



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: Bruno Centellas Roldán

Director: Mariano Jiménez Calzado

Co-Director: Silvia Fernández Villamarín

Madrid

Junio 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.: Bruno Centellas Roldán Fecha: 26/06/2025

Autorizada la entrega del proyecto
EL DIRECTOR DEL PROYECTO



Fdo.: Mariano Jiménez Calzado Fecha: 27/06/2025



Fdo.: Silvia Fernández Villamarín Fecha: 27/06/2025



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: Bruno Centellas Roldán

Director: Mariano Jiménez Calzado

Co-Director: Silvia Fernández Villamarín

Madrid

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

Autor: Centellas Roldán, Bruno.

Director: Jiménez Calzado, Mariano.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO

El presente Trabajo de Fin de Grado se centra en el rediseño de la bieleta trasera de una bicicleta de montaña (MTB) mediante técnicas de ingeniería inversa, simulación FEM y diseño generativo. El proceso ha permitido obtener una pieza optimizada, con una reducción de masa del 21%, manteniendo su funcionalidad estructural. Finalmente, se ha fabricado un prototipo mediante tecnologías de impresión 3D, evaluando diferentes métodos de fabricación aditiva.

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

1. Introducción

El objetivo de este proyecto es obtener una bieleta optimizada topológicamente para una bicicleta de montaña de doble suspensión, capaz de cumplir con las mismas funciones que la original, pero con un diseño más eficiente. Para ello, se ha desarrollado un proceso completo que parte de escaneado 3D de la pieza, seguido de su análisis estructural, rediseño mediante herramientas de optimización topológica y posterior fabricación mediante impresión 3D. El proyecto, busca mejorar el rendimiento funcional del componente, reducir su masa y explorar las ventajas que ofrece la fabricación aditiva.

2. Definición del proyecto

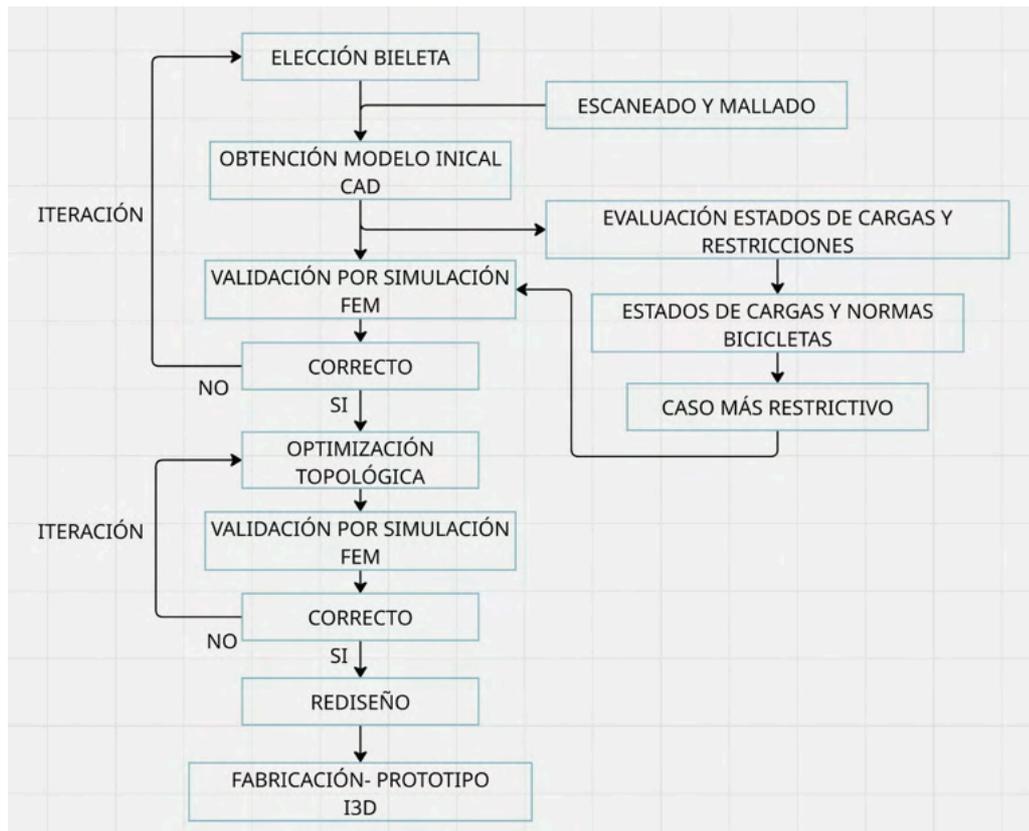


Ilustración 1 Definición del proyecto a realizar (Fuente: Elaboración propia).

3. Descripción del proyecto

El Proyecto comienza con la obtención de la geometría original de la bieleta de una bicicleta de montaña (MTB) de doble suspensión, mediante escaneado 3D. A partir de este modelo se define un entorno funcional de la pieza: se establecen las condiciones de contorno y los estados de carga, basados en su comportamiento real dentro del sistema de suspensión.

Posteriormente, se modela la pieza original en Solid Edge y se realiza un primer análisis mediante simulación FEM, con el objetivo de comprender su respuesta estructural. Con estos datos, se inicia el proceso de optimización topológica empleando herramientas de diseño generativo, ajustando las restricciones evaluadas. Tras cada iteración, se valida el resultado mediante nuevas simulaciones FEM, evaluando la reducción de masa obtenida y asegurando que no se comprometa la resistencia de la pieza.

Una vez obtenida la geometría optimizada, se lleva a cabo un refinado estético en Altair Inspire, suavizando superficies y curvaturas, adaptando el modelo a los requisitos de fabricación. Finalmente, se fabrican distintos prototipos mediante impresión 3D, evaluando diferentes tecnologías de fabricación aditiva: FDM y SLA, evaluando sus características, materiales, postprocesados y costes.

4. Resultados

Como resultado final, se ha obtenido una bieleta optimizada con una reducción del 21% de masa respecto al modelo original, manteniendo su funcionalidad estructural. El

prototipo ha sido fabricado mediante tecnologías de impresión 3D FDM y SLA, demostrando la viabilidad del diseño y proceso de fabricación.



Ilustración 2 Bieleta Optimizada Topológicamente al 21% de masa (Fuente: Elaboración propia).

5. Conclusiones

La bieleta optimizada presenta una estructura más eficiente y ligera, manteniendo su funcionalidad original. Gracias al uso de fabricación aditiva, se demuestra que el desarrollo de prototipos y lotes de producción bajos resultan especialmente rentables en comparación con métodos de fabricación tradicionales.

ANALYSIS, GENERATIVE DESIGN AND MANUFACTURE OF END-USE COMPONENTS USING 3D PRINTING FOR APPLICATION ON A BICYCLE

Author: Centellas Roldán, Bruno.

Supervisor: Jiménez Calzado, Mariano.

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

ABSTRACT

This Final Degree Project focuses on the redesign of the rear linkage of a mountain bike (MTB) using reverse engineering techniques, FEM simulation and generative design. The process has made it possible to obtain an optimized part, with a mass reduction of 21%, while maintaining its structural functionality. Finally, a prototype has been manufactured using 3D printing technologies, evaluating different additive manufacturing methods.

Keywords: Topology Optimization, Bicycle, Linkage, Generative Design, 3D Printing.

1. Introduction

The objective of this project is to obtain a topologically optimized linkage for a full-suspension mountain bike, capable of fulfilling the same functions as the original, but with a more efficient design. To this end, a complete process has been developed that starts with 3D scanning of the piece, followed by its structural analysis, redesign using topological optimization tools and subsequent manufacturing using 3D printing. The project seeks to improve the functional performance of the component, reduce its mass and explore the advantages offered by additive manufacturing.

2. Project Definition

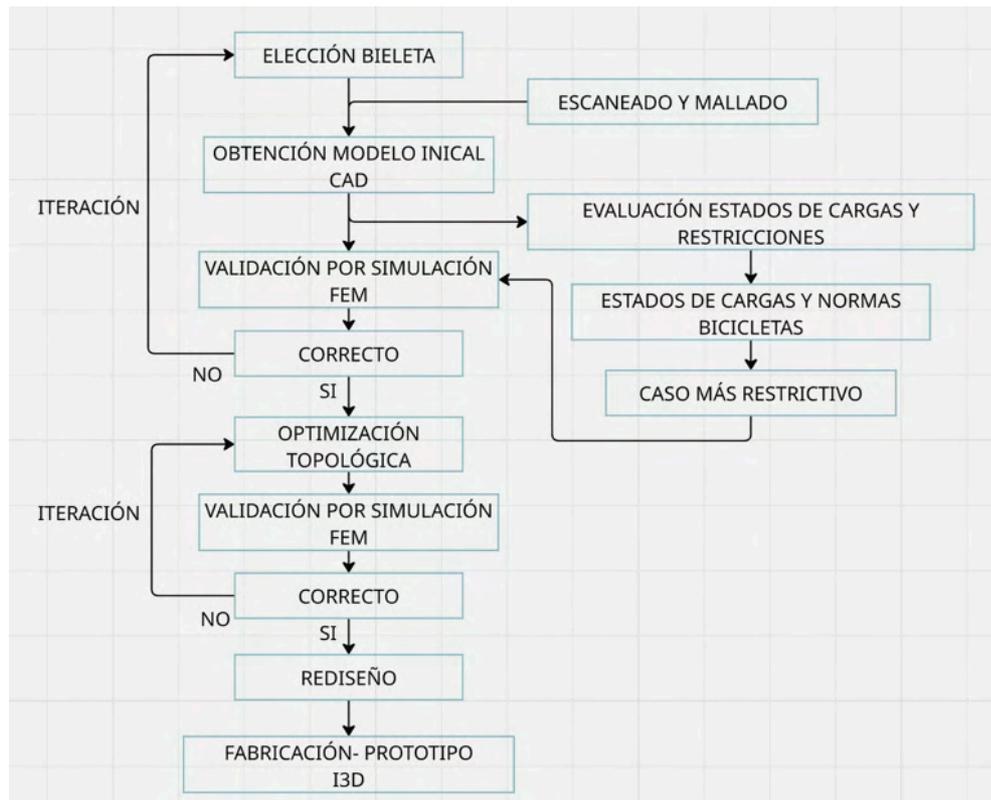


Illustration 3 Definition of the project to be carried out. (Source: Own elaboration).

3. Project Description

The project begins with obtaining the original geometry of the linkage of a full-suspension mountain bike (MTB), by means of 3D scanning. From this model, a functional environment of the part is defined: the boundary conditions and load states are established, based on its actual behavior within the suspension system.

Subsequently, the original part is modeled in Solid Edge and a first analysis is carried out using FEM simulation, with the aim of understanding its structural response. With these data, the topological optimization process begins using generative design tools, adjusting the evaluated constraints. After each iteration, the result is validated through new FEM simulations, evaluating the mass reduction obtained and ensuring that the strength of the part is not compromised.

Once the optimized geometry is obtained, an aesthetic refinement is carried out on Altair Inspire, smoothing surfaces and curvatures, adapting the model to the manufacturing requirements. Finally, different prototypes are manufactured using 3D printing, evaluating different additive manufacturing technologies: FDM and SLA, evaluating their characteristics, materials, post-processing and costs.

