer sus características mecánicas.

Finalmente, la pieza optimizada fue fabricada mediante impresión 3D. Esta tecnología resultó especialmente adecuada para materializar una geometría compleja, que habría sido difícil de producir mediante procesos convencionales.

4.2 ESCANEADO DE LA GEOMETRÍA

Siguiendo la metodología definida para el proyecto, el primer paso es la aplicación de la ingeniería inversa. Para ello, se ha escogido un escáner 3D portátil estándar, en concreto el HandySCAN 3D de la serie silver de Creaform.



Figura 24 HandySCAN 3D [29]

Este escáner se basa en el método de posicionamiento geométrico por referencia, para ello emplea una serie de pegatinas circulares que colocan la pieza en el espacio. Este modelo es capaz de emitir 14 líneas de láser azules y consigue resultados con una exactitud de hasta 0,040mm.

Para poder conseguir un escaneado lo más fiel a la realidad y que la pieza no se confundiese con la plataforma de escaneado, se procedió a elevar la bieleta de la plataforma. Para ello, se emplearán como soporte cuatro bolas de blu-tack, dispuestas en cuatro puntos distintos de la pieza.

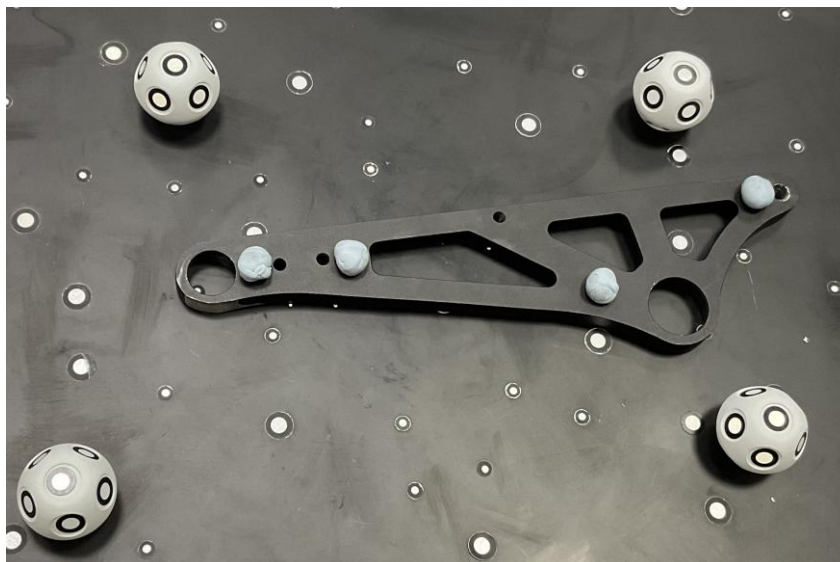


Figura 25 Bieleta preparada con los soportes de blu-tack, fuente propia

El escáner se basa en la emisión de patrones de luz láser que se proyectan sobre la superficie de la pieza. Esta luz rebota sobre la pieza y es captada por cámaras integradas en el escáner, permitiendo reconstruir la forma tridimensional del objeto mediante la generación de una nube de puntos. El propio escáner se ayuda de una serie de pegatinas de puntos y bolas de referencia que permiten ubicar la pieza en el espacio.

Se realizarán varias sesiones de escaneado, una de la parte delantera y otra de la parte trasera de la pieza, y más tarde se combinarán todas ellas para generar una sola malla de puntos.

Finalmente, tras probar con la plataforma de color negro, se decidió cambiar a una plataforma de color blanco que permitía mayor contraste con el color de la pieza, y, por tanto, un mejor escaneado.

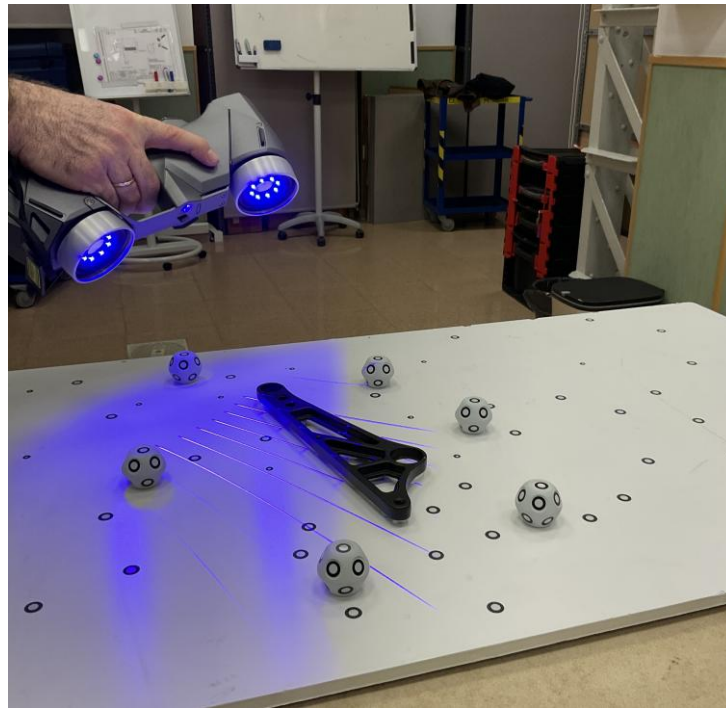


Figura 26 Bieleta preparada para el escaneo en mesa, fuente propia

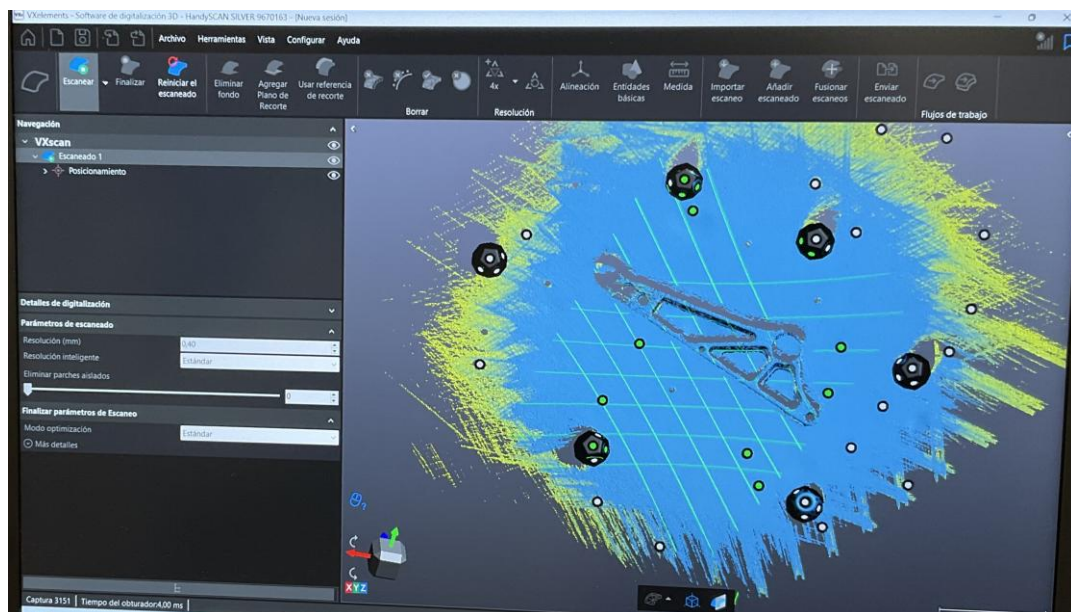


Figura 27 Sesión de escaneo, fuente propia

4.3 TRABAJO DE LA NUBE DE PUNTOS Y DEL MALLADO

Tras el escaneado 3D de la pieza, el siguiente paso es trabajar con las dos sesiones de escaneado y con las mallas resultantes para conseguir una única malla que represente fielmente la geometría de la bieleta. Para ello, es necesario trabajar la nube de puntos, eliminando todo el ruido, rugosidades, picos e imperfecciones que puedan haber podido quedar tras el escaneado. Todos estos pasos de trabajo de la malla se llevan a cabo mediante el software de VX Elements [30].

En primer lugar, se unirán las dos mallas, la malla de la parte delantera de la pieza y la correspondiente a la parte trasera. Para ello, se emplea la herramienta de fusionar mallas que ofrece este software. Esta herramienta permite combinar varios archivos de escaneo en una sola geometría. El software alinea automáticamente las superficies coincidentes, eliminando solapamientos y rellenando huecos para crear una única malla. Esta operación resulta especialmente útil cuando, como en este caso, la pieza se ha escaneado en distintas posiciones.



Figura 28 Proceso de fusionado de ambos escaneados, fuente propia

A continuación, y antes de seguir puliendo las imperfecciones que presenta la malla es importante establecer unos planos de referencia, que luego serán especialmente útiles para futuras operaciones en Solid Edge. Los planos de referencia para situar la pieza en el

espacio son el plano de la parte trasera de la pieza, el lateral superior de la bieleta, y como eje de referencia, se ha establecido el correspondiente al agujero medio de la pieza. Al exportar la malla desde VX Elements hasta Solid Edge estos ejes y planos de referencia se mantienen, lo que supone una gran ventaja.



Figura 29 Construcción de planos y ejes de referencia, fuente propia

Durante el tratamiento de la nube de puntos, se observan diversas imperfecciones en la malla, principalmente en forma de rugosidades no deseadas y deformaciones en los agujeros interiores de la pieza. Estas irregularidades, habituales en modelos obtenidos por escaneado debido a los reflejos de luz, dificultan el trabajo con la geometría e impiden su utilización directa como sólido en entornos CAD. Para solucionar este problema, se opta por seccionar la pieza en una zona limpia y reconstruir ambas caras mediante extrusión, eliminando así las regiones más deterioradas. A continuación, se definen planos y cilindros de referencia que permiten conservar únicamente los agujeros funcionalmente relevantes, descartando aquellos interiores cuya presencia no resulta esencial. Este proceso permite generar una geometría sólida y depurada, adecuada para su exportación a Solid Edge. La eliminación de los agujeros interiores no supone una limitación relevante, ya que estos forman parte de una

optimización previa, mientras que el objetivo del presente trabajo consiste en plantear una nueva optimización topológica a partir del modelo reconstruido.

Tras la corrección y eliminación de todos los defectos de la pieza, lo siguiente consiste en mallar la nube de puntos. Para ello se emplea la función de auto mallado que incluye el software de VX Elements, que precisa de unas especificaciones para generar la malla correspondiente. En este caso, se emplean los valores estándar que propone la aplicación: 2500 parches y 8 puntos de control.

4.4 TRABAJO DE DISEÑO EN EL SÓLIDO

En este apartado se va a mostrar el trabajo realizado en Solid Edge [16]. El sólido recibido del escaneo es simplemente el contorno de la pieza escaneada extruido, y una serie de planos y cilindros que ubican los agujeros funcionalmente relevantes.

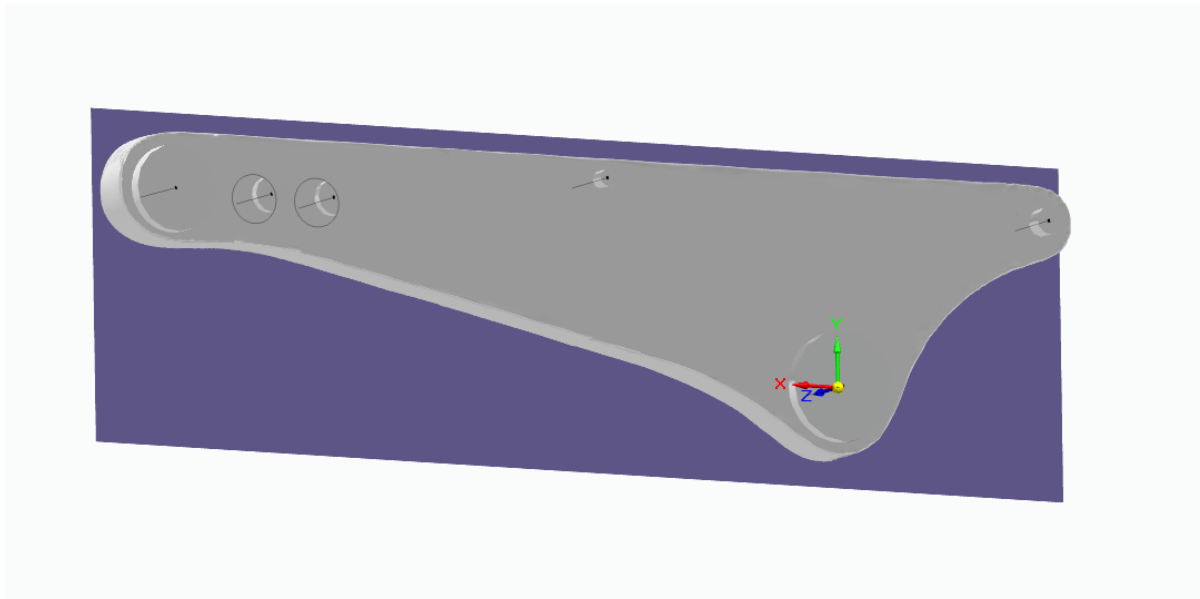


Figura 30 Sólido exportado desde VX Elements a Solid Edge, fuente propia

Para conseguir la geometría más realista posible, el siguiente paso es extruir los agujeros funcionalmente relevantes que presenta la bieleta original y los cuales se encuentran ubicados mediante una serie de planos y cilindros exportados desde VX Elements. Para ello es necesario emplear la herramienta de vaciado del software. A través de esta herramienta, es posible realizar vaciados exactos directamente sobre el sólido. Este método facilita la recuperación controlada de características funcionales esenciales de la pieza, preparando la geometría para su posterior optimización topológica.