4. Results

As a final result, an optimized linkage has been obtained with a 21% reduction in mass compared to the original model, while maintaining its structural functionality. The prototype has been manufactured using FDM and SLA 3D printing technologies, demonstrating the feasibility of the design and manufacturing process.



Illustration 4 Topologically Optimized Link at 21% Mass (Fuente: Own source).

5. Conclusions

The optimized linkage features a more efficient and lighter structure while maintaining its original functionality. Thanks to the use of additive manufacturing, the development of prototypes and low production batches is proven to be particularly cost-effective compared to traditional manufacturing methods.

Índice de la memoria

1. Introducción.....	13
1.1 Motivación del proyecto	13
1.2 Objetivos.....	13
1.2.1 Objetivo general	13
1.2.2 Objetivos específicos.....	13
1.3 Objetivos del desarrollo sostenible.....	14
2. Descripción de las tecnologías	17
2.1 Optimización Topológica	17
2.2 Impresión 3D	21
2.3 Ingeniería inversa	30
3. Estado de la cuestión.....	33
3.1 Contexto histórico.....	33
3.1.1 Tipos de bicicletas	34
3.1.2 Componentes MTB.....	41
3.1.3 Suspensión trasera en MTB.....	45
3.2 Materiales en MTB.....	53
3.3 Normativa en bicicletas de montaña.....	57
4. Definición del trabajo.....	60
4.1 Procedimiento	60
4.2 Propuesta de diseño	61
4.3 Estudio de Geometría	61
4.4 Estudio de Cargas	64
4.4.1 Estado de Cargas 1.....	64
4.4.2 Estado de Cargas 2.....	65
4.4.3 Estado de Cargas 3.....	67
4.4.4 Estado de Cargas 4.....	68
4.4.5 Estado de Cargas 5.....	70
4.4.6 Análisis y conclusiones sobre los estados de cargas.....	71
5. Desarrollo del trabajo.....	72

5.1	Prototipo 1	72
5.1.1	Obtención modelo CAD	72
5.1.2	Validación mediante simulación FEM modelo.....	80
5.1.3	Optimización Topológica.....	87
5.2	Prototipo 2	89
5.2.1	Obtención modelo CAD.....	89
5.2.2	Validación mediante simulación FEM modelo.....	93
5.2.3	Optimización Topológica.....	96
5.2.4	Validación mediante simulación FEM del modelo optimizado.....	101
5.2.5	Refinado de geometría.....	105
5.2.6	Validación mediante simulación FEM del modelo refinado	107
6.	Fabricación de prototipos.....	112
6.1	Metodología y características de Impresión 3D	112
6.2	Impresión de prototipos	120
6.2.1	Impresión por FDM.....	120
6.2.2	Impresión por SLA.....	130
7.	Análisis de resultados.....	135
7.1.1	Costes de prototipos	136
8.	Conclusiones y trabajos futuros.....	143
9.	Bibliografía.....	145

Índice de Ilustraciones

Ilustración 1 Definición del proyecto a realizar (Fuente: Elaboración propia).	5
Ilustración 2 Bieleta Optimizada Topológicamente al 21% de masa (Fuente: Elaboración propia).....	6
Illustration 3 Definition of the project to be carried out. (Source: Own elaboration).	8
Illustration 4 Topologically Optimized Link at 21% Mass (Fuente: Own source).	9
Ilustración 5 Objetivos del desarrollo sostenible (Fuente: ONU)	15
Ilustración 6 Ejemplo Optimización Topológica (Fuente:3Dnatives).....	17
Ilustración 7 Proceso de Optimización Topológica (Fuente, FormLabs).....	20
Ilustración 8 Impresión 3D mediante FDM (Fuente: Todo 3D).....	23
Ilustración 9 Impresión 3D mediante SLA (Fuente: UNSW Making).....	23
Ilustración 10 Impresión 3D mediante SLS (Fuente: Formlabs).....	24
Ilustración 11 Costes de impresión 3D (Fuente: Dep.Fabricación, ICAI).	29
Ilustración 12 Ejemplo de aplicación de la Ingeniería Inversa (Fuente:Sicnova).	32
Ilustración 13Evolución de las bicicletas (Fuente: CicloMag).....	33
Ilustración 14 Specialized (Fuente: IBKsport).	34
Ilustración 15 Bicicleta Corss Country, Specialized S-Works Epic 8 (Fuente: Specialized).	35
Ilustración 16 Bicicleta Trail, Specialized S-Stumpjumper 15 Evo (Fuente: Specialized). 36	
Ilustración 17 Bicicleta All Mountain, Rockrider 700s (Fuente: Decathlon).....	36
Ilustración 18 Enduro, Specialized Enduro Pro (Fuente: Specialized).	37
Ilustración 19 Bicicleta Downhill, Specialized Demo Race (Fuente: IBKsport).	38
Ilustración 20 Bicicleta Freeride/Dirt Jump, SRadio Bike (Fuente: Skatepro).	39
Ilustración 21 Bicicleta E-MTB, Specialized Turbo Levo 4 (Fuente: Specialized).....	39
Ilustración 22 Bicicleta Fat Bike, Surly (Fuente: Imfixies).....	40
Ilustración 23Componentes MTB (Fuente:Restless Bike).	41
Ilustración 24 Anti-Squat (Fuente:MounainBike).....	46
Ilustración 25 Cálculo del Anti-Squat mediante el método Cossalter (Fuente:Linkage Desing).....	47
Ilustración 26 SAG (Fuente:LaBicicleta).	47

Ilustración 27 Leverage Ratio (Fuente: Vorsprung suspension).	48
Ilustración 28 Brake Squat (Fuente: PinkBike).	49
Ilustración 29 Pedal Kickback (Fuente: 32 Dientes).	49
Ilustración 30 Sistema Monopivote (Fuente: ESMTB).	50
Ilustración 31 Sistema Horst Link (4 barras) (Fuente: YouTube, Daniel Araneda).	50
Ilustración 32 Sistema Split Pivot, con punto de giro en rueda trasera (Fuente:ESMTB).	51
Ilustración 33 Sistema Pivote Virtual (Fuente:ESMTB).	52
Ilustración 34 Sistema amortiguación flotante (Fuente:MTB pro).	52
Ilustración 35 Propiedades mecánicas del Acero aleado 4130 (Fuente: Alloys International).	53
Ilustración 36 Propiedades mecánicas del Titanio (Fuente: Alloys International).	54
Ilustración 37 Propiedades mecánicas del Aluminio 6061 (Fuente:Alloys International)..	55
Ilustración 38 Propiedades mecánicas del Aluminio 7075 (Fuente:Alloys International)..	56
Ilustración 39 Propiedades mecánicas de las Fibras de carbono (Fuente: Triatleta a ratos).	57
Ilustración 40 Desarrollo del trabajo a realizar (Fuente: Elaboración propia).	60
Ilustración 41 Bieleta original adquirida (Fuente: Aliexpress).	61
Ilustración 42 Geometría bicicleta Specialized Stumpjumper (Fuente: Specialized).	62
Ilustración 43 Trigonometría aplicada para la determinación del ángulo del triángulo trasero (Fuente: Elaboración propia).	63
Ilustración 44 Estado de Cargas N°1, Norma UNE EN ISO 4210, 4.5, parte 6 (Fuente: UNE- EN-ISO).	64
Ilustración 45 Cálculo de la Fuerza soportada por el tirante de la Specialezed Stumpjumper, para el estado de cargas N°1 (Fuente: Elaboración propia).	65
Ilustración 46 Estado de Cargas N°2, Norma UNE EN ISO 4210, Anexo C, parte 6 (Fuente: UNE-EN-ISO).	66
Ilustración 47 Cálculo de la Fuerza soportada por el tirante de la Specialezed Stumpjumper, para el estado de cargas N°2 (Fuente: Elaboración propia).	67
Ilustración 48 Cálculo de la Fuerza soportada por el tirante de la Specialezed Stumpjumper, con la carga aplicada según el ensayo de choque (Fuente: Elaboración propia).	68

Ilustración 49 Distribución del peso corporal (Fuente: TFG Fatiga en suspensión trasera MTB).	69
Ilustración 50 Descripción de fuerzas sobre la bicicleta (Fuente: Elaboración propia).	70
Ilustración 51 Tipos de bieletas según su geometría (Fuentes: Actionsport, Decathlon)....	72
Ilustración 52 Bieletas compradas (Fuentes: Aliexpress, Decathlon).	73
Ilustración 53 Spray matificante aplicado a la bieleta (Fuente: Elaboración propia).....	73
Ilustración 54 Escáner empleado y proceso de escaneado de la bieleta (Fuente: Elaboración propia).....	74
Ilustración 55 Modelos digitales obtenidos del escaneo (Fuente: Elaboración propia).	75
Ilustración 56 Fusión de los dos modelos digitales para crear una única bieleta (Fuente: Elaboración propia).	75
Ilustración 57 Variedad de herramientas empleadas para la obtención del modelo CAD (Fuente: Elaboración propia).	75
Ilustración 58 Bieleta reconstruida mediante VXelements (Fuente: Elaboración propia). .	76
Ilustración 59 Simetría de pieza mediante VXelements (Fuente: Elaboración propia).	77
Ilustración 60 Mallado inicial (Fuente: Elaboración propia).....	77
Ilustración 61 Reducción de la malla (Fuente: Elaboración propia).	78
Ilustración 62 Autosurface en VXelements (Fuente: Elaboración propia).....	78
Ilustración 63 Modelo CAD funcional importado a Solid Edge de VXelements (Fuente: Elaboración propia).	79
Ilustración 64 Bieleta con los agujeros, material y geometría inicial en Solid Edge (Fuente: Elaboración propia).	80
Ilustración 65 Propiedades del Aluminio 6061-T6 (Fuente: Elaboración propia).	81
Ilustración 66 Condiciones de contorno aplicadas a la bieleta en Al 6061, según el estado de cargas N°1 (Fuente: Elaboración propia).....	81
Ilustración 67 Mallado previo a la resolución de la bieleta para el estado de cargas N°1 (Fuente: Elaboración propia).	82
Ilustración 68 Distribución de tensiones de Von Mises obtenida en la simulación FEM del modelo inicial en Al 6061- T6, para el estado de cargas N°1 (Fuente: Elaboración propia).	83

Ilustración 69 Desplazamientos obtenidos en la simulación FEM del modelo inicial en Al 6061- T6, para el estado de cargas N°1 (Fuente: Elaboración propia).	83
Ilustración 70 Condiciones de contorno aplicadas a la bieleta en Al 6061, según el estado de cargas N°3	84
Ilustración 71 Distribución de tensiones de Von Mises obtenida en la simulación FEM del modelo inicial en Al 6061- T6, para el estado de cargas N°3 (Fuente: Elaboración propia).	85
Ilustración 72 Propiedades del Aluminio 7075-T6 (Fuente: Elaboración propia).	85
Ilustración 73 Distribución de tensiones de Von Mises obtenida en la simulación FEM del modelo inicial en Al 7075- T6, para el estado de cargas N°3 (Fuente: Elaboración propia).	86
Ilustración 74 Desplazamientos obtenidos en la simulación FEM del modelo inicial en Al 7075- T6, para el estado de cargas N°3 (Fuente: Elaboración propia).	86
Ilustración 75 Condiciones de contorno empleadas para el diseño generativo en Solid Edge (Fuente: Elaboración propia).	87
Ilustración 76 Resultados de la optimización topológica con un 18% de reducción de masa (Fuente: Elaboración propia).	88
Ilustración 77 Resultados de la optimización topológica con un 24% de reducción de masa (Fuente: Elaboración propia).	88
Ilustración 78 Resultados de la optimización topológica con un 30% de reducción de masa (Fuente: Elaboración propia).	89
Ilustración 79 Modelo CAD inicial del prototipo N°1 del que se parte para el desarrollo del prototipo N°2 (Fuente: Elaboración propia)	90
Ilustración 80 Creación de bocetos para la reconstrucción de la pieza en Solid Edge (Fuente: Elaboración propia).	90
Ilustración 81 Definición de la planta de la pieza en Solid Edge (Fuente: Elaboración propia).	91
Ilustración 82 Boceto del perfil de la pieza en Solid Edge, extraído de la base del prototipo N°1 (Fuente: Elaboración propia).	91

Ilustración 83 Extrusiones en Solid Edge, para obtener la geometría final de la bieleta reconstruida (Fuente: Elaboración propia).	92
Ilustración 84 Bieleta reconstruida, sin agujeros (Fuente: Elaboración propia).....	92
Ilustración 85 Bieleta reconstruida, con agujeros (Fuente: Elaboración propia).	93
Ilustración 86 Propiedades del Aluminio 7075-T6 (Fuente: Elaboración propia).	94
Ilustración 87 Condiciones de contorno aplicadas a la bieleta en Al 7075-T6, según el estado de cargas N°3 (Fuente: Elaboración propia).....	94
Ilustración 88 Condiciones de contorno aplicadas a la bieleta en Al 7075, según el estado de cargas N°3 (Fuente: Elaboración propia).....	95
Ilustración 89 Distribución de tensiones de Von Mises obtenida en la simulación FEM en Al 7075- T6, para el estado de cargas N°3 (Fuente: Elaboración propia).	95
Ilustración 90 Desplazamientos obtenidos en la simulación FEM en Al 7075- T6, para el estado de cargas N°3 (Fuente: Elaboración propia).....	96
Ilustración 91 Fuerzas y articulaciones empleadas para el diseño generativo en Solid Edge (Fuente: Elaboración propia).	97
Ilustración 92 Condiciones de contorno empleadas para el diseño generativo en Solid Edge en la iteración 1 (Fuente: Elaboración propia).	97
Ilustración 93 Reducción del peso en un 17% de masa aproximadamente (Fuente: Elaboración propia).	98
Ilustración 94 Optimización topológica de la bieleta a un 17% de reducción de masa para la iteración 1 (Fuente: Elaboración propia).	98
Ilustración 95 Condiciones de contorno empleadas para el diseño generativo en Solid Edge en la iteración 2 (Fuente: Elaboración propia).	99
Ilustración 96 Reducción del peso en un 24% de masa aproximadamente (Fuente: Elaboración propia).	99
Ilustración 97 Optimización topológica de la bieleta a un 24% de reducción de masa en la iteración 2 (Fuente: Elaboración propia).	99
Ilustración 98 Reducción del peso en un 21% de masa aproximadamente (Fuente: Elaboración propia).	100

Ilustración 99 Resultado final, prototipo N°2. Con una reducción del 21% de masa (Fuente: Elaboración propia).	101
Ilustración 100 Condiciones de contorno aplicadas al prototipo N°2 en Al 7075-T6, según el estado de cargas N°3 (Fuente: Elaboración propia).....	102
Ilustración 101 Mallado de la pieza, previo a la resolución (Fuente: Elaboración propia).	102
Ilustración 102 Distribución de tensiones de Von Mises obtenida en el prototipo N°2 tras la simulación FEM, en Al 7075- T6, para el estado de cargas N°3 (Fuente: Elaboración propia).	103
Ilustración 103 Desplazamientos obtenidos en el prototipo N°2, tras la simulación FEM en Al 7075- T6, para el estado de cargas N°3 (Fuente: Elaboración propia).	104
Ilustración 104 Tensión máxima generada en la pieza (Fuente: Elaboración propia).....	104
Ilustración 105 Defecto generado en el Diseño Generativo (Fuente: Elaboración propia).	105
Ilustración 106 Importación del prototipo N°2 en Altair Inspire (Fuente: Elaboración propia).	106
Ilustración 107 Ajuste de parámetros en la PolyNURB (Fuente: Elaboración propia)....	107
Ilustración 108 Resultados del suavizado del prototipo N°2 en Altair Inspire (Fuente: Elaboración propia).	107
Ilustración 109 Importación del modelo final suavizado a Solid Edge (Fuente: Elaboración propia).....	108
Ilustración 110 Condiciones de contorno aplicadas al modelo final, correspondiente al estado de cargas N°3 (Fuente: Elaboración propia).....	108
Ilustración 111 Mallado del modelo optimizado y suavizado (Fuente: Elaboración propia).	109
Ilustración 112 Error obtenido en la simulación (Fuente: Elaboración propia).	109
Ilustración 113 Propiedades de la bieleta optimizada, sin suavizar (Fuente: Elaboración propia).....	110
Ilustración 114 Propiedades de la bieleta optimizada y suavizada (Fuente: Elaboración propia).....	110

Ilustración 115 Resultados finales, prototipo N°2 suavizado (Fuente: Elaboración propia).	111
Ilustración 116 Proceso de trabajo en Impresión 3D (Fuente: Dept. Fabricación, ICAI). 112	112
Ilustración 117 Características de las impresoras Formlabs (Fuente: Dept. Fabricación, ICAI).....	113
Ilustración 118 Características de la impresora Prusa I3KMK3(Fuente: Dept. Fabricación, ICAI).....	115
Ilustración 119 Características de la impresora Markforged X7 (Fuente: Dept. Fabricación, ICAI).....	116
Ilustración 120Características de la impresora Dynamical tolos DT600+ (Fuente: Dept. Fabricación, ICAI).....	117
Ilustración 121 Características de la impresora HP 580C (Fuente: Dept. Fabricación, ICAI).	119
Ilustración 122 Representación de la simulación aplicada en el software Eiger (Fuente: Elaboración propia).	121
Ilustración 123 Representación de la simulación aplicada en el software Ultimaker Cura (Fuente: Elaboración propia).	122
Ilustración 124Resultados de impresión de la bieleta en bruto en FDM, por la Markforged X7 (Fuente: Elaboración propia).	123
Ilustración 125 Comparativa bieleta original con el modelo impreso (Fuente: Elaboración propia).....	123
Ilustración 126 Representación de la simulación aplicada en el software Ultimaker Cura (Fuente: Elaboración propia).	124
Ilustración 127 Resultados impresión Prototipo N°2 en FDM, por la Prusa I3 MK3 (Fuente: Elaboración propia).	125
Ilustración 128 Resultados impresión Prototipo N°2 tras el postprocesado (Fuente: Elaboración propia).	126
Ilustración 129 Comparativa entre la bieleta original, la bruta y la optimizada (Fuente: Elaboración propia).	127

Ilustración 130 Representación de la simulación aplicada en el software Eiger (Fuente: Elaboración propia).	128
Ilustración 131 Resultados impresión Prototipo N°2 en FDM, por la Markforged (Fuente: Elaboración propia).	128
Ilustración 132 Resultados impresión Prototipo N°2 tras el postprocesado (Fuente: Elaboración propia).	129
Ilustración 133 Comparativa entre la bieleta original y el prototipo N°2 (Fuente: Elaboración propia).	129
Ilustración 134 Resultados de las impresiones por FDM (Fuente: Elaboración propia)...	130
Ilustración 135 Simulación de impresión en el software Preform (Fuente: Elaboración propia).	131
Ilustración 136 Resultados impresión Prototipo N°2 mediante SLA (Fuente: Elaboración propia).	131
Ilustración 137 Proceso de postprocesado en SLA (Fuente: Elaboración propia).	132
Ilustración 138 Curado de la pieza (Fuente: Elaboración propia).	133
Ilustración 139 Resultados impresión Prototipo N°2 tras el postprocesado en SLA. (Fuente: Elaboración propia).	133
Ilustración 140 Comparativa pieza impresa en SLA con el modelo original (Fuente: Elaboración propia).	134
Ilustración 141 Gráfica comparativa entre los costes de fabricación aditiva y tecnologías convencionales (Fuente: EDDM)	135
Ilustración 142 Presupuesto online de fabricación bieleta bruto, en FDM (Fuente: Xometry).	140
Ilustración 143 Presupuesto online de fabricación bieleta optimizada en FDM (Fuente: Xometry).	141
Ilustración 144 Presupuesto online de fabricación bieleta optimizada en SLA (Fuente: Xometry).	141
Ilustración 145 Presupuesto online de fabricación bieleta optimizada en DMLS, Aluminio (Fuente: Xometry).	142

Índice de tablas

Tabla 1 Impresión 3D mediante SLS (Fuente: Dep.Fabricación, ICAI).....	25
Tabla 2 Comparación tecnologías de impresión 3D (Fuente: Elaboración propia).	27
Tabla 3 Comparación estados de cargas (Fuente: Elaboración propia).....	71
Tabla 4 Costes impresoras por SLA (Fuente: Elaboración propia).....	114
Tabla 5 Costes impresoras por FMD (Fuente: Elaboración propia).....	117
Tabla 6 Parámetros a establecer en la impresión (Fuente: Elaboración propia).	121
Tabla 7 Parámetros a establecer en la impresión (Fuente: Elaboración propia).	124
Tabla 8 Parámetros a establecer en la impresión (Fuente: Elaboración propia).	127
Tabla 9 Coste por unidad de Bieleta en Bruto, impresa por FDM (Fuente: Dept.Fabricación, ICAI).....	137
Tabla 10 Costes de servicio de impresión por FDM, con la impresora Markforged (Fuente: BitFAB).	137
Tabla 11 Costes de pedido de impresión por FDM, con la impresora Markforged (Fuente: BitFAB).	138
Tabla 12 Costes de servicio de impresión por SLA, con la impresora Formlabs 3 (Fuente: BitFAB).	139
Tabla 13 Costes de pedido de impresión por SLA, con la impresora Formlabs 3 (Fuente: BitFAB).	139

1. INTRODUCCIÓN

1.1 MOTIVACIÓN DEL PROYECTO

La bieleta de la suspensión trasera de una bicicleta MTB, es un componente esencial para su correcto funcionamiento, la alta exigencia mecánica la hace propensa a fallos y roturas. Su optimización es clave poder mejorar la seguridad, rendimiento y durabilidad de la bicicleta. En la industria del ciclismo, la innovación de diseños, materiales y procesos de fabricación tiene un papel muy importante, este proyecto busca combinar el uso de técnicas avanzadas como la optimización topológica y la fabricación aditiva para desarrollar una versión más eficiente y sostenible. Mejorar el diseño, permite aumentar su vida útil y reducir costes económicos contribuyendo al avance de estas metodologías dentro del sector de la fabricación.