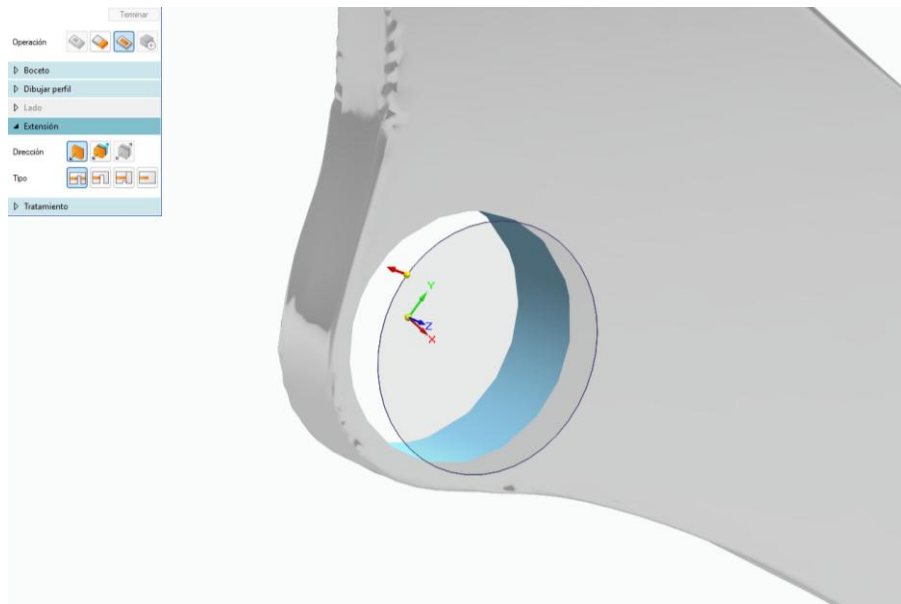


Figura 31 Proceso de vaciado de los agujeros de la pieza, fuente propia

Una vez todos los agujeros han sido vaciados y la pieza presenta todos los detalles originales, el proceso de trabajo de la pieza a finalizado y comienza la siguiente fase.

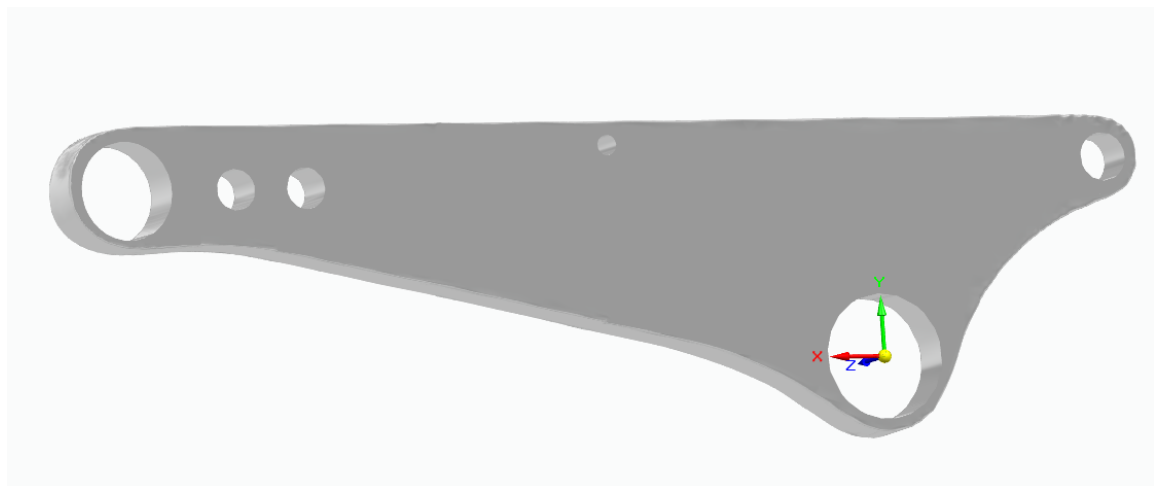


Figura 32 Bieleta escaneada terminada

4.5 ASIGNACIÓN DEL MATERIAL

Para poder realizar una simulación en Solid Edge, el primer paso consiste en definir el material del que está compuesta la pieza, ya que sus propiedades mecánicas condicionan directamente el comportamiento estructural del modelo. Solid Edge dispone de una amplia biblioteca de materiales predefinidos, que permite seleccionar el material más adecuado en función de las necesidades del análisis. En este caso, se selecciona el aluminio 6061-T6 como material para la bieleta, debido a su buena relación entre resistencia mecánica y ligereza, así como a su uso habitual en aplicaciones estructurales.

Tabla 3 Tabla de propiedades del AL 6061-T6 en Solid Edge, fuente propia

Mostrando propiedades de: Aluminio, 6061-T6 (Materials/Metales/Aleaciones de aluminio)

Estilo de cara: Aluminio  Administrar estilos...

Estilo de relleno: ANSI38(Aluminio)  Administrar estilos...

Nombre de propiedad	Valor	Eliminar...	Editar...
Densidad	2712,000 kg/m ³		
Coefficiente de expansión térmica	0,0000 /C		
Conductividad térmica	0,180 kW/m-C		
Calor específico	920,000 J/kg-C		
Módulo de elasticidad	68947,570 MPa		
Coefficiente de Poisson	0,330		
Límite elástico	275,790 MPa		
Tensión de rotura	310,264 MPa		
Elongación %	0,000		

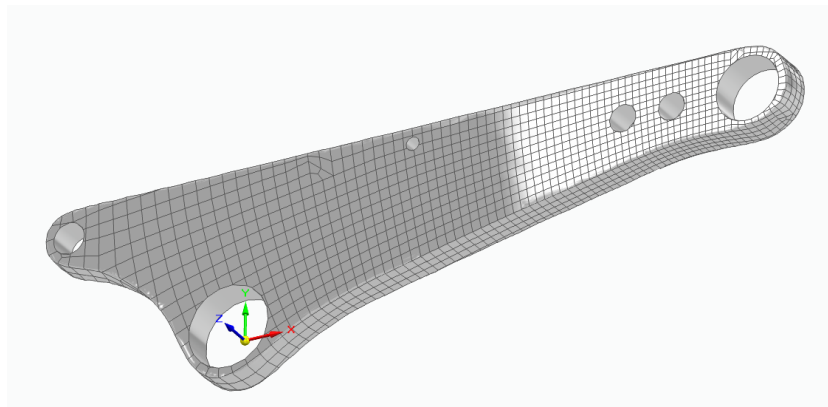


Figura 33 Bieleta en AL 6061-T6

4.6 ASIGNACIÓN DE LAS CARGAS Y RESTRICCIONES

En este apartado se introducen las cargas que actúan sobre la bieleta, las cuales están especificadas por la normativa correspondiente, como se detalló previamente en el apartado 3.4. Se considera una carga vertical de 510,98 N, que representa la fuerza de reacción transmitida por el amortiguador, así como una fuerza de 1327,94 N procedente del tirante superior de la bicicleta. Esta última se descompone en sus componentes en los ejes X e Y para reflejar adecuadamente su dirección en el modelo. Además de las cargas externas, en Solid Edge es imprescindible definir también las condiciones de contorno que limitan el movimiento de la pieza. En este caso, se establece una restricción en el agujero inferior de la bieleta, que actúa como punto de articulación, permitiendo simular de forma realista el comportamiento mecánico del conjunto.



Figura 34 Asignación de cargas y restricciones, fuente propia

4.7 SIMULACIÓN FEM

Antes de llevar a cabo una optimización topológica, es fundamental realizar una simulación mediante el método de los elementos finitos (FEM) en Solid Edge. Esta simulación permite analizar el comportamiento estructural de la pieza bajo las condiciones de carga y contorno previamente definidas, proporcionando información clave sobre la distribución de tensiones, deformaciones y zonas críticas. En el caso de la bieleta, se aplica una simulación FEM con el objetivo de evaluar cómo afectan las cargas externas a la pieza, en concreto la fuerza transmitida por el amortiguador y la fuerza proveniente del tirante superior. A través de esta simulación, se identifica de forma visual y cuantitativa las zonas que trabajan estructuralmente y aquellas que soportan menor esfuerzo, lo cual resulta esencial para guiar el posterior proceso de optimización topológica, ya que permite preservar las zonas funcionales y reducir material únicamente donde no es necesario desde el punto de vista mecánico.

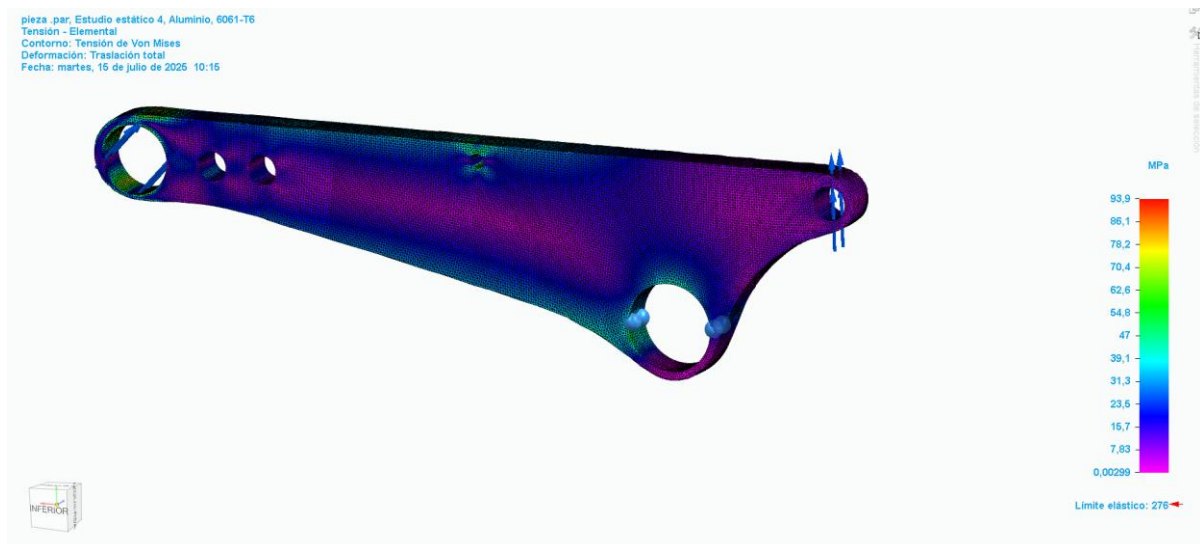


Figura 35 Estudio estático de elementos finitos (esfuerzo), fuente propia

La figura muestra el resultado de la simulación por elementos finitos aplicada a la pieza, representando el mapa de tensiones de Von Mises generado bajo las condiciones de carga

especificadas. El análisis permite identificar las zonas que soportan mayor carga y evaluar la resistencia estructural del diseño. El resultado máximo de tensión alcanzado en la pieza es de 93,9 MPa, mientras que el límite elástico del material empleado, aluminio 6061-T6, es de 275,79 MPa. El límite elástico se define como la tensión máxima que un material puede soportar sin sufrir deformaciones permanentes. Como puede observarse, la tensión máxima está muy por debajo de dicho valor, lo que proporciona un coeficiente de seguridad superior a 2. Este margen de seguridad indica que la pieza puede resistir las cargas aplicadas con holgura, sin comprometer su integridad estructural ni alcanzar un estado plástico, lo cual valida la viabilidad del diseño previo a la optimización topológica.

Además, la siguiente figura permite visualizar cómo se deforma la pieza como consecuencia de las fuerzas aplicadas, sin entrar en el régimen plástico.