La exigencia de bicicletas cada vez más ligeras y resistentes hace que la optimización estructural de la bieleta sea esencial en el rendimiento del producto final. Este trabajo pretende ofrecer una alternativa innovadora con las tendencias actuales del ciclismo.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GENERAL

Este Trabajo de Fin de Grado, tiene como finalidad abordar de manera integral el diseño, optimización y fabricación de una pieza estructural de una bicicleta mediante herramientas de ingeniería inversa, optimización topológica y fabricación aditiva. En concreto la bieleta de la suspensión trasera de una bicicleta MTB, que es el elemento que vincula el amortiguador trasero con el basculante, sujeto en el cuadro principal.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

El presente Trabajo de Fin de Grado tiene como objetivos específicos los nombrados a continuación:

- Adquisición de conocimientos en el ámbito del diseño generativo y simulaciones, desde la pieza base hasta alcanzar su optimización topológica.
- Adquisición de conocimientos en área de la impresión 3D desde comprender el proceso de fabricación de la máquina hasta programar y fabricar una pieza que cumpla todos los requerimientos solicitados.
- Aplicar técnicas de ingeniería inversa para la obtención del modelo digital de la bieleta original, permitiendo su análisis geométrico y funcional como base para su futuro rediseño y optimizado.
- Evaluación del rendimiento mecánico y funcional de la pieza fabricada a través de ensayos, garantizando que la solución propuesta sea técnicamente viable y satisfaga los estándares de calidad esperados en la industria del ciclismo.
- Promover la sostenibilidad en el diseño y la fabricación, contribuyendo a técnicas más sostenibles, alineados con los objetivos actuales de la reducción de la huella de carbono.
- Contribuir en el avance de las tecnologías emergentes en ingeniería, con el objetivo de que no solo cumpla con los requisitos técnicos, sino que sirva también como inspiración para aplicaciones y enfoques del futuro.

1.3 OBJETIVOS DEL DESARROLLO SOSTENIBLE

Los ODS son un conjunto de 17 metas globales, firmadas por Las Naciones Unidas en el año 2015 con el objetivo de poner fin a la pobreza, proteger el medio ambiente y garantizar la paz para todos antes del 2030. Este Trabajo de Fin de Grado se alinea directamente con varios de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) propuestos por la ONU.[1]



Ilustración 5 Objetivos del desarrollo sostenible (Fuente: ONU)

ODS 4: Educación de calidad: El desarrollo de este proyecto y su accesibilidad, fomenta la formación de los estudiantes en habilidades avanzadas y esenciales para el futuro en el sector industrial. Contribuyendo a una mejor la calidad educativa.

ODS 8: Trabajo Decente y Crecimiento Económico: El proyecto, promueve la implementación de tecnologías avanzadas dando lugar a nuevas oportunidades laborales en sectores tecnológicos y fabricación. Se contribuye al desarrollo económico y a la creación de empleo cualificado.

ODS 9: Industria, Innovación e Infraestructura: El presente TFG interviene en el desarrollo de tecnologías avanzadas como la OT y la fabricación aditiva, incentivando a la innovación. Su aplicación en la industria del ciclismo fomenta la creación de piezas sostenibles y eficientes.

ODS 12: Producción y Consumo Responsables: La empleabilidad de técnicas de optimización e impresión 3D en la cadena de producción y diseño, permite desprendernos de material innecesario y su posible reutilización para futuras piezas.

ODS 13: Acción por el clima: Incentivando el uso de bicicletas a través de su rediseño y alternativas más ligeras da lugar a que el usuario emplee menos esfuerzo para su desplazamiento, considerándolo como una alternativa factible entre otras más

contaminantes. De esta manera, el proyecto apoya las iniciativas globales para terminar con el cambio climático.

ODS17: Alianzas para lograr los Objetivos: La alternativa de la bicicleta y su aumento de usuarios, contribuye al desarrollo de sistemas de transporte más sostenibles en las ciudades, así como reduciendo las congestiones de vehículos y contaminación ambiental y sonora.

2. DESCRIPCIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS

2.1 OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA

La Optimización Topológica es una técnica de diseño estructural que emplea modelos algorítmicos para determinar la distribución óptima de material en una estructura o componente, en un espacio determinado por el usuario bajo una serie de condiciones y cargas. La optimización topológica maximiza el rendimiento y la eficiencia del diseño eliminando el material sobrante de las zonas que no necesitan soportar cargas considerables con el objetivo de reducir peso o resolver desafíos de diseño como reducir la resonancia o esfuerzos térmicos. [2]



Ilustración 6 Ejemplo Optimización Topológica (Fuente:3Dnatives).

Sus raíces se remontan a inicios del siglo XX cuando el ingeniero mecánico australiano Anthony George Maldon Michell formuló teoría sobre la disposición óptima del material en estructuras reticuladas dentro del campo de la elasticidad. No obstante, el desarrollo significativo de esta disciplina no llegó hasta mediados del siglo XX, impulsado por el

avance del Método de los Elementos Finitos (FEM) en los años 50 y 60. Esta herramienta numérica utilizada para resolver problemas físicos complejos que involucran mecánica de sólidos, transferencia de calor, dinámica de fluidos y electromagnetismo entre otros. Se fundamenta en la división de un dominio continuo (una pieza, una estructura, un fluido, etc.) en un número finito de subdominios más pequeños y simples llamados elementos finitos, convirtiéndose en un problema continuo expresado mediante ecuaciones diferenciales parciales, en un problema algebraico que puede resolverse computacionalmente.

Décadas más tarde, con la aparición de algoritmos específicos como el SIMP (Solid Isotropic Material with Penalization) que se discretiza mediante elementos finitos dónde a cada parte de la estructura se le asigna una variable de diseño denominada densidad de material normalizada (ρ_i), que puede variar entre 0 y 1, si esta se aproxima a 0, el elemento se considera como vacío y por tanto eliminado del diseño final; en cambio sí se aproxima a 1 el elemento se mantiene como parte estructural esencial, a lo largo del proceso iterativo, los valores de ρ_i se actualizan con el objetivo de maximizar la rigidez estructural bajo una serie de restricciones como la masa, tensiones máximas, desplazamientos y frecuencias naturales. El algoritmo BESO (Bi-directional Evolutionary Structural Optimization) trabaja con decisiones binarias donde cada elemento de la malla está presente (material) o no (vacío), el algoritmo calcula un índice de sensibilidad para cada elemento, que mide cuánto contribuye a la función objetivo determinando así la selección de los elementos que serán añadidos o eliminados. Ambos algoritmos marcaron un hito en la evolución de la optimización topológica introduciendo un enfoque más sistemático y eficiente para redistribuir el material dentro del dominio de diseño, lo que posibilitó la obtención de configuraciones estructurales innovadoras y altamente optimizadas.

La introducción de tecnologías de fabricación aditiva, especialmente la impresión 3D, ha supuesto un salto cualitativo en la aplicación práctica de la optimización topológica. Gracias a estas técnicas de fabricación, ahora es factible materializar diseños con geometrías complejas, que son inviables con técnicas de fabricación tradicionales, ampliando en los sectores como la aeronáutica o el diseño industrial.

Para la determinación final de la geometría y de si una parte de la estructura permanecerá en el diseño final, dependerá de una secuencia de pasos sistemáticos orientados a encontrar la distribución óptima del material dentro de la estructura.

1. **Definición del espacio de diseño:** Se establece el dominio de diseño en el que se permitirá la redistribución del material. En esta fase se establecen las condiciones de contorno (apoyos, restricciones) y cargas externas que actúan en la pieza. Se definen los límites geométricos dentro de los cuales el algoritmo podrá trabajar para encontrar la solución optimizada.
2. **Discretización del dominio mediante FEM:** El dominio definido previamente, se divide en un número finito de elementos (mallas), facilitando el análisis. A cada elemento se le asigna una variable ρ_i que simboliza la cantidad relativa de material presente en dicho elemento y será el parámetro principal que se optimizará en las siguientes fases.
3. **Formulación del problema de optimización:** Se plantea una función objetivo como pueden ser minimizar la deformación elástica, minimizar la masa total, dependiendo de los objetivos del diseño. En esta fase se incluyen las restricciones del problema como puede ser los límites de desplazamiento, tensiones admisibles o volumen máximo del material permitido.
4. **Iteraciones del algoritmo de optimización:** Se emplean algoritmos iterativos como el SIMP o el BESO mencionados previamente. En cada iteración el algoritmo ajusta la distribución del material modificando los valores de densidad de cada elemento, guiado por la evolución de la función objetivo y las restricciones impuestas previamente.
5. **Evaluación de la convergencia:** A lo largo del proceso iterativo, se evalúa si la solución tiende hacia una configuración óptima que cumpla con todos los criterios establecidos o no. Una vez alcanzada la convergencia, es decir que los cambios entre iteraciones son insignificantes, se detiene el algoritmo y se considera que se ha logrado la solución óptima.
6. **Validación estructural:** El resultado obtenido, se verifica mediante un nuevo análisis por FEM para asegurar que la estructura cumple con los requisitos

mecánicos. Esta validación puede complementarse con pruebas experimentales, si la pieza va a ser fabricada mediante impresión 3D o procesos de fabricación convencionales.

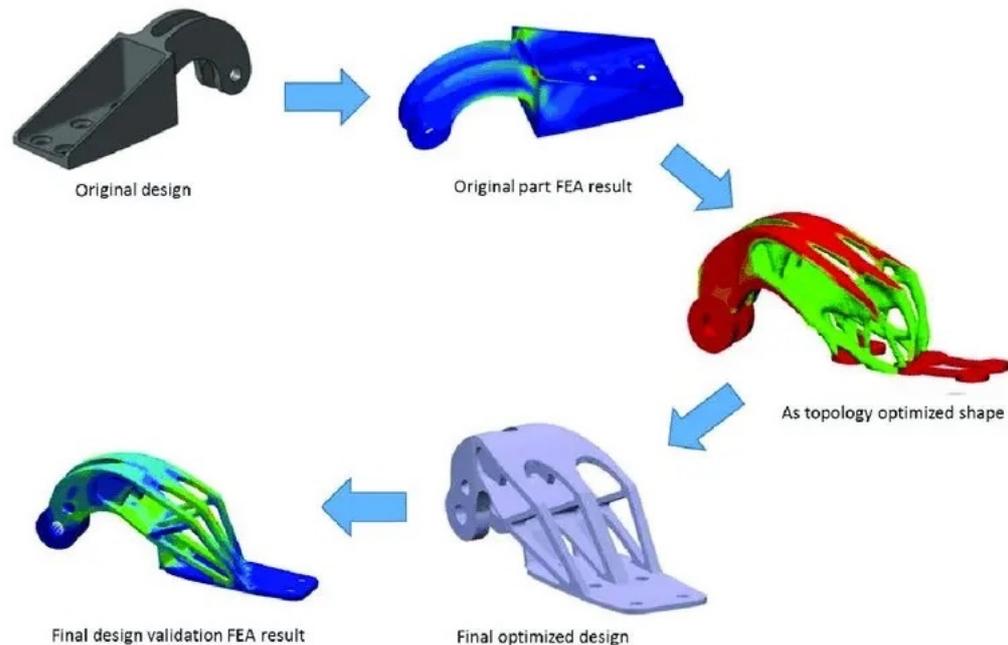


Ilustración 7 Proceso de Optimización Topológica (Fuente, FormLabs).