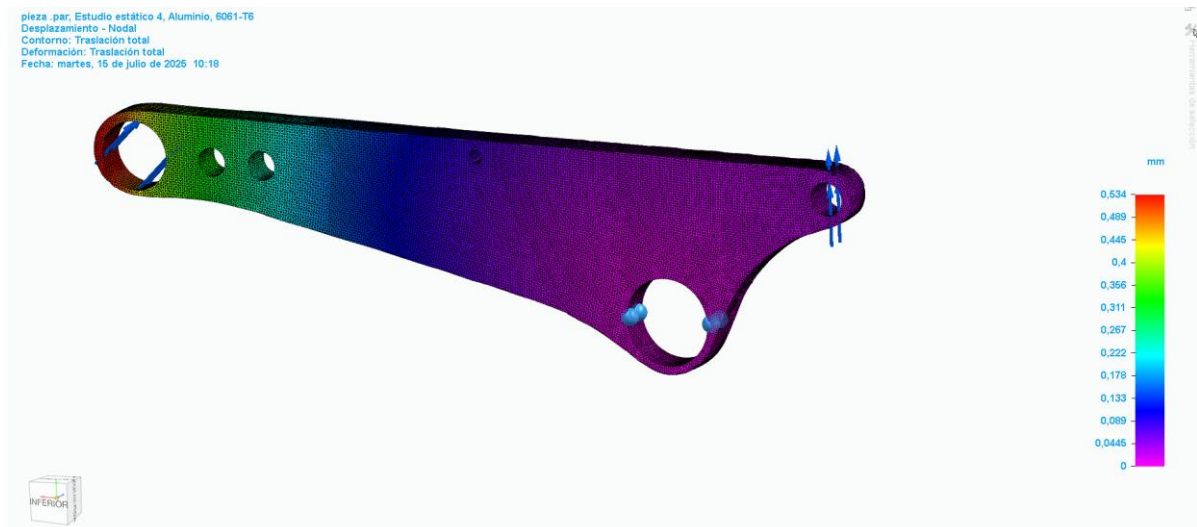


Figura 36 Estudio estático de elementos finitos (desplazamiento), fuente propia

4.8 OPTIMIZACIÓN DE LA BIELETA

Tras comprobar a través de la simulación por elementos finitos, que no se alcanza el límite elástico en ningún punto de la bieleta, el siguiente paso es proceder a la optimización topológica de la pieza. Para ello, inicialmente, es necesario establecer una serie de criterios de diseño que se desean seguir. Una vez se hayan definido dichos criterios, se puede comenzar el proceso de iteración propio de la optimización topológica.

Entre los criterios más importantes a definir antes de iniciar la optimización topológica, se encuentra la identificación de las zonas funcionales que deben mantenerse intactas durante todo el proceso. Estas regiones, marcadas en color rojo en la imagen, corresponden a los agujeros funcionales de la bieleta, los cuales han sido preservados en función de su diámetro mediante la herramienta “Preservar región”. Esta medida garantiza que las funciones mecánicas asociadas a dichos orificios no se vean comprometidas tras la optimización.

Asimismo, es imprescindible incorporar las condiciones de carga y las restricciones mecánicas de la misma forma que se hizo en el análisis por elementos finitos. Estas condiciones, que incluyen fuerzas y articulaciones, se muestran en color morado y aseguran que la simulación generativa se base en el mismo entorno físico del estudio FEM previo.

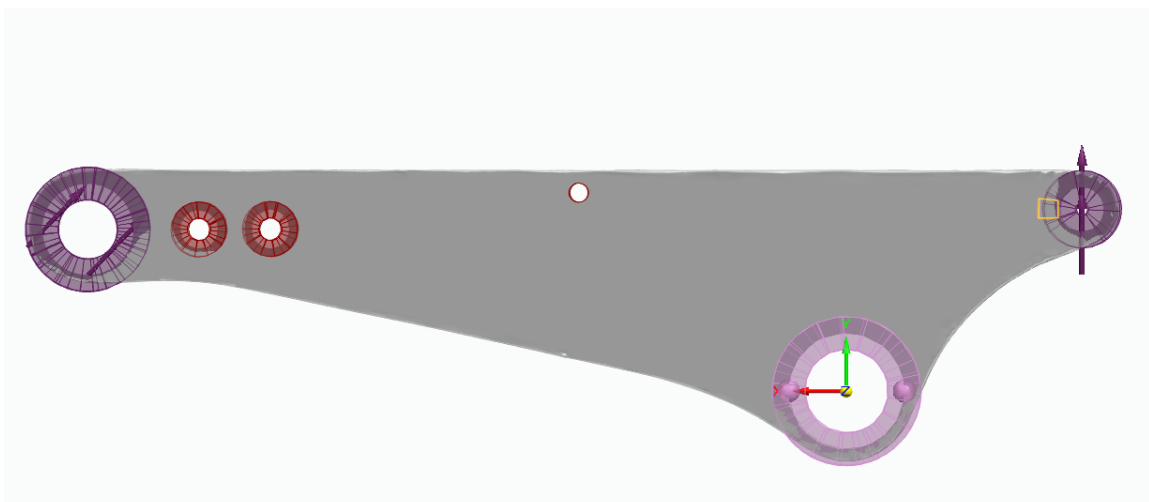


Figura 37 Cargas, condiciones de contorno y regiones a preservar, fuente propia

Una vez establecidos todos los criterios de contorno, se puede dar inicio al proceso iterativo de optimización topológica. El objetivo principal de esta fase es reducir al máximo la masa de la pieza, que parte de un valor inicial de **0,283 kg**, sin comprometer su capacidad estructural para soportar las cargas impuestas. Este proceso se basa en la modificación progresiva de dos parámetros fundamentales: el “Porcentaje de masa” deseado, que define cuánto material conservar, y la “Calidad del estudio”, que influye en la precisión y detalle del resultado final.

En este proyecto se llevan a cabo dos enfoques distintos de optimización topológica. En primer lugar, se realiza una optimización libre, en la que las únicas restricciones impuestas al software son aquellas estrictamente necesarias para mantener la funcionalidad de la pieza, como la conservación de los agujeros funcionales y las condiciones de carga. A continuación, se ejecuta una optimización restringida, en la que, además de las restricciones funcionales, se preservan las tres caras que conforman el contorno original de la bieleta. Este segundo enfoque permite comparar directamente la propuesta generada por el software con la bieleta original escaneada, evaluando así el grado de eficiencia estructural que ofrece el diseño original frente a la solución sugerida por el diseño generativo.

4.8.1 OPTIMIZACIÓN LIBRE

Primera Iteración

En la primera iteración se ha realizado una optimización con una calidad de estudio de 25 y un porcentaje de reducción de masa del 35%.

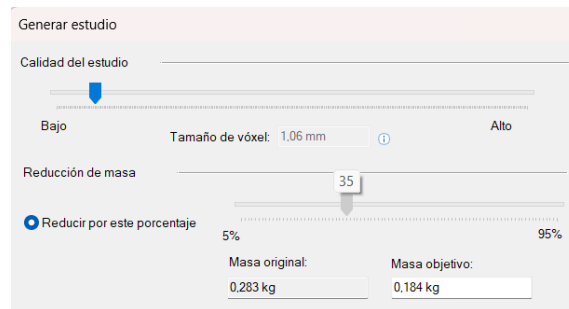


Figura 38 Calidad 25 y reducción de masa del 35%, fuente propia

En este caso se observa que un nivel de calidad tan bajo no es suficiente para mantener las restricciones impuestas al software.

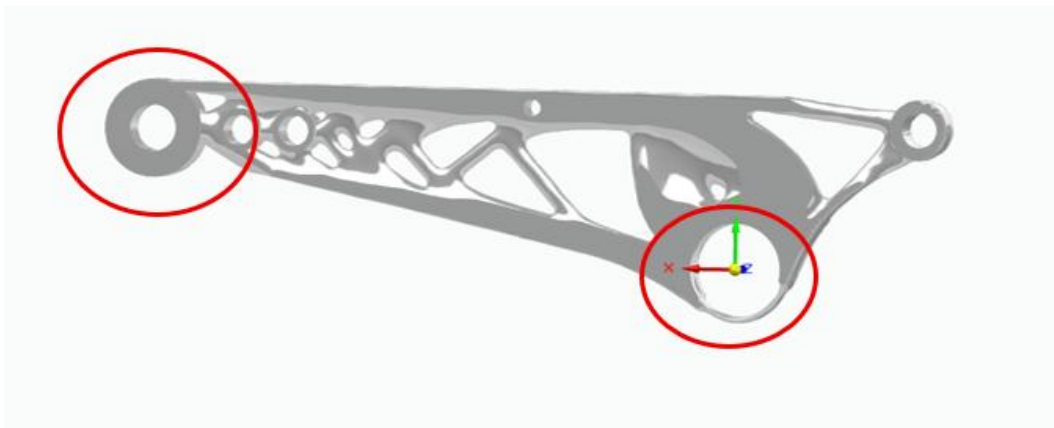


Figura 39 Primera iteración de la optimización topológica, fuente propia

El agujero que se encuentra a la izquierda ahora presenta carga en su interior, por lo que ha empequeñecido su diámetro. Y, por su parte, durante la optimización, el software no ha sido capaz de respetar las restricciones impuestas en el agujero inferior de la pieza.

A continuación, se aumenta la calidad para procurar que el programa respete las condiciones impuestas.

Segunda Iteración

En la segunda iteración se ha realizado una optimización con una calidad de estudio de 125 y un porcentaje de reducción de masa del 45%.

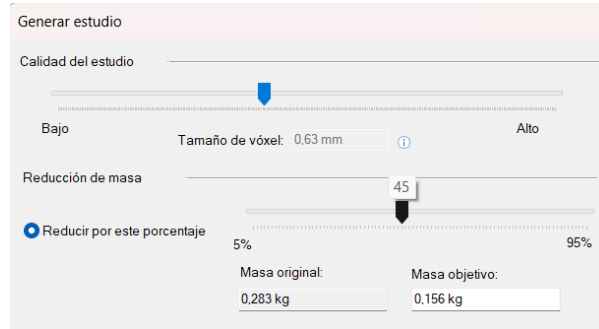


Figura 40 Calidad 125 y reducción de masa del 45%, fuente propia

En esta segunda iteración se ha incrementado significativamente tanto el nivel de calidad del estudio como el porcentaje de reducción de masa. Sin embargo, a pesar de la mejora en la calidad, el software continúa presentando dificultades para respetar completamente las restricciones previamente definidas.

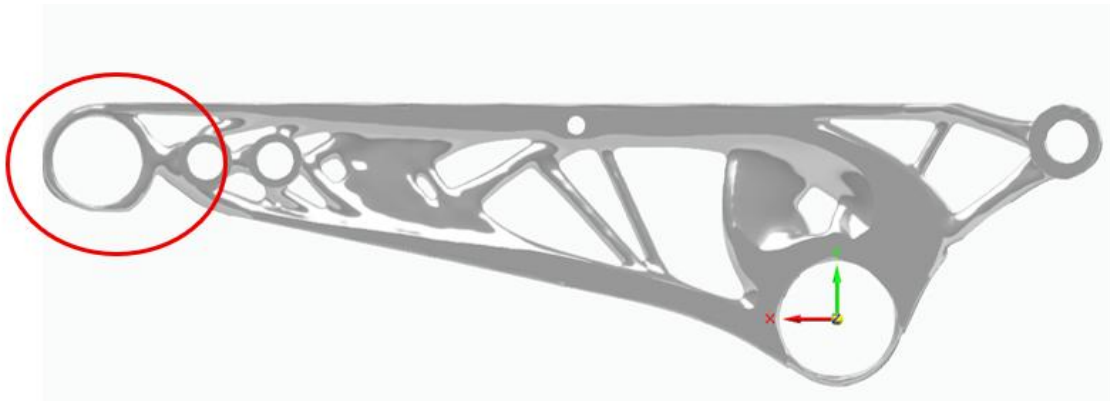


Figura 41 Segunda iteración de la optimización topológica, fuente propia

En este caso, el software no ha sido capaz de preservar la región del agujero señalado por la circunferencia roja, ha eliminado más masa de la intencionada. En la siguiente iteración se aumentará tanto el nivel de calidad como el porcentaje de reducción de masa, con el objetivo de obtener un resultado más preciso y respetuoso con las restricciones impuestas.

Tercera Iteración

En la tercera iteración se ha realizado una optimización con una calidad de estudio de 150 y un porcentaje de reducción de masa del 55%.

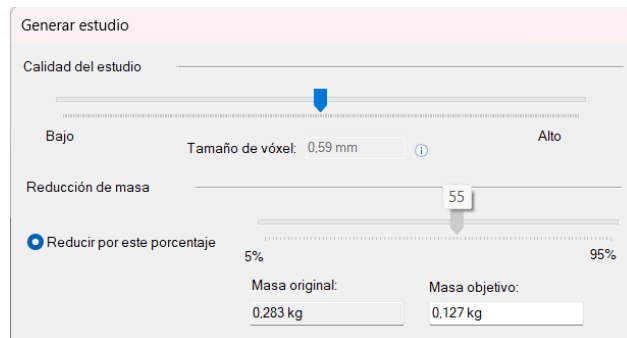


Figura 42 Calidad 150 y reducción de masa del 55%, fuente propia

En este caso, como pasó en la primera iteración, el diámetro del agujero izquierdo de la pieza ha disminuido al aumentar la masa en su interior. Además, se ha acumulado mucha masa en la parte central de la pieza, haciendo el diseño muy antiestético.