La optimización topológica proporciona numerosas ventajas. Permite la reducción significativa de peso, eliminando zonas de una pieza que no contribuyen de forma significativa a la resistencia estructural; mejora el rendimiento estructural al concentrar el material en las zonas más solicitadas y eliminarlo de las no necesarias; diseños innovadores y eficientes permitiendo la creación de geometrías orgánicas, complejas e inesperadas de la intuición humana; optimización de recursos y sostenibilidad al reducir los costes de fabricación e impacto ambiental.

Así como sus inconvenientes, son la alta demanda computacional ya que implica procesos iterativos complejos lo que exige elevadas características informáticas como un hardware, un software y tarjetas gráficas especializadas: dificultad de fabricación con procesos tradicionales debido a su geometría compleja dificulta mucho el proceso de mecanizado por técnicas como fresado o moldeo por inyección, lo que obliga a depender de la fabricación aditiva; conocimientos técnicos ya que un mal planteamiento de las condiciones de contorno,

de las funciones objetivo o de las restricciones puede dar lugar a soluciones inviables o no óptimas; aunque las simulaciones numéricas son potentes, los diseños optimizados deben validarse mediante ensayos físicos especialmente cuando están destinados a soportar cargas críticas exigentes.

El futuro de la optimización topológica está directamente relacionado con los avances en la inteligencia artificial, el aprendizaje automático y fabricación avanzada, permitiendo procesos de diseño más rápidos, precisos y accesibles. La integración conjunta de tecnologías digitales con sistemas de fabricación inteligentes facilitará la producción en masa de elementos optimizados.

Algunos de los casos de éxito recientes en la industria incluyen, componentes de aeronaves diseñados para reducir peso sin comprometer la seguridad estructural, y el correcto funcionamiento como puede ser el caso de “Airbus en el Soporte de partición de cabina A320” [3] cuyo resultado fue el de una reducción de peso del 45% tras el rediseño del soporte de la parte trasera del modelo de avión A320, inspirado en estructuras óseas naturales y fabricado mediante impresión 3D en titanio. El caso de general motor en colaboración con Autodesk se rediseño un soporte metálico para el asiento de uno de sus vehículos, se pasó de 8 piezas soldadas a un solo componente impreso mediante 3D un 40% más ligero y un 20% más resistente [4] [5]. El caso de la Nasa, empleando la optimización topológica para sistemas de celosías ligeros y fabricados aditivamente para aplicaciones espaciales [6] y para mejorar el diseño de una estructura de caja de ala representativa para el modelo de investigación común de la NASA [7]. En el sector del ciclismo varias startups han optado por el diseño de cuadros, bieletas y unidades de potencia optimizados topológicamente junto con la impresión 3D [8].

2.2 IMPRESIÓN 3D

La impresión 3D, también conocida como fabricación aditiva, es un proceso de fabricación que permite la creación de objetos tridimensionales mediante la superposición de capas de material, siguiendo las indicaciones de un modelo digital diseñado con anterioridad. A partir de un archivo CAD (Computer-Aided Design), se divide el modelo en secciones horizontales

que se van construyendo capa a capa sobre una plataforma, hasta obtener la pieza final. A diferencia de los procesos de fabricación tradicionales, como el fresado o el mecanizado, donde el material se extrae de un bloque inicial sólido, la fabricación aditiva, agrega material únicamente donde es necesario optimizando el uso de recursos y la producción de geometrías altamente complejas que sería muy complicadas de obtener a partir de otras técnicas.

Su origen se remonta a la década de 1980, cuando Chuck Hull desarrolla la estereolitografía (SLA), un proceso en el que se emplea un láser ultravioleta para solidificar una resina fotosensible capa por capa. Sentando así las bases de la impresión 3D moderna y el inicio de un rápido desarrollo tecnológico en el campo de la fabricación.

El funcionamiento de la impresión 3D comienza con la creación del diseño digital del objeto mediante un software de modelado 3D, como SolidWorks, Fusión 360 o Blender. Este modelo guarda el diseño en formato STL, OBJ, AMF, que describe la geometría del objeto en términos de superficies triangulares. Posteriormente, el archivo digital se procesa mediante un programa “slicer”, que divide el modelo en capas, las cuales son interpretadas por la impresora 3D, que las reproduce físicamente una a una hasta conseguir la pieza final completa.

A continuación, se describen las principales tecnologías de impresión:

-FDM (Fused Deposition Modeling): Modelado por deposición fundida, es la tecnología más común y asequible. Consiste en la extrusión de un filamento termoplástico como PLA, ABS o PETG a través de una boquilla caliente, que funde el material y lo deposita capa por capa sobre una plataforma enfriándose y solidificándose hasta lograr el objetivo deseado, permite un prototipado rápido, modelos funcionales y piezas personalizadas de bajo coste. Destaca en los sectores del diseño industrial, la ingeniería mecánica, educación o arquitectura.

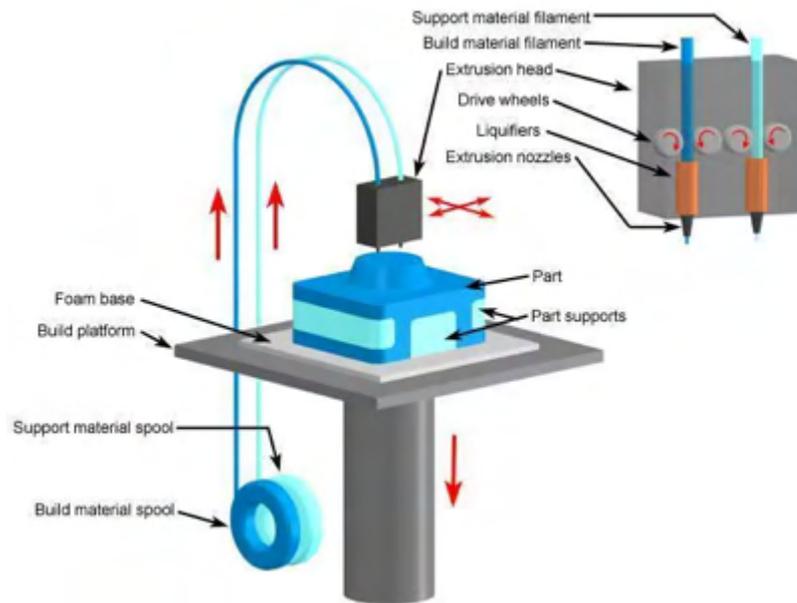


Ilustración 8 Impresión 3D mediante FDM (Fuente: Todo 3D).

-SLA (Stereolithography): Estereolitografía, utiliza una resina líquida que se solidifica mediante una exposición de haz de luz ultravioleta emitida por un láser. Las capas se van curando progresivamente en un tanque de resina. Existe la técnica SLA inversa donde la fuente de luz se encuentra debajo del tanque de resina, permitiendo que el objeto se forme desde abajo facilitando la creación de modelos más grandes y menores tensiones mecánicas durante la separación de capas gracias al uso de fondos flexibles y transparentes. Este sistema se encuentra presente en impresoras de la marca Formlabs [9]. Destaca en los sectores de la medicina y odontología ya que permite obtener modelos dentales y médicos de alta precisión, también en el ámbito de la joyería y la fabricación de moldes de silicona.

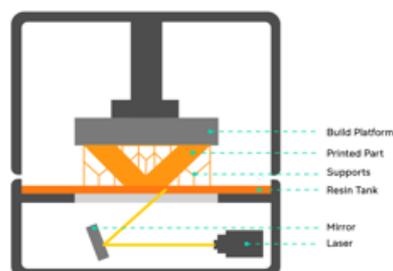


Ilustración 9 Impresión 3D mediante SLA (Fuente: UNSW Making).

-SLS (Selective Laser Sintering): El sintetizado selectivo por láser consiste en la fusión de polvo termoplástico como la poliamida o TPU mediante un láser de alta potencia. El láser sinteriza el polvo según las capas del diseño digital, y la plataforma baja para añadir capas nuevas. Este método no requiere de estructuras de soporte, ya que el polvo circundante actúa como soporte natural. Se obtienen series corta de producción y prototipos funcionales resistentes. Destaca en los sectores de la automoción, fabricación industrial, robótica.

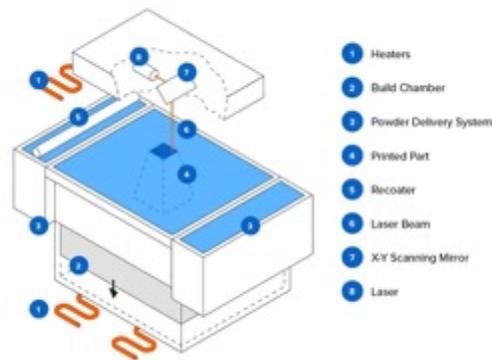


Ilustración 10 Impresión 3D mediante SLS (Fuente: Formlabs).

Se recogen en la siguiente tabla las propiedades mecánicas y térmicas de estas tres tecnologías de impresión 3D.

PROPIEDAD	NORMA	TECNOLOGÍAS DE PROTOTIPADO MATERIALES HABITUALES			
		SLA	SLS	FDM	
		Next	PA 12	ABS	ABS+
Módulo de tracción (MPa)	ASTM D638M DIN EN ISO 527	2370-2490	1650	1627	1915
Resistencia a la tracción (MPa)	ASTM D638M DIN EN ISO 527	31-35	48	22	37
Alargamiento a la rotura (%)	ASTM D638M DIN EN ISO 527	8-10	20	6	4,4
Módulo de Flexión (MPa)	ASTM D790M DIN EN ISO 178	2415-2525	1500	1834	1917
Resistencia a la flexión (MPa)	ASTM D790M DIN EN ISO 178	68-71	-	41	62
Resistencia al impacto (J/m)	ASTM D256 DIN EN ISO 180	47-52	53	107	96.4
Temperatura deformación bajo carga (°C)	ASTM D648	48-57	86	76-90	73-86

Tabla 1 Impresión 3D mediante SLS (Fuente: Dep.Fabricación, ICAI).

Otras tecnologías destacadas son: IJP (Inkjet Printing) Impresión por Inyección de tinta, que utiliza cabezales similares a los de una impresora 2D, de depositan gotículas de fotopolímero capa a capa, curadas con luz negra. Se emplea en bioprinting y fabricación de microcomponentes. DMLS (Direct Metal Laser Sintering) y SLM (Selective Laser Melting) ambas tecnologías trabajan con polvos metálicos, la primera no llega a fundir el metal en cambio la segunda sí que trabaja con el metal completamente fundido. Se usan en la fabricación directa de piezas metálicas complejas con alta resistencia. Jetting (Material Jetting) muy similar a IJP depositando gotas de material fotopolimérico con precisión y permite obtener piezas multicolores y con diferentes propiedades en un único proceso. EBM (Electron Beam Melting), similar a SLM solo que se emplea un haz de electrones en vez de un láser para fundir el polvo metálico en una cámara de vacío. Es ideal para titanio y aleaciones especiales. 3DP (Three-Dimensional Printing) Impresión 3D por inyección de agente aglutinante, fue desarrollada por el MIT donde un cabezal deposita un agente aglutinante sobre capas sucesivas de polvo (yeso, arena o compuestos cerámicos), uniendo

las partículas según el modelo digital. Posteriormente requieren de infiltración con resinas u otros compuestos para mejorar sus propiedades mecánicas. Y por último la tecnología HP Multi Jet Fusion (MJF) desarrollada por HP combina SLS e IJP y emplea como polvo como material de fabricación.