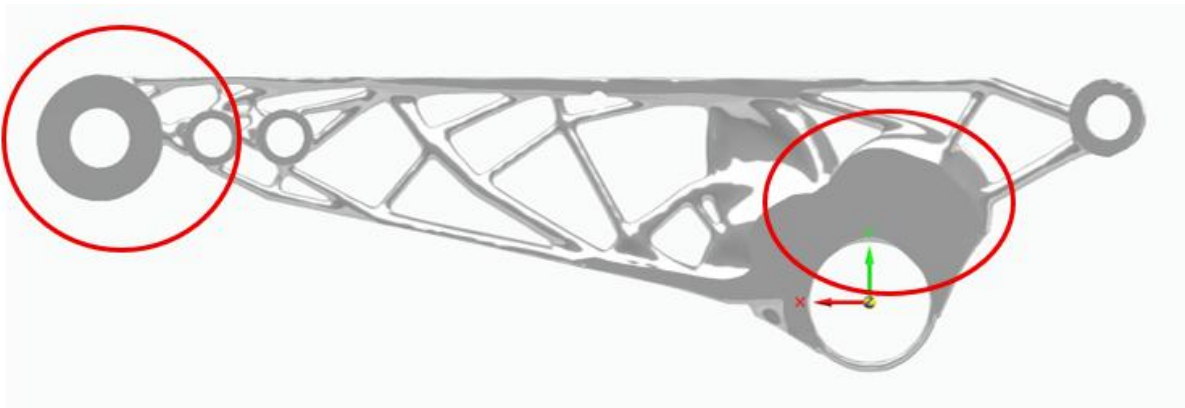


Figura 43 Tercera iteración de la optimización topológica, fuente propia

Cuarta Iteración

En la cuarta iteración se ha realizado una optimización con una calidad de estudio de 80 y un porcentaje de reducción de masa del 51%.

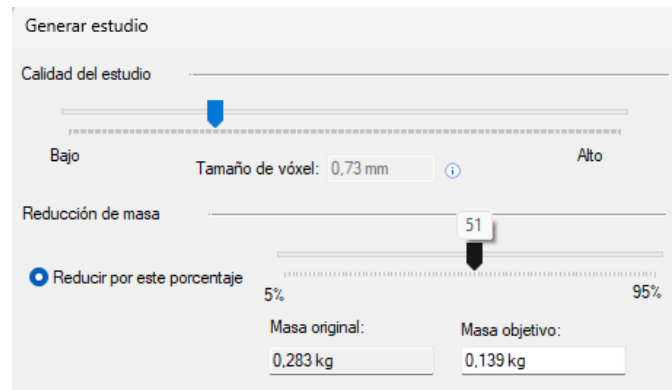


Figura 44 Calidad 80 y reducción de masa del 51%, fuente propia

En este caso, la pieza no presenta ningún fallo a primera vista, y el diseño parece funcional.

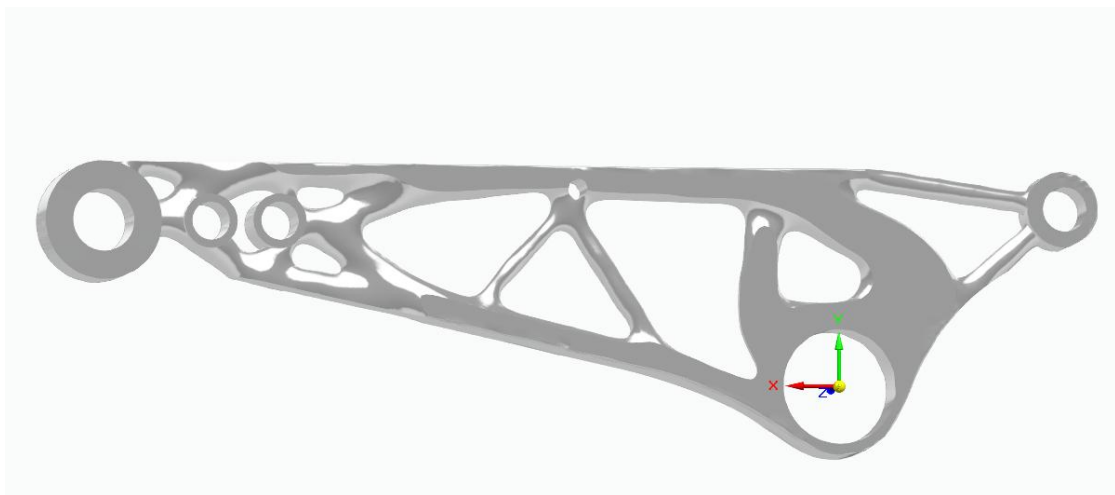


Figura 45 Cuarta iteración de la optimización topológica, fuente propia

Finalmente, se considera válida esta cuarta iteración, ya que el software ha logrado respetar todas las condiciones y restricciones impuestas sin presentar errores ni fallos en la geometría. Además, la propuesta de diseño generativo obtenida en esta iteración destaca por su sencillez y limpieza formal, lo que no solo garantiza su funcionalidad, sino que también aporta un valor estético al diseño final de la bieleta. Por tanto, esta versión se adopta como la solución óptima dentro del proceso de optimización topológica.

Gracias a la optimización topológica se ha logrado reducir la masa de la bieleta de 0,283 kg a 0,139 kg, manteniendo la funcionalidad de la pieza y sus características mecánicas.

4.8.2 OPTIMIZACIÓN RESTRINGIDA

A continuación, se aborda la optimización restringida, en la que se establecen condiciones adicionales con el objetivo de conservar las tres caras que forman el contorno original de la bieleta. Para ello, se añaden nuevas restricciones a las ya definidas previamente, manteniendo tanto los agujeros funcionales como las superficies externas mencionadas. Esta operación se lleva a cabo mediante la herramienta “Preservar región”, que ya se ha utilizado anteriormente para proteger las zonas críticas de la pieza. De este modo, se garantiza que el diseño propuesto por el software conserve la geometría externa original, facilitando una comparación directa con la bieleta escaneada.

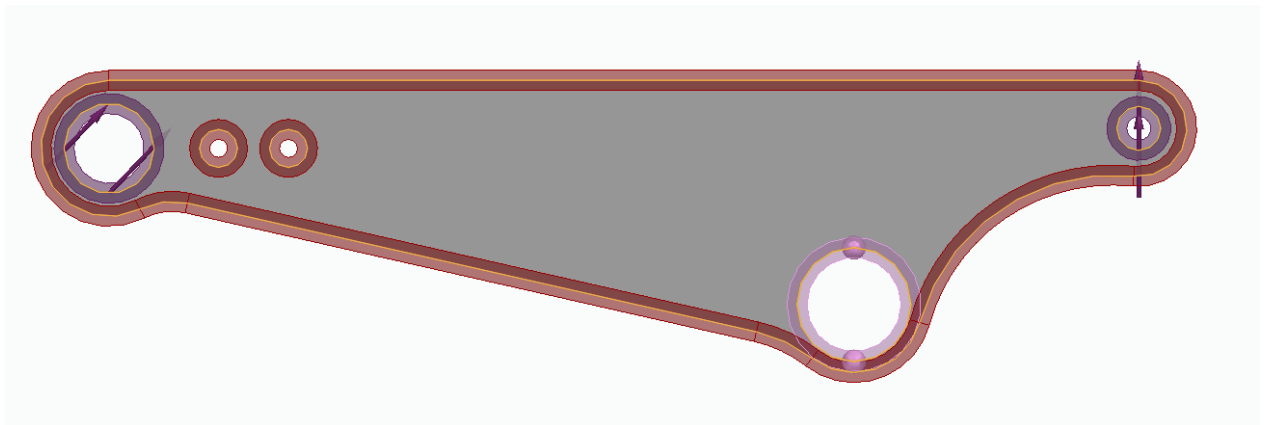


Figura 46 Regiones a preservar de la optimización restringida, fuente propia

Para esta optimización se van a emplear los mismos parámetros que han funcionado en el anterior caso, es decir, una calidad de estudio de 80 y un porcentaje de reducción de masa del 51%. Con estas condiciones el diseño propuesto por el software es el siguiente.



Figura 47 Optimización topológica restringida, fuente propia

El resultado de esta optimización es un diseño adecuado que cumple con todos los requisitos y que mantiene la funcionalidad de la pieza. Por lo tanto, esta es la optimización restringida final, que ofrece una reducción de masa del 51% respecto a la pieza original, es decir, la masa de la pieza pasa de 0,283 kg a 0,139 kg, como en el caso de la optimización libre, pero respetando las tres caras del contorno de la bieleta.

4.9 REFINADO DE LA GEOMETRÍA

El siguiente paso del proyecto consiste en refinar la geometría de los diseños optimizados obtenidos, tanto de la optimización libre como de la restringida. Este proceso resulta fundamental para garantizar que las piezas puedan ser impresas en 3D de forma adecuada, ya que el diseño propuesto por el software de optimización suele presentar geometrías irregulares, rugosidades y superficies poco definidas. Para llevar a cabo este refinado, los archivos generados en Solid Edge se exportan en formato “. STL”, utilizando una tolerancia de conversión de 0.01 mm y un ángulo de superficie plana de 3°, lo cual asegura una buena fidelidad geométrica. El proceso de pulido y suavizado de la malla se realiza en el programa Altair Inspire [31], mediante la herramienta “Ajustar PolyNURBS”, que permite generar superficies limpias y continuas a partir de la geometría optimizada, dejando la pieza libre de imperfecciones y lista para su fabricación aditiva.



Figura 48 Panel de configuración de PolyNURBS, fuente propia

Para este caso se emplea un suavizado automático, que se realiza con la herramienta “ajustar” en la que se especifica la precisión del suavizado que se desea conseguir, se empleará la estándar. Y el resultado de este refinamiento de la geometría es el que se observa en la siguiente imagen.



Figura 49 Bieleta refinada (optimización libre), fuente propia

Capítulo 5. FABRICACIÓN DE UN PROTOTIPO

5.1 TECNOLOGÍAS DE IMPRESIÓN 3D

En este proyecto, la fabricación aditiva ha jugado un papel fundamental para materializar los diseños optimizados. Antes de entrar en detalle sobre las impresoras empleadas, es importante conocer las distintas tecnologías de impresión 3D disponibles en el laboratorio, ya que cada una presenta ventajas específicas. Existen principalmente tres tipos de tecnologías que se utilizan habitualmente: la fotopolimerización en tanque o cuba, la extrusión de material y la fusión por lecho de polvo.

La tecnología de fotopolimerización en tanque, como la estereolitografía (SLA), utiliza una resina líquida que se solidifica capa a capa mediante la acción de una fuente de luz ultravioleta, generalmente un láser. Esta tecnología destaca por su alta precisión y por ofrecer acabados superficiales muy finos.

Por su parte, la extrusión de material, conocida como FDM (Fused Deposition Modeling), es la tecnología más accesible y extendida. Consiste en la fusión de un filamento termoplástico que se deposita capa a capa para dar forma a la pieza. Aunque su precisión es inferior a la de otras tecnologías, resulta muy útil para la fabricación de prototipos, por su bajo coste y rapidez.

Finalmente, la fusión por lecho de polvo es una tecnología más avanzada que permite fabricar piezas a partir de materiales en polvo, mediante la acción de un láser que funde selectivamente las partículas. Este método permite obtener piezas muy resistentes y complejas sin necesidad de estructuras de soporte, aunque requiere equipos de mayor coste.

Para este proyecto se han empleado dos impresoras de tecnologías distintas. La primera de ellas ha sido la Prusa i3 MK3S[32], una impresora de extrusión de material que utiliza

filamento PLA, un termoplástico biodegradable fácil de imprimir y con buenas propiedades mecánicas para hacer prototipos. Esta impresora ha sido utilizada para fabricar versiones físicas de la pieza original y de las dos optimizaciones propuestas, permitiendo comprobar visualmente las dimensiones, la geometría y la viabilidad estructural. Su elección se basa en su fiabilidad, su facilidad de uso y su bajo coste operativo.



Figura 50 Impresora Prusa i3 MK3S[32]

Además, se ha recurrido a una segunda impresora, la Form 3L de la empresa Formlabs. Esta impresora funciona mediante tecnología SLA, lo que le permite ofrecer una precisión muy superior y una calidad superficial excelente. Gracias a la fidelidad geométrica que proporciona, se ha podido obtener una réplica física que refleja con gran exactitud las formas generadas por el diseño topológico. La Form 3L ha sido por tanto la impresora elegida para la validación final del diseño topológico libre en una versión más depurada, siendo especialmente útil para analizar el resultado estético y funcional del modelo.



Figura 51 Impresora de resina Form 3L [33]

En conjunto, la combinación de ambas impresoras ha permitido abordar el proceso de fabricación aditiva de forma progresiva y eficiente, comenzando por prototipos funcionales de bajo coste con la impresora FDM y culminando con una versión final de alta calidad superficial mediante la impresión con resina SLA. Esta estrategia ha facilitado el análisis y validación de los modelos generados a lo largo del proyecto, asegurando que el diseño final no solo cumple con los criterios mecánicos, sino que también es viable desde el punto de vista de la fabricación.

5.2 IMPRESIÓN DEL PROTOTIPO EN 3D

Para comenzar con el proceso de impresión, primero hay que pasar el modelo de la pieza al programa, para ello solo hay que guardar los archivos correspondientes como “. STL” con una serie de parámetros de conversión que aseguren la precisión del modelo exportado.