Una vez completada la impresión es necesario un post-procesamiento que puede basarse en un lavado del modelo con alcohol para eliminar restos de resina no curada, retirada manual de material de soporte sobre la pieza o una etapa de curado adicional bajo luz negra para garantizar la resistencia mecánica y estabilidad dimensional de la pieza. Hay que mencionar que para la correcta sujeción de la pieza durante el proceso de fabricación se emplean estructuras de soporte para sostener salientes o zonas en voladizo construidas propiamente durante el proceso de fabricación de la pieza. Estos soportes deben retirarse cuidadosamente posteriormente en el post-procesado.

Tecnología	Principio de funcionamiento	Materiales utilizables	Calidad y precisión	Post-Procesado	Aplicaciones principales
FDM	Extrusión de filamento termoplástico capa por capa	Termoplásticos (PLA, ABS)	Media	Retiro de soportes, lijado	Prototipado rápido, piezas funcionales, educación.
SLA	Fotopolimerización con láser sobre resina líquida	Resinas líquidas fotosensibles	Muy alta	Lavado, curado UV	Odontología, joyería, ingeniería de alta precisión, moldes.
SLS	Fusión de polvo láser sin aglutinante	Polvos plásticos (Nylon, PA12)	Alta	Limpieza de polvo	Producción de piezas funcionales, prototipos mecánicos
DMLS/SLM	Fusión selectiva de metal en polvo mediante láser	Polvos metálicos (Aluminio, Titanio)	Muy alta	Tratamiento térmico	Aeroespacial, medicina, automoción, industria pesada.

EBM	Fusión de polvo metálico por haz de electrones en vacío	Titanio, cobalto-cromo	Alta	Tratamiento térmico	Prótesis médicas, implantes, aeroespacial.
IJP (Inkjet)	Proyección de fotopolímero curado por luz o aglutinante sobre polvo	Resinas o polvos con aglutinante	Alta	Curado o infiltrado	Modelos a color, diseño conceptual
PolyJet / Jetting	Inyección de fotopolímero con curado de UV	Resinas fotosensibles	Muy alta	Lavado, curado UV	Prototipado visual, modelos multicolor o multilateral
3DP	Inyección de aglutinante sobre polvo (yeso, creámica...)	Yeso, compuestos cerámicos, arena	Media	Infiltrado con resina	Prototipos a color, arquitectura, fundición, arte.
MJF (HP)	Agente de fusión más calor sobre polvo polimérico	Nylon (PA11, PA12), TPU	Alta	Limpieza de polvo	Piezas finales, producción en serie, carcasas.

Tabla 2 Comparación tecnologías de impresión 3D (Fuente: Elaboración propia).

Respecto de los criterios de diseño para la impresión 3D, debemos de tener en cuenta una serie de consideraciones previas para la correcta obtención de las piezas. Así como el espesor de la pared, es decir, la distancia entre dos caras opuestas en el modelo 3D. En tecnologías como FDM, se recomienda mantener un espesor mínimo de 1mm para asegurar la solidez estructura de la pieza, ya que un grosor insuficiente puede comprometer la integridad del modelo y aumentar la probabilidad de fallos durante la impresión.

La orientación de la pieza en la impresión y el acabado superficial están directamente relacionados. Las capas generadas durante la impresión crean líneas visibles (efecto escalera), por lo que es crucial orientar las caras visibles del modelo de forma estratégica para mejorar su acabado.

La fabricación aditiva tiene un comportamiento anisotrópico, así como la variación de las propiedades de un material o estructura en función de la dirección en que se miden, donde las zonas que crecen paralelas a la base de impresión suelen ser más propensas a fracturarse, por lo que es recomendable evitar elementos finos o delicados estén orientados en esa dirección si requieren soportar carga.

La precisión dimensional depende de la tolerancia de la impresora, del material y la tecnología empleada, en general se admite una tolerancia media de $\pm 0,1$ % con una desviación mínima de $\pm 0,1$ mm.

Debido a que las piezas se fabrican capa por capa sobre una plataforma, las secciones del modelo con voladizos o ángulos menores a 45° con respecto a la base, necesitan estructuras de soporte, ya que podría llegar a colapsar sin apoyo durante la fabricación. Es importante tener en cuenta que pueden quedar señales del material de soporte sobre la propia pieza. La base ha de ser estable para evitar deformaciones durante la impresión, siendo la superficie inferior más rígida debido al contacto directo con la plataforma base.

Cuando se diseñan mecanismos con partes móviles o ensamblajes integrados, es recomendable dejar un espacio mínimo de 0,4 mm entre componentes para permitir el movimiento sin fricción excesiva. Para aquellos que requieren montaje o ensamblaje posterior, es recomendable dejar al menos 0,3 mm entre las piezas a unir, facilitando el correcto acoplamiento.

Para que los textos o elementos decorativos sean claramente visibles, se deben emplear para las letras grabadas al menos 1 mm de grosor de línea con una profundidad mínima de 0,3 mm. En cambio, para aquellas con relieve, un grosor de línea de 2,5 mm y una profundidad mínima de 0,5 mm.

El proceso de fabricación 3D conlleva unos costes fijos y otros variables que dependen del material utilizado, tecnología de impresión, tiempo de impresión, postproceso, complejidad del diseño y costes de mantenimiento y equipos. En la siguiente tabla, queda registrado un análisis de costes básico para prototipado de piezas en impresora 3D realizado por la Universidad Pontificia Comillas. No obstante, se realizará un estudio detallado de los costes dentro del proceso de fabricación mediante impresión 3D para los prototipos diseñados.

ANÁLISIS DE COSTES PARA PROTOTIPADO DE PIEZAS EN IMPRESORA 3D		
DATOS AMORTIZACIÓN MÁQUINA		
Precio máquina (€)		25.000
Coste mantenimiento anual (€)		2.900
Años de amortización		4
Amortización (h/año) - 223 días-año / 12 horas-día		2600
Precio Hora máquina-amortización (€/h)		3,24
Precio Hora venta-público (€/h)		3,24
DATOS COSTE MATERIAL		
Coste material modelo: filamento abs (€/cc) (271€-950 cc)		0,23
Coste material soporte: filamento acrílico (€/cc) (271€-950 cc)		0,23
Coste material bandeja (€/Ud.): (100€-24 uds.)		4,17
DATOS COSTE TÉCNICO ANALISTA		
Coste técnico analista del modelo - inc. desmoldeo (€/h)		20
DATOS TÉCNICOS DE DEPOSICIÓN		
Tipo de modelo	Malla	Sólido
Tasa de deposición (cc/h)	11	16
Precio hora máquina-deposición (€/h)		
PIEZA ideal_maxilar- Orientación HORIZONTAL		
CONCEPTOS PRESUPUESTADOS	Opción Sólido	Costes parciales
Material modelo (cc)	65,34	15,03 €/ud
Soporte modelo (cc)	3,42	0,79 €/ud
Tiempo modelo (h)	4,34	14,06 €/ud
Piezas por bandeja (ud)	1,00	4,17 €/ud
Tiempo técnico-analista (h)	0,15	3,00 €
Cantidad de piezas	1,00	
Coste unitario (€) en ICAI + IVA	37,04 €/Ud	
Coste total (€) en ICAI + IVA	37,04 €	

Ilustración 11 Costes de impresión 3D (Fuente: Dep.Fabricación, ICAI).

Son muchas las ventajas que ha supuesto el desarrollo de la impresión 3D, la capacidad de personalización permitiendo fabricar piezas completamente adaptadas a las necesidades del individuo; reducción de costes en la producción de prototipos o tiradas cortas ya que no depende de moldes o herramientas específicas; rapidez en el desarrollo, el proceso desde que se tiene la idea hasta que se crea el modelo digital y se fabrica es reducido en comparación otros métodos tradicionales; contribuye a la sostenibilidad y la eficiencia reduciendo considerablemente el desperdicio de material, usando solo la cantidad exacta necesaria para construir el elemento.

No obstante, esta tecnología también presenta ciertas limitaciones, a pesar de los avances recientes, los materiales disponibles son más reducidos que en los procesos tradicionales, y en muchos casos no se alcanzan las mismas propiedades mecánicas, térmicas o químicas. También, la calidad superficial de estas suele requerir un postproceso adicional para mejorar el acabado ya sea eliminar soportes o incrementar la resistencia. Generalmente, aunque a

largo plazo puede ser económica, la inversión inicial en impresoras industriales y materiales técnicos sigue siendo elevada, lo que puede suponer una barrea para algunas empresas.

En la actualidad, son muchos los sectores que han dado un gran salto gracias a la fabricación aditiva, algunos de los ejemplos más actuales en cada industria pueden ser:

En el sector de la automoción, empresas como Stellantis han implementado estrategias para integrar la fabricación aditiva en sus procesos de producción [10]. En la moda y diseño industrial destaca CUPRA Desing House que exploran desde el rediseño de productos cotidianos hasta prendas de vestir o mobiliario [11]. Sobre la medicina y la salud, son muchas las creaciones de dispositivos médicos e implantes. La famosa startup Akira Science, fundada por el ingeniero químico Álvaro Morales, está desarrollando implantes mamaros biodegradables mediante impresión 3D, diseñados para regenerar el tejido de forma natural y ofreciendo una alternativa menos invasiva que los implantes de silicona [12]. La creación de sandalias personalizadas con plantillas impresas en 3D por la empresa Podoactiva, diseñada para ofrecer soporte y comodidad en condiciones de calor o de recuperación para deportistas [13]. En el ámbito de la odontología es común la creación de coronas, puentes y dentaduras postizas personalizadas con alta precisión, adaptándose perfectamente a la morfología del paciente [14].

En conjunto, estos ejemplos recientes evidencian el amplio alcance de la fabricación aditiva en la actualidad, consolidándose como una herramienta estratégica ahora abordar desafíos técnicos, mejorar la eficiencia de procesos y ofrecer soluciones altamente personalizadas. Su integración con la optimización topológica y la digitalización industrial la sitúan como un pilar fundamental en el desarrollo de la ingeniería del futuro.

2.3 INGENIERÍA INVERSA

La ingeniería inversa es una metodología que consiste en descomponer, analizar y estudiar un producto ya existente con el objetivo de entender su diseño, estructura, funcionamiento y características. A diferencia de procesos de diseño tradicionales, donde se parte de una idea para llegar a un objeto final, en la ingeniería inversa se realiza al revés, permite digitalizar una pieza física para reproducirla, mejorar o adaptarla a nuevos contextos.

En la industria manufacturera, la ingeniería inversa desempeña un papel crucial en diversas áreas y tiene una serie de aplicaciones importantes. La mejora de diseño de producto, con la ingeniería inversa se puede analizar en detalle productos ya fabricados, lo que permite rediseñar componentes existentes o desarrollar nuevas versiones optimizadas, adaptadas a las exigencias actuales del mercado o necesidades específicas del usuario. En la reparación y el mantenimiento, son muchas las ocasiones en las que la maquinaria es antigua o los equipos están descatalogados y la documentación técnica puede no estar disponible, la ingeniería inversa te permite digitalizar y reconstruir piezas para su mantenimiento o sustitución alargando la vida útil de estos y minimizando costes. En la innovación y desarrollo de productos, esta metodología juega un papel crucial, al analizar y comprender los productos ya existentes, pueden surgir nuevas ideas, mejoras o enfoques diferentes a las piezas originales.