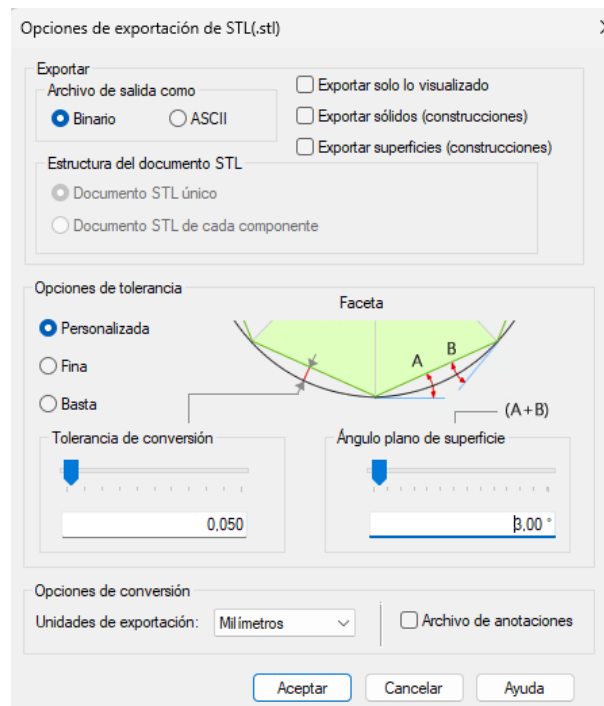


Figura 52 Opciones de exportación de STL, fuente propia

El siguiente paso es pasar los archivos al programa de la impresora para colocar de forma correcta la pieza en el cuadro de la impresora y terminar de ajustar los parámetros de impresión.

En este caso se va a comenzar con la impresión por extrusión de material (FDM), mediante esta tecnología se van a imprimir tres piezas: la pieza original, el modelo resultante de la optimización libre y el resultante de la optimización restringida.

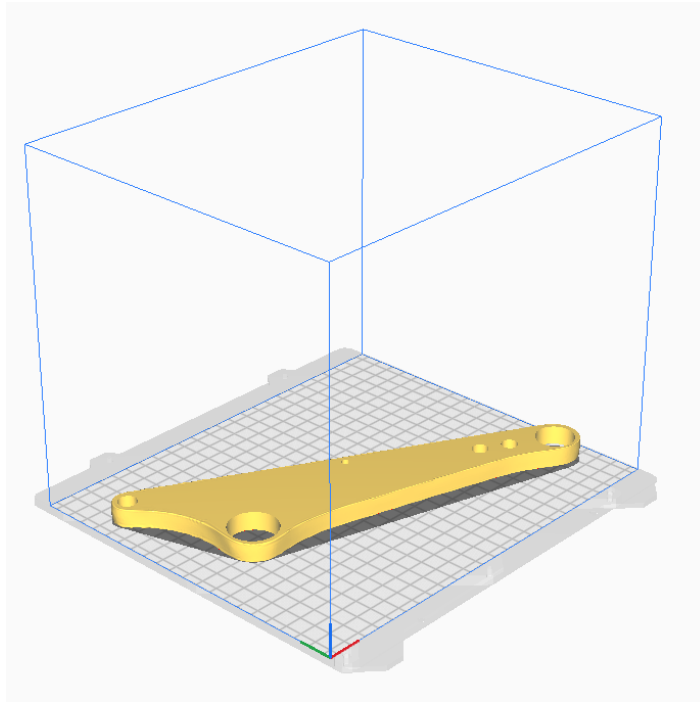


Figura 53 Bieleta original preparada en el UltiMaker Cura, fuente propia

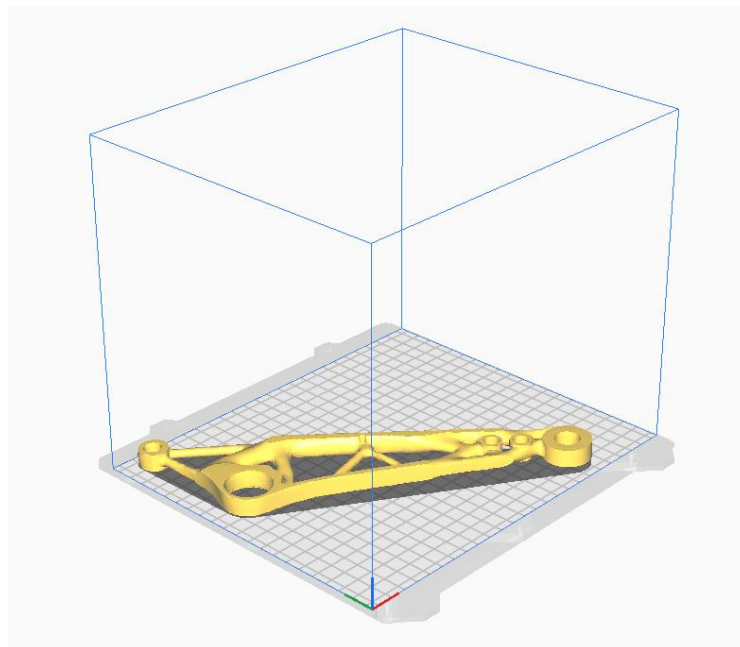


Figura 54 Bieleta con optimización libre preparada en UltiMaker Cura, fuente propia

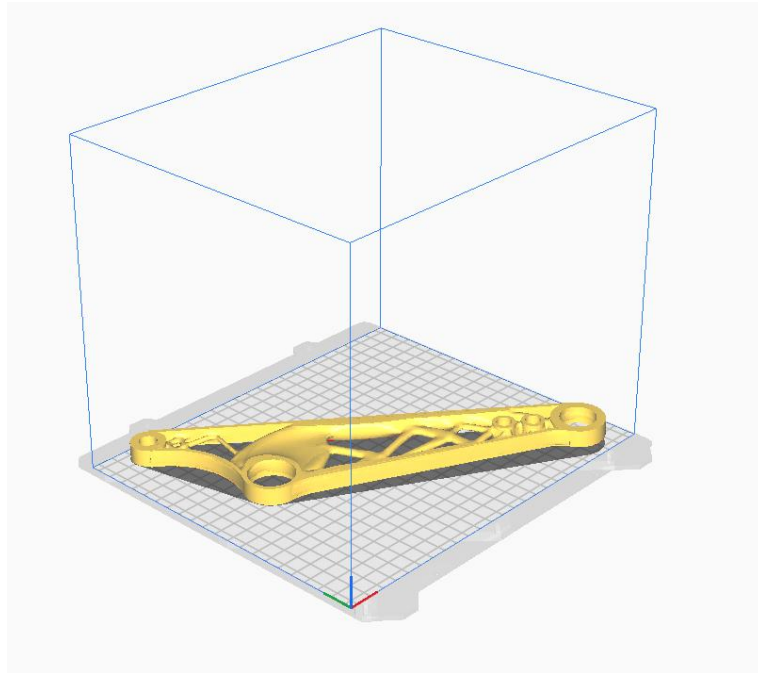


Figura 55 Bieleta con optimización restringida preparada en UltiMaker Cura, fuente propia

Después se deben importar todas las piezas en formato “. STL” al programa UltiMaker Cura [34]. Este programa actúa como un laminador o "slicer", cuya función principal es convertir el modelo tridimensional en un conjunto de instrucciones específicas que la impresora 3D pueda interpretar. Para ello, Cura divide la pieza en capas horizontales y calcula el recorrido exacto que debe seguir el extrusor para depositar el material capa por capa.

Antes de generar este archivo, es necesario especificar una serie de parámetros que afectan directamente tanto a la calidad de la impresión como al tiempo de fabricación y al consumo de material. Entre estas propiedades se encuentra la altura de capa que en este caso es de 0.2mm, el relleno de la pieza que en este caso es de tipo rejilla con una densidad del 20% o la temperatura de impresión que se ha fijado en los 210°C. La velocidad de impresión es de 60 mm/s y el grosor de las paredes de 1.2mm.

Todos estos parámetros y especificaciones se mantienen constantes para los tres prototipos impresos. No obstante, la principal diferencia entre ellos radica en la necesidad de estructuras

de soporte. La pieza original no requiere ningún tipo de soporte adicional, ya que su geometría presenta una base completamente plana que permite una fabricación directa desde la superficie de impresión. En cambio, los dos diseños optimizados, tanto el libre como el restringido, sí necesitan soportes adicionales, debido a que presentan zonas en voladizo cuya morfología no se encuentra apoyada directamente sobre la base. Estas estructuras de soporte son necesarias para garantizar una correcta deposición del material en las capas superiores.

El material empleado para la impresión de los prototipos es el filamento Generic PLA, un polímero termoplástico de origen vegetal ampliamente utilizado en impresión 3D por su facilidad de uso, buena calidad superficial y bajo coste. El PLA se caracteriza por tener una buena rigidez, una deformación mínima durante la impresión y una excelente adhesión entre capas.

El prototipo de la pieza original, de geometría más sencilla y sin necesidad de soportes, presenta un peso final de 40 gramos y un tiempo de impresión de 3 horas y 5 minutos. El prototipo correspondiente a la optimización libre, aunque más ligero con 37 gramos de peso, requiere 3 horas y 23 minutos debido a su geometría más compleja y al uso de estructuras de soporte. Por último, el prototipo de la optimización restringida alcanza los 47 gramos de peso y un tiempo total de impresión de 4 horas y 20 minutos. Esta comparación permite evaluar no solo el impacto de la optimización sobre el peso, sino también sus implicaciones en el proceso de fabricación aditiva.

Además de la impresión mediante extrusión de material, también se ha empleado una impresora SLA de resina para fabricar un prototipo del modelo de optimización libre, con el objetivo de obtener una versión de mayor resolución y mejor acabado superficial. En este caso, el software utilizado para preparar el modelo antes de la impresión ha sido PreForm 3D [35], desarrollado específicamente por Formlabs para sus impresoras de tecnología estereolitográfica. A diferencia de UltiMaker Cura, que está diseñado para impresoras FDM y trabaja con filamentos, PreForm está adaptado a los requisitos particulares de la impresión con resina líquida, permitiendo generar de forma automática los soportes necesarios. El

material que se emplea en este caso es el Clear V4 que es una resina fotopolimérica desarrollada por Formlabs que ofrece alta precisión, buena rigidez y una excelente calidad superficial.

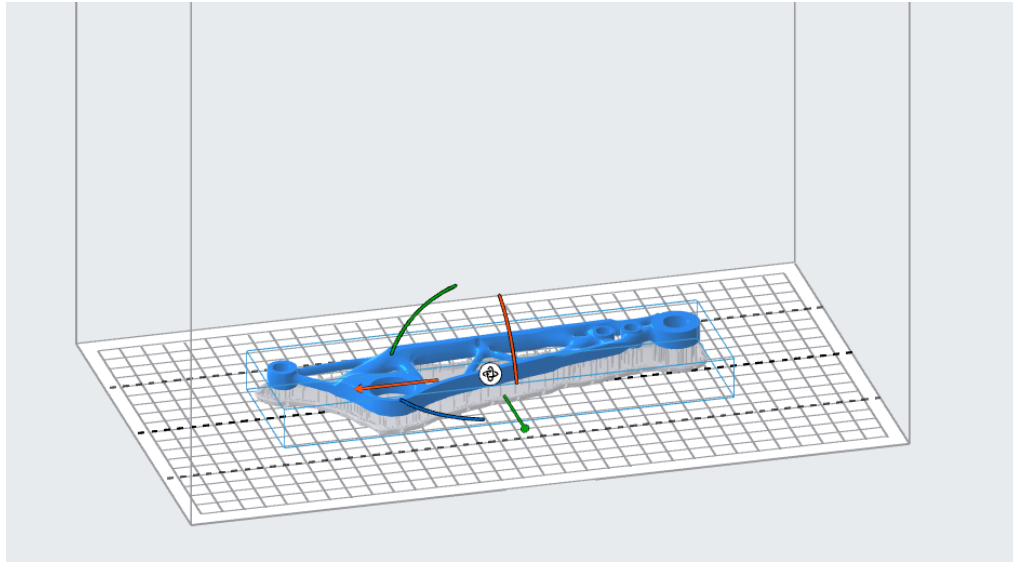


Figura 56 Bieleta con optimización libre preparada en Preform, fuente propia

La impresión del prototipo en resina presenta una duración total de 4 horas y 29 minutos, con un volumen de material utilizado de 89,14 mL. En este caso, no es necesario especificar parámetros adicionales, ya que la pieza se imprime con un interior macizo y el propio software genera automáticamente las estructuras de soporte necesarias para la impresión.

Una vez completada la fabricación de los prototipos mediante las distintas tecnologías de impresión 3D, la siguiente fase del proceso consiste en retirar las piezas de las impresoras y realizar el acabado final. Para los prototipos fabricados mediante extrusión de filamento, este acabado implica la eliminación manual de los soportes utilizando pinzas y lijas finas, con el objetivo de obtener una superficie limpia y libre de imperfecciones. En cambio, el prototipo impreso en resina fotopolimérica requiere un proceso algo más específico: tras retirar cuidadosamente los soportes, la pieza debe limpiarse con alcohol isopropílico para eliminar los restos de resina no curada adherida a la superficie. A continuación, se somete a un curado

UV controlado, esencial para completar la polimerización del material y mejorar sus propiedades mecánicas y térmicas. En este proyecto, dicho proceso se ha llevado a cabo mediante el uso del Form Cure, el equipo oficial de postcurado desarrollado por Formlabs, el cual combina luz ultravioleta y temperatura para garantizar una correcta activación del material fotopolimérico y una mayor estabilidad dimensional del prototipo final.



Figura 57 Bieleta de optimización libre tras sacarla de la impresora de resina, fuente propia

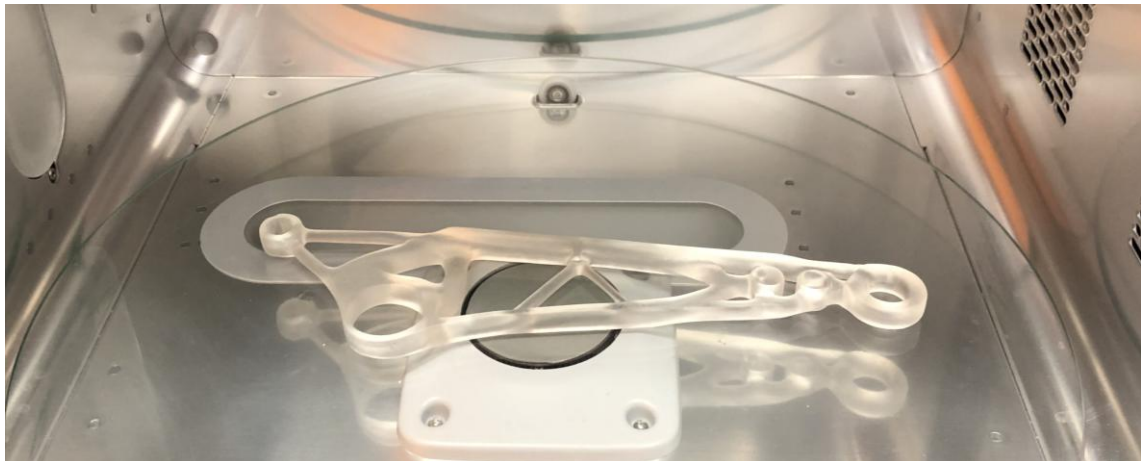


Figura 58 Bieleta de optimización libre preparada en el Form Cure para el curado, fuente propia

El resultado final de los cuatro prototipos, los tres impresos mediante extrusión de filamentos y el modelo impreso en resina, es el siguiente.



Figura 59 Prototipo de la bieleta original impreso (FDM), fuente propia



Figura 60 Prototipo de la bieleta con optimización libre impreso (FDM), fuente propia

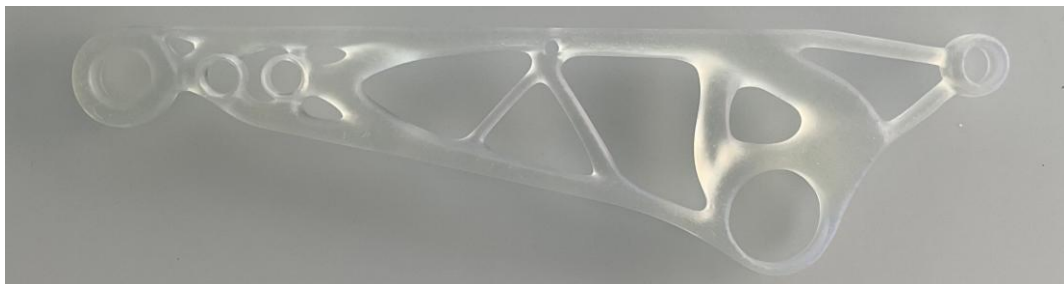


Figura 61 Prototipo de la bieleta con optimización libre impreso (SLA), fuente propia



Figura 62 Prototipo de la bieleta con optimización restringida impreso (FDM), fuente propia

Capítulo 6. ANÁLISIS DE COSTES

En proyectos optimización topológica, el análisis de costes adquiere una gran relevancia a la naturaleza compleja de las geometrías resultantes. La optimización topológica, al buscar eliminar material innecesario y generar formas que maximicen la relación resistencia-peso, suele dar lugar a configuraciones imposibles de fabricar mediante métodos convencionales de mecanizado o moldeo. Por este motivo, en la mayoría de los casos, la fabricación de las piezas debe llevarse a cabo mediante tecnologías de impresión 3D, que permiten materializar con precisión geometrías complejas.

En este contexto, la fabricación aditiva presenta una ventaja económica clara cuando el número de unidades a producir es reducido, como ocurre en la fase de prototipado o en lotes muy limitados. Sin embargo, a medida que el volumen de producción aumenta, la fabricación tradicional tiende a ofrecer costes unitarios más bajos gracias a la amortización de utillajes y procesos. Este comportamiento obliga a evaluar con cuidado el escenario productivo previsto, ya que una pieza óptima en términos estructurales puede no ser la más competitiva si se planea producir en grandes cantidades mediante impresión 3D.

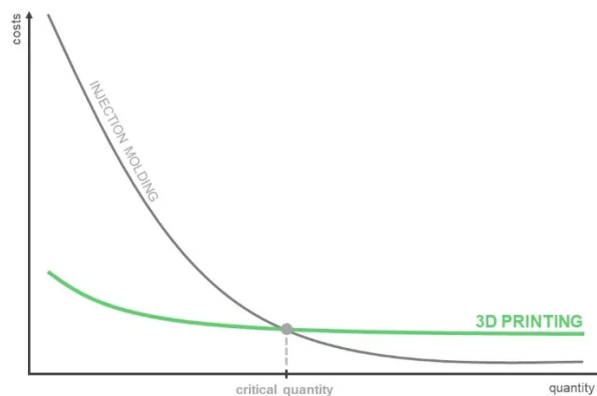


Figura 63 Punto de cruce de costes entre impresión 3D y fabricación tradicional [36]

Cuando un proyecto culmina en la fabricación aditiva, todos los pasos previos, desde la concepción inicial del diseño hasta la validación mecánica y el análisis de cargas, deben estar orientados a esta finalidad. Esto implica adaptar el modelado CAD, seleccionar parámetros de impresión adecuados, y prever desde el inicio las implicaciones en costes, tiempos de fabricación y postprocesado. De este modo, el análisis de costes no solo actúa como una herramienta de control económico, sino como un elemento central de la estrategia de diseño, garantizando que las decisiones técnicas tomadas durante el desarrollo estén alineadas con la realidad productiva y presupuestaria del proyecto.

Para el análisis de costes de este proyecto se emplearán dos enfoques complementarios. En primer lugar, se realizará una estimación interna utilizando la hoja de cálculo facilitada por la universidad, en la que se recogen los gastos asociados a materiales, tiempos de impresión y demás recursos necesarios para la fabricación mediante impresión 3D. Este método permite obtener una valoración aproximada basada en parámetros técnicos y económicos controlados en el laboratorio. En segundo lugar, se solicitarán presupuestos a empresas especializadas para la fabricación de la pieza en el material original previsto para su uso final. De este modo, se podrá comparar la estimación académica con un coste real de mercado, lo que aportará una visión más completa y realista del coste de producción.

6.1 ANÁLISIS DE COSTES INTERNOS

La metodología para el análisis de costes internos se centrará en una comparación directa entre la bielea original y la bielea optimizada libre, dado que esta última es el resultado de un proceso de optimización topológica a partir del escaneado de la pieza original, mientras que la optimización restringida parte de un diseño propio en Solid Edge y, por tanto, no sigue el mismo flujo de trabajo. Este análisis permitirá valorar de forma más precisa el impacto económico real de la optimización topológica frente a la geometría inicial. Para ello, se estudiarán los costes asociados a las dos tecnologías de impresión empleadas en el proyecto, FDM y SLA, considerando factores como el consumo de material, el tiempo de fabricación y el uso de soportes. De esta forma, se obtendrá una visión clara de las diferencias económicas entre ambas configuraciones y métodos de producción.

6.1.1 ANÁLISIS DE COSTES INTERNOS PARA LA IMPRESIÓN FDM

Para el análisis de costes asociados a la impresora por extrusión de material (FDM), se han definido una serie de parámetros estándar que servirán como base para realizar una estimación económica lo más realista posible. En primer lugar, se ha establecido un periodo de amortización de la impresora de tres años, justificado por el rápido avance de la tecnología de impresión 3D, que provoca que los equipos queden obsoletos o superados por modelos más eficientes en un plazo relativamente corto.

En cuanto al uso de la impresora, se ha considerado un régimen de funcionamiento de 8 horas diarias durante los días laborables, lo que equivale a un total de 250 jornadas de trabajo al año. Respecto al coste energético, se ha tomado como referencia un precio de 0,05 €/kWh [37], acorde con valores estándar, y se ha tenido en cuenta que la impresora presenta un consumo medio de 0,08 kW al imprimir en PLA.

En lo que respecta al material, se ha fijado un precio de 20 €/kg para el filamento PLA, considerando el peso de cada pieza en el cálculo final. Finalmente, se ha incluido un coste

de personal estimado en 25 €, que representa el tiempo de supervisión, preparación y retirada de la pieza, así como posibles ajustes durante el proceso de impresión.

Tabla 4 Datos del servicio para la impresora Prusa-I3KS, fuente propia

Datos del servicio			
		Pieza original	Pieza optimizada
Unidades		Prusa -I3KS	Prusa -I3KS
Coste de la impresora	[€]	1100	1100
Periodo de amortización	[años]	3	3
Horas de uso por día laborable de la impresora	[h]	8	8
Coste Luz	[€/kwh]	0,05	0,05
Potencia media de la impresora	[kw]	0,08	0,08
Coste del material	[€/kg]	20	20
Coste por hora del personal	[€/h]	25	25

Tabla 5 Cálculo de costes del servicio para la impresora Prusa-I3KS, fuente propia

Cálculo de los costes del servicio			
		Pieza original	Pieza optimizada
Unidades		Prusa -I3KS	Prusa -I3KS
Costes del pedido			
Coste por hora preparación/postprocesado	[€/h]	25	25
Costes por hora de impresión			
Coste de amortización de la impresora	[€/h]	0,183	0,183
Coste de la electricidad	[€/h]	0,004	0,004
Coste por hora total	[€/h]	0,187	0,187
Coste de consumibles			
Coste del material	[€/kg]	20	20

Para el cálculo de los costes se ha estimado un tiempo de preparación y de postprocesado de dos horas, que incluye la preparación y configuración de la impresora y el archivo a imprimir, así como, el tiempo de retirada, limpieza y acabado de la pieza impresa.

En este caso, el tiempo total se ha calculado considerando la fabricación de dos piezas, ya que la bicicleta requiere un par de bieletas que se ensamblan entre sí y se fijan al cuadro. Esto asegura que el tiempo refleje el proceso completo necesario para obtener el conjunto funcional.

Tabla 6 Datos del pedido y de la pieza para la impresora Prusa-I3KS, fuente propia

Datos del pedido			
		Pieza original	Pieza optimizada
Unidades		Prusa -I3KS	Prusa -I3KS
Tiempo de preparación/postprocesado [h]		2	2

Datos de la pieza			
		Pieza original	Pieza optimizada
Unidades		Prusa -I3KS	Prusa -I3KS
Tiempo de impresión [h]		3,0833	3,3833
Masa total [kg]		0,04	0,037
Cantidad [u]		2	2

Finalmente, con todos los datos anteriores, se puede realizar el cálculo del coste final de la fabricación de la bieleta escaneada y su modelo optimizado, ambos impresos mediante la tecnología de extrusión de material.

Tabla 7 Coste total del pedido para la impresora Prusa-I3KS, fuente propia

Coste de pedido			
		Pieza original	Pieza optimizada
Unidades		Prusa -I3KS	Prusa -I3KS
Costes de pedido			
Preparación/postprocesado del pedido [€]		50	50
Coste de la pieza			
Material [€/u]		0,80	0,74
Horas de impresión [€/u]		0,58	0,63
Coste por pieza [€/u]		1,38	1,37
Coste de todas las piezas [€]		2,76	2,75
Costes totales del pedido			
Coste total del pedido [€]		52,76	52,75

Como se observa en la tabla, la optimización topológica de la pieza apenas modifica el coste total: 52,76 € para la pieza original frente a 52,75 € para la optimizada, una diferencia de solo 0,01 €, que resulta insignificante en términos de rentabilidad económica directa. El coste por unidad pasa de 1,38 € a 1,37 €, debido a una ligera reducción en el consumo de material (de 0,80 € a 0,74 € por unidad) y un leve aumento en el coste por horas de impresión (de 0,58 € a 0,63 € por unidad), lo que refleja que la optimización reduce masa, pero no tiempo de impresión de forma proporcional. Este incremento en el tiempo de impresión puede deberse a que la geometría optimizada, más compleja y con detalles finos, implica trayectorias de impresión más largas y lentas, así como a la presencia de zonas en voladizo que requieren soportes adicionales, lo que incrementa el número de capas y, por tanto, el tiempo total de fabricación.