El proceso de ingeniería inversa sigue las siguientes etapas:

1. Captura de datos: Se emplea tecnología de escaneado 3D (escáneres láser) para obtener una nube de puntos que representa la superficie del objeto.
2. Reconstrucción digital: A partir del mallado, se genera un modelo tridimensional, en formato CAD que puede ser manipulado, editado y analizado por programas de diseño digital como Solid Edge, SolidWorks...
3. Análisis y rediseño: Con el modelo ya disponible, es posible estudiar sus características geométricas, tolerancias, materiales y propiedades funcionales e incluso realizar modificaciones para mejorar su rendimiento.
4. Fabricación: El modelo rediseñado se procede a fabricar nuevamente según el método que más se adapte a sus características y su futuro funcionamiento, por ejemplo, mediante impresión 3D, fundición, arranque de material, procesos de deformación en frío o caliente.



Ilustración 12 Ejemplo de aplicación de la Ingeniería Inversa (Fuente: Sicnova).

Algunos de los casos más representativos en la actualidad es del Tesla Roadster, cuyo desarrollo inicial se basó en la aplicación de la ingeniería inversa sobre el chasis del Lotus Elise, analizando en profundidad su estructura y comportamientos dinámicos para adaptarlo e integrarlo en su propio sistema de propulsión eléctrica, lo que permitió reducir tiempo y costes en las primeras fases del proyecto [15]. Destaca el caso del derribo de un caza furbí F-117 Nighthawk durante la guerra de Kosovo en 1999. Ingenieros aplicaron ingeniería inversa sobre los restos del avión para comprender su tecnología de sigilo, con el objetivo de replicar o contrarrestar sus capacidades en futuros desarrollos militares [15]. En el caso del ciclismo, la ingeniería inversa, se aplica para mejorar y personalizar componentes, destaca el estudio realizado por la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, donde se escaneó en 3D el “stem” (potencia o tija de manillar) de una bicicleta de montaña para analizar su diseño y funcionalidad desarrollando posteriormente un modelo tridimensional optimizado adaptado a las necesidades específicas de los ciclistas [16].

3. ESTADO DE LA CUESTIÓN

3.1 CONTEXTO HISTÓRICO

Hace 200 años, en el Gran Ducado de Baden, Karl Drais probó la "máquina para correr" que acababa de inventar. Esto fue el 14 de junio de 1817. Durante el siglo XIX, la máquina evolucionó de diversas formas y se transformó en lo que conocemos actualmente como bicicleta [17].

En la antigüedad existen indicios de el uso de ruedas unidas por una barra como medio de transporte. Se debe retroceder a el Antiguo Egipto donde se pueden encontrar jeroglíficos ubicados en el obelisco de Luxor, datados a cerca del año 1300 a.C. representando a un hombre sentado sobre una barra acoplada a dos ruedas. De la época romana, se han hallado frescos que muestran vehículos con un diseño similar a lo que hoy en día es conocido como la bicicleta, cabe añadir que Leonardo Da Vinci esbozó varios diseños de máquinas que incluían estructuras similares a esta. Aunque el concepto de la bicicleta estaba presente, no fue hasta siglos XVII y XIX que se comenzaron a realizar avances significativos en el diseño y funcionalidad. En el año 1861 inventores franceses, añadieron los primeros pedales ubicados sobre la rueda delantera que por aquel entonces era de mayor tamaño que la trasera proporcionando mayo riesgo e inestabilidad al usuario. Para el 1885 el británico Jhon Starley Kemp, desarrolló la conocida Rover Safety Bicycle, formada por dos ruedas del mismo tamaño, cadena, pedales sobre la rueda trasera, bielas y cuadro estilo rombo.



Ilustración 13 Evolución de las bicicletas (Fuente: CicloMag).

Desde entonces, la bicicleta ha seguido evolucionando gracias a procesos de investigación y el desarrollo de nuevas tecnologías, con el objetivo de crear modelos más eficientes, seguros y atractivos al usuario. Los avances tecnológicos han mejorado tanto la calidad de los materiales como la estructura optimizando su funcionalidad y reduciendo el esfuerzo necesario para desplazarse en ella. Hasta convertirse en lo que conocemos hoy en día, como unas auténticas obras de ingeniería.



Ilustración 14 Specialized (Fuente: IBKsport).

3.1.1 TIPOS DE BICICLETAS

En la actualidad, existen diferentes tipos de bicicletas diseñadas para responder ante diferentes tipos de vías, características, exigencias y usuarios.

La clasificación de bicicletas que podemos encontrar en la industria ciclista son: bicicletas urbanas, de montaña, de carretera, plegables, eléctricas, híbridas, de pista, acrobáticas, handbikes y bicicletas tándem.

Dentro de las bicicletas de montaña se puede definir un subgrupo dependiendo de las diferentes modalidades o disciplinas que se pueden aplicar hoy en día dentro de esta rama del ciclismo de montaña. Cada tipo de bicicleta se adapta a un estilo de conducción, terreno y exigencia técnica distinta [18].

-Cross Country (XC): Se desarrolla en circuitos mixtos, donde predominan tramos de subida y bajada con poco desnivel técnico, pero con elevada exigencia física. El objetivo de esta modalidad es una buena eficiencia de pedaleo, por lo que los elementos de la bicicleta se configuran para lograr el mejor rendimiento en ascensos y tramos llanos.

Engloba bicicletas más tradicionales y destinadas al uso recreativo, pueden ser rígidas, con suspensión delantera de 100 mm o de doble suspensión de recorrido corto en la trasera, unos 90 mm aproximadamente con amortiguadores de aire y sistema de bloqueo manual para regular la técnica de pedaleo. Respecto de la geometría, buscan cuadros ligeros fabricados de carbono o aluminio, buscando la agilidad en curva con ángulos de dirección en torno a 68° y para mejorar la tracción un ángulo de tubo de sillín de 75°. La transmisión es monoplato de 12 velocidades, frenos de disco y ruedas de 29'' con neumáticos de ancho reducido y tijas telescópicas. Dentro del Cross Country, se distinguen XCO (competición explosiva en circuito), XCM (maratones de larga distancia) y Downcountry, los cuales por lo general emplean los mismos elementos a excepción de los neumáticos.



Ilustración 15 Bicicleta Cors Country, Specialized S-Works Epic 8 (Fuente: Specialized).

-Trail: Se trata de una modalidad intermedia entre el Cross Country y el All mountain, que te permite disfrutar del entorno, abarcando desde pistas hasta senderos técnicos. Se requiere de una bicicleta versátil, capaz de ascender con eficiencia y proporcionar seguridad en los descensos a la vez que diversión.

Su geometría se caracteriza por el uso de doble suspensión con recorrido aproximado de 120, 150mm de horquilla y en la trasera, amortiguadores entre 110 y 130 mm de aire. El cuadro de carbono o aluminio tiene geometrías muy agresivas, un ángulo de dirección más relajado, entre 66° y 68° mejorando el control en las bajadas; ángulo de tubo del sillín más vertical,

entre 73° y 75° para ayudar en las subidas. La transmisión consta de un monoplato de amplio rango, frenos potentes con discos de 180 mm y ruedas de 27.5'' o 29'' para hacer frente a terrenos más escarpados y rocosos.



Ilustración 16 Bicicleta Trail, Specialized S-Stubjumper 15 Evo (Fuente: Specialized).

-All Mountain (AM): Es un salto de nivel en cuanto a las subidas y descensos técnicos, prioriza la polivalencia, con un enfoque más orientado al descenso que el Trail, pero sin llegar al Enduro. Estas características, determinan su geometría con doble suspensión de recorridos muy amplios y ajustables entre 140 y 160mm para ser capaces de absorber obstáculos como raíces, rocas y escalones con solvencia. A nivel de diseño, el ángulo de dirección está sobre los 65°-66°, y el ángulo de tubo del sillín entre 75°-77°, cuadros de aluminio o carbono, frenos de cuatro pistones y discos de mayor tamaño (mínimo 180mm en ambas ruedas) y ruedas de la misma gama que las empleadas en trial.



Ilustración 17 Bicicleta All Mountain, Rockrider 700s (Fuente: Decathlon).

-Enduro: Es una de las disciplinas más exigentes dentro del MTB, combina largos ascensos con descensos agresivos y técnicamente exigentes, recorridos que pueden superar los 40km y más de 1000m de desnivel. El Enduro ha alcanzado niveles de competición, cuyo objetivo es conseguir completar los recorridos en el menor tiempo posible, aportando emoción y adrenalina al deporte. Para ello se requieren bicicletas con resistencia en descensos rápidos y técnicos a la vez que asegurar el control sobre la bicicleta, por lo que se emplean suspensiones en ambas ruedas de largo recorrido 160-180mm con sistemas hidráulicos complejos para ajustar la compresión, rebote o bloquear el sistema en tramos de ascenso.

Sobre la geometría el ángulo de dirección es más lanzado que en el All Mountain, entre 63° y 65° proporcionando más velocidad, el tubo del sillín (con tija telescópica) se mantiene prácticamente vertical a unos 77° para mantener una buena posición durante la bajada. Los cuadros son de aluminio reforzado o fibra de carbono, transmisión monoplato con 11 o 12 velocidades, frenos de disco de 200mm y ruedas robustas de 27.5'' o 29'' reforzados para evitar pinchazos.



Ilustración 18 Enduro, Specialized Enduro Pro (Fuente: Specialized).

-Downhill (DH): Es una modalidad de MTB enfocada únicamente en los descensos por circuitos muy técnicos, con saltos raíces, pendientes pronunciadas. En esta rama, no se pedalea en subida, por lo que la prioridad es la estabilidad, resistencia y absorción de impactos. Estas bicicletas están diseñadas para ofrecer el máximo control en altas velocidades y terrenos agresivos, de ahí de nuevo el uso de suspensiones de muy largo recorrido entre 200 y 220mm tanto en la horquilla como en el amortiguador trasero, que en

este caso es de muelle en vez de aire. Las transmisiones, a diferencia del resto, son de corto rango con cambios más pequeños y casetes reducidos, ya que no necesitan subir, y frenos de disco de alta potencia ($\leq 200\text{mm}$). El cuadro, tiene geometrías muy agresivas, con ángulo de dirección de 63° , fabricado de aluminio o carbono, las ruedas, pueden ser ambas de 27.5" o combinaciones donde la delantera es de 29" y la posterior de 27.5". En esta modalidad se requiere un nivel técnico avanzado y por eso es necesario un equipamiento de protección integral (casco, corazas, chalecos, protectores...).



Ilustración 19 Bicicleta Downhill, Specialized Demo Race (Fuente: IBKsport).

-Freeride o Dirt Jump: La modalidad más y acrobática del MTB, donde destaca la habilidad técnica del ciclista para realizar saltos, trucos y maniobras en el aire. No hay reglas, cada ciclista tiene completa libertad a la hora de afrontar saltos y circuitos. Aunque comparten la gran mayoría de aspectos, el freeride, se centra más en descensos agresivos con grandes saltos y terrenos adaptados, mientras que el dirt jump se practica en circuitos de tierra con rampas diseñadas para el despegue y aterrizaje.