La mayor parte del coste total proviene del tiempo de preparación y postprocesado, que es fijo e independiente de si se fabrica la pieza original u optimizada, y que se ha calculado para dos unidades, necesarias para ensamblar el conjunto de bieletas en la bicicleta.

Si bien desde un punto de vista puramente económico la optimización topológica no aporta un ahorro significativo, desde el punto de vista mecánico sí ofrece ventajas, por lo que sería importante realizar una comparativa entre los beneficios económicos y mecánicos que ofrece la optimización.

6.1.2 ANÁLISIS DE COSTES INTERNOS PARA LA IMPRESIÓN SLA

En el caso de la impresora de resina FormLabs 3L, no se ha llegado a fabricar físicamente un modelo de la bielea original. No obstante, es posible estimar con precisión el coste de su impresión gracias a la plataforma PreForm de FormLabs, que permite simular el proceso y calcular el consumo de material y el tiempo de trabajo. Esta misma herramienta se ha utilizado previamente para la pieza con optimización topológica, que sí ha sido impresa.

El análisis de costes que se presenta a continuación sigue la misma estructura y enfoque que el realizado para la impresora de extrusión de material (FDM), pero adaptado a las

particularidades de la tecnología de impresión en resina. Con el objetivo de facilitar una comparación directa entre ambas tecnologías, se han mantenido los mismos parámetros estándar para estimar gastos de electricidad, personal y demás costes operativos. La principal diferencia radica en el material empleado: en este caso, se utiliza Clear V4, con un precio estimado de 163,54 € por unidad de suministro, lo que influye directamente en el coste final por pieza.

Tabla 8 Datos del servicio para la impresora FormLabs 3L, fuente propia

Datos del servicio			
		Pieza original	Pieza optimizada
	Unidades	FormLabs 3L	FormLabs 3L
Coste de la impresora	[€]	66500	66500
Periodo de amortización	[años]	4	4
Horas de uso por día laborable de la impresora	[h]	8	8
Coste Luz	[€/kwh]	0,05	0,05
Potencia media de la impresora	[kw]	0,15	0,15
Coste del material	[€/l]	163,54	163,54
Coste por hora del personal	[€/h]	20	20

Tabla 9 Cálculo de costes del servicio para la impresora FormLabs 3L, fuente propia

Cálculo de los costes del servicio			
		Pieza original	Pieza optimizada
Unidades		FormLabs 3L	FormLabs 3L
Costes del pedido			
Coste por hora preparación/postprocesado	[€/h]	25	25
Costes por hora de impresión			
Coste de amortización de la impresora	[€/h]	8,313	8,313
Coste de la electricidad	[€/h]	0,008	0,008
Coste por hora total	[€/h]	8,320	8,320
Coste de consumibles			
Coste del material	[€/kg]	163,54	163,54

En este caso, se cuenta igualmente con una producción de dos modelos de la pieza, los cuales se unen entre ellos y al chasis para formar la bieleta.

Tabla 10 Datos del pedido y de la pieza para la impresora FormLabs 3L, fuente propia

Datos del pedido			
		Pieza original	Pieza optimizada
Unidades		FormLabs 3L	FormLabs 3L
Tiempo de preparación/postprocesado	[h]	2	2

Datos de la pieza			
		Pieza original	Pieza optimizada
Unidades		FormLabs 3L	FormLabs 3L
Tiempo de impresión	[h]	5,67	4,4833
Volumen total usado	[ml]	139,96	89,14
Cantidad	[u]	2	2

Con todos los parámetros anteriores se puede proceder al cálculo del coste total del pedido para poder observar las diferencias entre los costes de la bieleta original y el modelo optimizado, así como, realizar la comparación con los costes de impresión por extrusión de material.

Tabla 11 Coste total del pedido para la impresora FormLabs 3L, fuente propia

Coste de pedido		
	Pieza original	Pieza optimizada
Unidades	FormLabs 3L	FormLabs 3L
Costes de pedido		
Preparación/postprocesado del pedido [€]	50	50
Coste de la pieza		
Material [€/u]	22,89	14,58
Horas de impresión [€/u]	47,17	37,30
Coste por pieza [€/u]	70,06	51,88
Coste de todas las piezas [€]	140,13	103,76
Costes totales del pedido		
Coste total del pedido [€]	190,13	153,76

Se observa que en la tecnología SLA con la impresora FormLabs 3L la optimización topológica sí genera un impacto económico relevante respecto a la pieza original. El coste total del pedido para la pieza original asciende a 190,13 €, mientras que para la optimizada se reduce a 153,76 €, lo que supone un ahorro aproximado del 19,1 %. Esta diferencia se debe principalmente a la reducción del consumo de material (de 22,89 € a 14,58 € por unidad) y, en menor medida, a la disminución del tiempo de impresión (de 47,17 € a 37,30 € por unidad), lo que reduce también los costes asociados a horas de máquina y personal.

El coste de preparación y postprocesado se mantiene constante en 50 €, ya que se trata de un valor fijo independiente de la geometría, y se ha calculado considerando la fabricación de dos piezas, necesarias para conformar el conjunto de bieletas en la bicicleta.

En este caso, a diferencia de lo observado con la tecnología FDM, la optimización topológica no solo aporta ventajas mecánicas como reducción de masa y mejor aprovechamiento del material, sino que además implica un ahorro económico considerable.

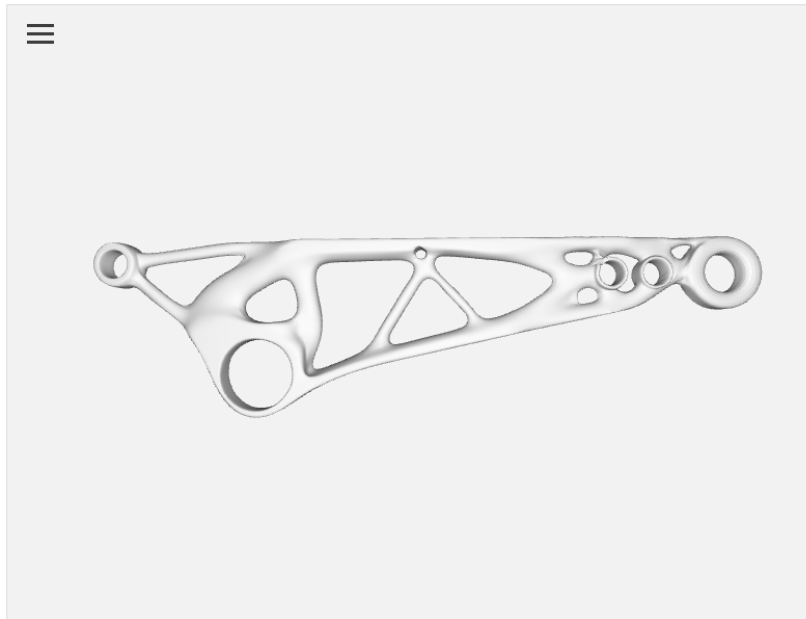
6.2 ANÁLISIS DE COSTES EXTERNOS

En esta comparativa de costes se ha optado por emplear poliamida (PA12) fabricada mediante SLS como material de referencia para ambas geometrías. La elección no es casual: la poliamida es uno de los termoplásticos más utilizados en impresión 3D industrial debido a su equilibrio entre resistencia mecánica, ligereza, precisión y coste.

La PA12 (poliamida 12) presenta una densidad aproximada de 1,01 g/cm³, una resistencia a tracción de 48–50 MPa y un módulo elástico de 1.650–1.800 MPa, valores que permiten obtener piezas funcionales para prototipos y ensayos de montaje. Además, mantiene un buen comportamiento frente al desgaste y a la fatiga, así como una resistencia aceptable a la humedad y a los productos químicos.

Para realizar la estimación de costes se ha utilizado la plataforma i.materialise [38], un servicio en línea que permite subir modelos 3D, seleccionar entre múltiples procesos y materiales de fabricación, obtener presupuestos instantáneos y, si se desea, realizar directamente el pedido de producción. Esta herramienta resulta especialmente útil en un contexto de estudio comparativo, ya que ofrece una base de cálculo homogénea, con precios actualizados y condiciones de producción constantes para todos los casos analizados.

En este estudio se han seleccionado las piezas optimizada y original, fabricadas en el mismo material y bajo las mismas condiciones, con el objetivo de aislar la variable “coste de fabricación” y evaluar únicamente cómo influye el cambio de geometría en el precio final. El acabado elegido ha sido “Natural White”, sin tratamientos adicionales, para que el precio refleje únicamente el coste de fabricación y no el de acabados superficiales o tintados.



Materials
Polyamide (SLS)

Colors and Finishes
Natural white

Scale
4.036 %
273.29 x 72.82 x 15.8 mm

Quantity
- 2 + × 33.28 € = ~~66.56 €~~

Price
64.22 €
Discounted price

ADD TO CART

Figura 64 Presupuesto obtenido en i.materialise para la pieza optimizada, fuente propia



Materials
Polyamide (SLS)

Colors and Finishes
Natural white

Scale
100 %
267.08 x 71.71 x 15.8 mm

Quantity
- 2 + × 35.95 € = ~~71.90 €~~

Price
69.66 €
Discounted price

ADD TO CART

Figura 65 Presupuesto obtenido en i.materialise para la pieza original, fuente propia

Los resultados obtenidos en la plataforma i.materialise muestran que la pieza optimizada en poliamida tiene un precio unitario de 33,28 €, mientras que la pieza original alcanza los 35,95 € en las mismas condiciones de fabricación. Esta diferencia, aunque aparentemente modesta, 2,67 € por unidad, representa un ahorro del 7,43% en la fabricación de cada componente.

En el caso de una bicicleta, donde se requieren dos piezas idénticas para completar el conjunto, el coste total pasa de 71,90 € en el diseño original a 66,56 € con la versión optimizada. Además, la propia plataforma aplica un descuento por compra múltiple, lo que amplifica el ahorro.

6.3 COMPARATIVA DE LOS COSTES

Para analizar el impacto económico de la optimización de la pieza, se ha realizado una comparativa de costes utilizando tres tecnologías de fabricación aditiva: FDM, SLA y SLS a través de la plataforma i.materialise. En cada caso se han presupuestado tanto la pieza original como la optimizada, manteniendo las mismas condiciones de material y acabado dentro de cada tecnología, con el objetivo de evaluar cómo influye la reducción de masa en el precio final.

Tabla 12 Comparativa de costes en las tres tecnologías de fabricación aditiva, fuente propia

	Análisis interno		Análisis externo
	Impresión FDM	Impresión SLA	i.materialise (SLS)
Pieza Original [€]	52,76	190,13	69,66
Pieza Optimizada [€]	52,75	153,76	64,22
Reducción del coste [%]	0,019%	19,129%	7,809%

Los resultados reflejan diferencias muy marcadas entre tecnologías: en FDM, el coste por pieza prácticamente no varía entre el diseño original (52,76 €) y el optimizado (52,75 €), con una reducción insignificante del 0,019%. Esto se debe a que, en este proceso, el coste está más influenciado por el tiempo de impresión y la preparación que por el volumen de material, por lo que la reducción de masa apenas se traduce en ahorro.

En SLA, el efecto es mucho más notable: el coste pasa de 190,13 € a 153,76 €, lo que supone una reducción del 19,13%. En este caso, el precio del material y el tiempo de exposición del láser son factores directamente dependientes del volumen de la pieza, por lo que la optimización tiene un impacto considerable.

Por su parte, la fabricación externa en SLS con PA12 en i.materialise muestra un coste de 69,66 € para la pieza original y de 64,22 € para la optimizada, lo que equivale a una reducción del 7,81%. Aunque la diferencia no es tan alta como en SLA, sigue siendo relevante en

tiradas pequeñas o producción bajo demanda, donde cada euro por unidad puede marcar la viabilidad del proyecto.

Cabe destacar que los precios reflejados en la tabla corresponden a la fabricación de dos unidades, es decir, el número de bieletas necesarias para una bicicleta.

Un aspecto interesante que se desprende de la comparativa es que, cuanto más cara es la tecnología de impresión, mayor es la reducción porcentual de coste obtenida con la optimización. Esto puede explicarse porque, en procesos de mayor coste por hora de máquina y por volumen de material, cualquier reducción de geometría tiene un impacto proporcionalmente más alto en el precio final. En tecnologías como FDM, con costes de material y tiempo relativamente bajos, la reducción de masa apenas altera el coste; en cambio, en tecnologías como SLA, donde el material es caro y el tiempo de fabricación es crítico, optimizar la pieza se traduce en ahorros más sustanciales.

Cabe destacar que, si se busca actualmente en el mercado una bieleta para un modelo Kona Stab de 2008, la disponibilidad es muy limitada debido a que se trata de un componente descatalogado. En el mercado de segunda mano, estas piezas suelen encontrarse en un rango aproximado de 40 a 80 € [39], dependiendo de su estado y del vendedor. En el caso de unidades nuevas pero procedentes de stock antiguo, el precio puede aumentar significativamente, situándose habitualmente entre 80 y 150 €.

Sin embargo, es importante señalar que la producción de esta pieza en aluminio mediante tecnología de fabricación aditiva metálica (por ejemplo, DMLS o SLM) resulta sensiblemente más costosa que su fabricación tradicional por mecanizado CNC o fundición, debido al elevado precio del polvo metálico, el mayor tiempo de impresión y la necesidad de postprocesos mecánicos para alcanzar las tolerancias requeridas. Por ello, para lotes muy reducidos o piezas únicas de geometría compleja la impresión 3D en metal puede ser una opción, pero en la mayoría de los casos la fabricación tradicional continúa siendo más competitiva económicamente.

Capítulo 7. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

El desarrollo de este proyecto ha demostrado que la aplicación de técnicas de ingeniería inversa, optimización topológica y fabricación aditiva permite rediseñar componentes mecánicos, como la bieleta de una bicicleta de descenso, logrando reducciones significativas de masa sin comprometer las prestaciones mecánicas. En el caso concreto de este proyecto, se ha obtenido una disminución del 51% en la masa de la pieza respecto al modelo original, manteniendo su resistencia, rigidez y funcionalidad.

El proceso seguido ha comenzado con el escaneado tridimensional de la bieleta original mediante un escáner de ingeniería inversa, obteniendo una nube de puntos de alta precisión. A continuación, se ha procedido a la limpieza y refinado de dicha nube, generando una malla poligonal optimizada para su edición.

Posteriormente, en un entorno CAD, se ha desarrollado el modelo paramétrico y se ha realizado la optimización topológica, eliminando material innecesario sin comprometer la integridad estructural.

Finalmente, los diseños resultantes se han fabricado mediante impresión 3D en diferentes tecnologías, lo que ha permitido comparar costes, calidades y propiedades mecánicas entre el modelo original y el optimizado.

El análisis comparativo de costes en tres tecnologías de impresión 3D (FDM, SLA y SLS) ha permitido constatar que la reducción de masa tiene un impacto económico desigual: prácticamente nulo en FDM, moderado en SLS y muy relevante en SLA, alcanzando ahorros cercanos al 20% en este último caso. En el marco de la plataforma i.materialise, la fabricación de la bieleta optimizada en PA12 mediante SLS mostró un ahorro del 7,81% frente al modelo original, lo que, aunque modesto en términos absolutos, es significativo en producción bajo demanda.

Sin embargo, se ha evidenciado que, para volúmenes grandes de producción, la fabricación tradicional (como el mecanizado CNC o la fundición) sigue siendo más competitiva económicamente, especialmente en el caso de piezas metálicas como las fabricadas en aluminio 6061, donde la impresión 3D metálica presenta costes notablemente más elevados.

Este proyecto abre la puerta a futuras ramas de investigación, y una de las más interesantes es la exploración de nuevas formas de fabricar la bieleta mediante materiales compuestos impresos en 3D.

Al cambiar la forma de fabricar la bieleta y utilizar materiales compuestos impresos en 3D, se abre la posibilidad de crear piezas pensadas para cada ciclista. Ya no se trata únicamente de aligerar peso o aumentar la resistencia, sino de ajustar el comportamiento de la bicicleta a la manera en que cada persona pedalea, frena y afronta los descensos.

Con esta tecnología, se puede variar la rigidez en puntos clave, lograr que la suspensión responda de forma más suave o más firme y adaptar la geometría para que encaje mejor con la postura y estilo de conducción de cada usuario.

La bicicleta deja de ser un producto estándar para convertirse en una herramienta casi a medida, capaz de ofrecer una experiencia más cómoda, segura y eficiente.

Capítulo 8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. Montes y L. Eduardo, «Diseño, desarrollo técnico y optimización de una bieleta de anclaje de amortiguación para una bicicleta de descenso», may 2018 [En línea]. Disponible en: <https://riunet.upv.es/handle/10251/101252>
- [2] M. Biudes, «Todo-Bicicletas: Bicicleta Kona Stab Deluxe», Todo-Bicicletas. [En línea]. Disponible en: <https://todo-bicicletas.blogspot.com/2009/10/bicicleta-kona-stab-deluxe.html>
- [3] *La Agenda 2030 y los objetivos de desarrollo sostenible una oportunidad para América Latina y Caribe*. Santiago [Chile]: Naciones Unidas, 2018.
- [4] J. P. Alberca, «¿Quién inventó la bicicleta? Conoce al creador y su impacto», Blog de Ciclismo Urbano - Santafixie.[En línea]. Disponible en: <https://www.santafixie.com/blog/quien-invento-la-bicicleta/>
- [5] «La Historia de la Bicicleta», WeRbikes Tienda de Bicicletas. [En línea]. Disponible en: <https://www.werbikes.mx/blogs/werbikes-blog/la-historia-de-la-bicicleta/?source=facebook>
- [6] «Tipos de bicicleta, Ilustração vetorial», iStock. [En línea]. Disponible en: <https://www.istockphoto.com/pt/vetorial/tipos-de-bicicleta-ilustra%C3%A7%C3%A3o-vetorial-gm477595530-66910529>
- [7] «Reducing bike weight to improve performance», BikeRadar. [En línea]. Disponible en: <https://www.bikeradar.com/features/reducing-bike-weight-to-improve-performance>
- [8] B. Registrada, «Quadro de bicicleta fibra de carbono: Dicas para escolher, instalar e cuidar», Bike Registrada.[En línea]. Disponible en: <https://bikeregistrada.com.br/blog/quadro-de-bicicleta-fibra-de-carbono-dicas-para-escolher-instalar-e-cuidar/>
- [9] «Club Tesla de Eslovaquia - Club Tesla de Eslovaquia», Tesla Club Slovakia. [En línea]. Disponible en: <https://teslaclub.sk>
- [10] «Ingeniería inversa | Siemens Software», Siemens Digital Industries Software. [En línea]. Disponible en: <https://www.sw.siemens.com/es-ES/technology/reverse-engineering/>
- [11] «Qué es la ingeniería inversa: Definición, proceso y aplicaciones». [En línea]. Disponible en: <https://www.crediplast.com/blog/que-es-ingenieria-inversa/>
- [12] «Escaneado 3D de Piezas - Mediciones de precisión», Ikustec. [En línea]. Disponible en: <https://ikustec.com/escaneado-3d-de-piezas/>
- [13] A. M, «El diseño generativo, ¿está cambiando la fabricación aditiva?», 3Dnatives. [En línea]. Disponible en: <https://www.3dnatives.com/es/disenio-generativo-fabricacion-aditiva-170820202/>
- [14] A. M, «Optimización topológica VS Diseño generativo: ¿qué herramienta de modelado elegir?», 3Dnatives. [En línea]. Disponible en:

- <https://www.3dnatives.com/es/optimizacion-topologica-vs-diseno-generativo-190920242/>
- [15] N. G, «¿Cuáles son los software de diseño generativo para impresión 3D?», 3Dnatives. [En línea]. Disponible en: <https://www.3dnatives.com/es/software-diseno-generativo-150620232/>
- [16] «Solid Edge | Siemens | Diseño en 3D, simulación, fabricación». [En línea]. Disponible en: <https://solidedge.siemens.com/es/>
- [17] «Análisis de elementos finitos (FEA)», Siemens Digital Industries Software. Accedido: 11 de agosto de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.sw.siemens.com/es-ES/technology/finite-element-analysis-fea/>
- [18] «Análisis FEM - Método de elementos finitos - Debem». [En línea]. Disponible en: <https://www.debem.com/es/analisis-fem/>
- [19] S. Ozel, «Why You Should Use the Additive Manufacturing Space in Fusion 360», Fusion Blog. [En línea]. Disponible en: <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/blog/7-reasons-why-you-should-use-the-additive-manufacturing-space-in-fusion-360/>
- [20] Mecalux, «Fabricación aditiva: la impresión 3D digitaliza la manufactura». [En línea]. Disponible en: <https://www.mecalux.com.mx/blog/fabricacion-aditiva>
- [21] «Impresión 3D Aeroespacial», Dassault Systèmes. [En línea]. Disponible en: <https://www.3ds.com/es/make/solutions/industries/3d-printing-aerospace>
- [22] S. S, «Guía completa: Fusión láser por lecho de polvo (L-PBF), ¿te explicamos todo!», 3Dnatives. Accedido: 11 de agosto de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.3dnatives.com/es/sinterizado-directo-de-metal-por-laser-les-explicamos-todo/>
- [23] «Material Extrusion | Additive Manufacturing Research Group | Loughborough University». [En línea]. Disponible en: <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/materialextrusion/>
- [24] I. 3DGuías32 minutos de lectura, «Guía sobre impresión 3D por estereolitografía (SLA)», Formlabs. [En línea]. Disponible en: https://formlabs.com/es/blog/guia-definitiva-estereolitografia-sla-impresion-3d/?srsltid=AfmBOoqQ0pfLKWzcsfJJ4KkxMeGc-A-LYg0y64yTXN4r_Smtlb0--fib
- [25] «Aluminum 6061-T6; 6061-T651». [En línea]. Disponible en: <https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=b8d536e0b9b54bd7b69e4124d8f1d20a>
- [26] «PDF». [En línea]. Disponible en: <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/70701/fichero/ANEXO+I.pdf>
- [27] UNE-EN ISO 4210. [En línea]. Disponible en: <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/70701/fichero/ANEXO+I.pdf>
- [28] «OWNER'S MANUALS». [En línea]. Disponible en: <https://konaworld.com/pages/downloads>
- [29] «handyscan-3d_silver-series_brochure_es_20241202».

- [30] «Creaform Metrology Suite + VXintegrity: Plataforma de software 3D de Creaform». [En línea]. Disponible en: <https://www.creaform3d.com/Products/Software>
- [31] «Transform Design and Manufacturing with Simulation-Driven Insights», Altair Inspire. [En línea]. Disponible en: <https://altair.com/inspire>
- [32] «Original Prusa i3 MK3S+ | Impresoras 3D Original Prusa vendidas directamente por Josef Prusa», Prusa3D by Josef Prusa. [En línea]. Disponible en: <https://www.prusa3d.com/es/categoria/original-prusa-i3-mk3s-2/>
- [33] «Form 3L: The First Affordable Large Format Resin 3D Printer», Formlabs.[En línea]. Disponible en: <https://formlabs.com/global/3d-printers/form-3l/?srsltid=AfmBOorAGSNXfTF4z0BRVo8AWa8VLHsaemdy-3EVqANf2AO1A7EX115q>
- [34] «UltiMaker Cura», UltiMaker. [En línea]. Disponible en: <https://ultimaker.com/software/ultimaker-cura/>
- [35] «PreForm 3D Printing Software: Prepare Your Models for Printing», Formlabs. [En línea]. Disponible en: <https://formlabs.com/es/software/preform/?srsltid=AfmBOopkVN2J1kvfuycYcywk6NZsKOI7znwrhzKRuHvJ7D810GrUOvgM>
- [36] S. Melito, «The Economics of Injection Molding vs. 3D Printing», Fictiv. [En línea]. Disponible en: <https://www.fictiv.com/articles/the-economics-of-injection-molding-vs-3d-printing>
- [37] «PVPC | ESIOS electricidad · datos · transparencia». [En línea]. Disponible en: <https://www.esios.ree.es/es/pvpc>
- [38] «Upload 3D Model | 3D Printing Service | i.materialise». [En línea]. Disponible en: <https://i.materialise.com/en/3dprint#modelId=3b0f3ca8-7b1b-4116-a5cd-cb79ccdf614c&materialId=035f4772-da8a-400b-8be4-2dd344b28ddb&colourId=bba2bebb-8895-4049-aeb0-ab651cee2597&productTemplateId=71bf88f0-705d-419e-9ec2-b75bf37f32b6&scale=1&quantity=2>
- [39] «Kona Stab Primo Rocker Arms Link Linkage Bike Frame Parts 2000 2001 2002 2003», eBay. [En línea]. Disponible en: https://www.ebay.com/itm/256549752234?_ul=PT

ANEXO I: FICHAS TÉCNICAS DE LAS IMPRESORAS EMPLEADAS

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

* Piezas consumibles, como las láminas de PEI (lisas, texturizadas, etc.) no están cubiertas por la garantía, ya que los recubrimientos están diseñados para disminuir con el tiempo a menos que se haya producido un fallo debido a un defecto en los materiales o la mano de obra. El daño cosmético, que incluye, entre otros, rasguños, abolladuras, grietas, u otros daños cosméticos tampoco está cubierto por la garantía. Solo las láminas defectuosas a la llegada están cubiertas por la garantía.

FORMLABS – FORM 3 – 3L



Tech Specs	Form 3	Form 3L
TECHNOLOGY	Low Force Stereolithography (LFS) [™]	
BUILD VOLUME W x D x H	14.5 x 14.5 x 18.5 cm 5.7 x 5.7 x 7.3 in	33.5 x 20 x 30 cm 13.2 x 7.9 x 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	