Se emplean bicicletas con cuadros de bicicletas reforzados en aluminio o acero cromado debido a su alta resistencia estructural y absorción de impactos. En el caso de freeride, son bicicletas de doble suspensión con recorridos largos en torno a 180mm y las enfocadas en dirt jump, son mono suspensión (horquilla delantera) con recorridos entre 100 y 140mm buscando la absorción del impacto en el aterrizaje. Las ruedas son generalmente de 26 pulgadas, más manejables para el aire y las acrobacias, pero sin dibujo excesivo y frenos

habitualmente con discos hidráulicos que permitan una respuesta rápida. El sistema de transmisión esta lo más simplificado posible, con uno o pocos piñones, ya que la prioridad no es la velocidad sino en la fiabilidad en el momento del truco o el salto.



Ilustración 20 Bicicleta Freeride/Dirt Jump, SRadio Bike (Fuente: Skatepro).

-E-MTB: Las bicicletas de montaña eléctricas, incorporan un motor eléctrico que asiste el pedaleo, lo que permite afrontar subidas exigentes o rutas más largas empleando menos esfuerzo físico. Estos motores suelen ubicarse en el eje del pedalier, garantizando una mejor distribución del peso y una sensación del pedaleo más natural. Las baterías normalmente son de litio, en términos técnicos, voltajes comprendidos entre 36 y 48 voltios, intensidad entre los 10 y 20 Amperios-hora, lo que se traduce en una potencia de 400-700 Vatios-hora, lo que proporciona una autonomía de 40 a 120 Km. Los cuadros están diseñados para soportar el peso extra de la batería y suelen contener geometrías más relajadas y suspensiones de largo recorrido debido al aumento de masa.

Ofrecen una experiencia divertida, permitiendo explorar terrenos técnicos sin limitarse por la condición física.



Ilustración 21 Bicicleta E-MTB, Specialized Turbo Levo 4 (Fuente: Specialized).

-Fat Bikes: Empleadas en características de terrenos con muy baja tracción, como: arena, barro, nieve o suelos blandos. Donde una bicicleta convencional pierde eficiencia o directamente no puede avanzar. Su característica principal es el uso de ruedas extra anchas, normalmente con neumáticos de entre 3.8 y 5 pulgadas, montados sobre llantas de gran anchura, aumentando la superficie de contacto con el terreno. Además, los neumáticos suelen estar inflados a presiones muy bajas, sobre 0.5 y 1 bar para adaptarse mejor a las imperfecciones del terreno, actuando como sistema de suspensión pasiva. La geometría está diseñada para mantener la maniobrabilidad, aunque suelen ser más pesadas y menos ágiles que las mencionadas previamente. Son empleadas por ciclistas aventureros y exploradores.



Ilustración 22 Bicicleta Fat Bike, Surly (Fuente: Imfixies).

3.1.2 COMPONENTES MTB

Una bicicleta estilo MTB, de doble suspensión, está compuesta de los siguientes elementos:



Ilustración 23 Componentes MTB (Fuente: Restless Bike).

3.1.2.1 Cuadro:

Es un componente indispensable en una bicicleta. Forma el núcleo estructural de la bicicleta, interconectando el resto de los componentes, la parte frontal conecta con la horquilla delantera, la parte central va unida a la transmisión y la parte posterior con la suspensión trasera si precisa de esta. Sus características se basan en proporcionar resistencia al conjunto, absorber impactos y soportar grandes esfuerzos, a su vez, su diseño y geometría influyen directamente con el comportamiento dinámico de la bicicleta, interviniendo en la estabilidad y la eficacia del pedaleo. Existen gran variedad de materiales empleados para la fabricación de cuadros de bicicletas de montaña: aluminio, empleado por su ligereza, rigidez y coste accesible, es el más común en MTB. Acero, destaca por su resistencia a la fatiga y gran capacidad de absorción de vibraciones, aunque presenta un mayor peso. Fibra de carbono, proporciona una excelente relación peso-rigidez siendo extremadamente ligero y resistente,

empleado en bicicletas de alto rendimiento, de coste elevado. Titanio, combina durabilidad, confort y adaptabilidad, siendo su coste bastante elevado lo que da lugar a modelos de gama alta.

3.1.2.2 Horquilla

Componente encargado de unir la rueda delantera mediante un eje pasante y por otra parte con la dirección del cuadro, permitiendo la dirección y la absorción de impactos. Existen de dos tipos, horquillas rígidas y la horquilla de suspensión, dependiendo de la modalidad y función de la bicicleta. En área del ciclismo de montaña, emplean horquillas con suspensión, diseñadas para disipar la energía generada por las irregularidades del terreno, mejorando el control y la comodidad del ciclista.

Las horquillas de suspensión están compuestas por dos barras que deslizan dentro de las botellas a través de retenes y casquillos, permitiendo su compresión y extensión. Su recorrido puede variar entre 80 y 200 mm generalmente, dependiendo de la modalidad (Cross country, Trail, Enduro, Descenso, etc.). El diámetro de las barras también varía según la robustez necesaria y el tipo de fabricante, influyendo en la rigidez y precisión del sistema. La fijación de la horquilla al cuadro se realiza a través de la potencia, que conecta el tubo de la dirección del manillar, pasando por la pipa de dirección del cuadro.

3.1.2.3 Ruedas

Esenciales para el funcionamiento de la bicicleta, se encargan de soportar el peso del ciclista, siendo estas el único punto de contacto con el terreno. Están formados por las llantas, los radios, el buje y los neumáticos. El diámetro de las ruedas puede variar dependiendo del modelo, estilo y funcionalidad de la propia bicicleta, en MTB el rango de los diámetros empleados está entre 27.5'' y 29'', pudiendo variar estas medidas entre la rueda delantera y la trasera en casos puntuales. En cuanto a la anchura de los neumáticos, también existe una gran variedad, entre 1.9'' y 2.5''. Atendiendo a diferentes características en cuanto a la maniobrabilidad, aceleración, superación de obstáculos. El conjunto de tipo de neumáticos, anchura, dibujo y presión del inflado determinan al agarre y la tracción frente a terrenos.

3.1.2.4 Frenos

Sistema imprescindible en una bicicleta de montaña cuya función es de garantizar la seguridad y el control del ciclista. El sistema de frenado ha experimentado una evolución constante en términos de diseño y tecnología [19]. Existen dos tipos: los comunes frenos de llanta conocidos como “V-Brake”; los frenos de disco, los cuales pueden accionarse mecánicamente mediante cable o hidráulicamente mediante fluido, han ganado popularidad en las últimas décadas, siendo estos los más empleados por bicicletas de montañas gracias a su superior capacidad de frenado en condiciones extremas. Además de estos dos sistemas convencionales, existe el frenado por retención, característico de bicicletas de piñón fijo (“fixies”), en las que la transmisión está directamente vinculada al movimiento de la rueda trasera. Los principales fabricantes de frenos de bicicletas son: Shimano, Scram, Hayes Bicycle Group y Magura [20].

3.1.2.5 Sistema de Transmisión

Conjunto de componentes encargado de transformar la energía generada por la fuerza aplicada del ciclista sobre los pedales hacia las ruedas logrando un movimiento y velocidad. Incluye los pedales, las bielas, los platos, la cadena, el cambio trasero, el cambio delantero y la cadena. La fuerza recae sobre los pedales, conectados las bielas por sus extremos, estas tienen acoplados un plato dentado, que conecta gracias a la cadena, con los piñones dentados de la rueda trasera, transmitiendo el movimiento de la cadena a la rueda trasera. En las MTB actuales, predomina el uso de un monoplato, con el objetivo de ahorrar peso, espacio y mantener la sencillez del mecanismo, garantizando un amplio rango de desarrollo gracias a el cambio trasero con los casetes que oscilan entre los 10 y los 51 dientes lo que equivale a unas 12 velocidades manejado a través de un gatillo en el manillar a través de un cable, para poder adaptarse a las adversidades del ciclismo montañoso.

3.1.2.6 Manillar y dirección

Elemento que permite al ciclista controlar la dirección y el equilibrio de la bicicleta. Va unido al cuadro a través de la potencia y el sistema de dirección “headset”, puede variar el ancho, forma y ángulo. En el caso de bicicletas de montaña, este suele ser más ancho de lo

normal, lo cual mejora la estabilidad y facilita el control en zonas más técnicas. Los materiales de fabricación pueden ser diversos como el aluminio, acero, titanio o fibra de carbono.

3.1.2.7 Sillín y Tija

Punto de contacto entre ciclista y la bicicleta, por lo que su ergonomía y diseño afectan directamente al confort, puede presentar variaciones en la anchura, curvatura y acolchado. La tija es el tubo que une el sillín con el cuadro, en la última década, se ha vuelto frecuente la instalación de tijas telescópicas, permitiendo ajustar la altura del sillín de manera mucho más rápida y sin uso de herramientas técnicas, llegando a poder ser ajustado en marcha gracias a un sistema mecánico o electrónico ubicado en el manillar, favoreciendo a la transición entre ascensos y descensos sin necesidad de detenerse.

3.1.2.8 Suspensión y amortiguador.

Conecta la rueda delantera, trasera o ambas con el resto de la bicicleta, cumple la función de mantener el contacto de las ruedas con el terreno. Añade peso a la estructura a cambio de proporcionar estabilidad control y comodidad durante el pedaleo. El amortiguador se distingue entre los amortiguadores de muelle y los amortiguadores de aire. Los de muelle son más pesados, pero con gran sensibilidad, en cambio los de aire son más ligeros y progresivos. La elección depende del tipo de uso y las preferencias del usuario.[20]

Como componentes esenciales de la suspensión trasera se ha de mencionar:

-Bieleta: Se trata de una pieza de articulación entre una parte fija y una móvil, en concreto, entre el amortiguador y el basculante. Actúa como un enlace mecánico entre los tirantes superiores del basculante y el amortiguador porque se queda fijada al cuadro de la bicicleta. Su función principal es transmitir y modular el movimiento generado por las irregularidades del terreno desde el basculante hasta el amortiguador, permitiendo una respuesta más controlada del todo el sistema de suspensión. Debido al diseño articulado, la bieleta pivota hacia arriba o hacia abajo, adelante o atrás, dependiendo de la geometría del cuadro y el tipo de suspensión que analizaremos más adelante. La cinemática, influye directamente en cómo se comprime el amortiguador, es decir actúa como un brazo

intermedio que ajusta la forma en la que la suspensión reacciona contra impactos. La longitud, ángulo y forma varía dependiendo del modelo y marca de MTB. Por lo que es un componente crítico en la ingeniería del cuadro de la bicicleta.

-Basculante: Trata de una única estructura que conecta las vainas inferiores con la parte baja del cuadro, en la zona de pedaleo, mientras que los tirantes superiores se enlazan con la bieleta. El basculante se encarga de permitir el movimiento del eje trasero ante los impactos de la rueda trasera sobre el terreno, transmitiendo las fuerzas a través de la bieleta hacia el amortiguador. Los tirantes superiores están diseñados con cierta flexibilidad controlada para evitar añadir más articulaciones en la suspensión trasera, reduciendo así el peso y su mantenimiento. Por norma general, están fabricados de aluminio, fibra de carbono o ambos, gracias a su rigidez, ligereza y resistencia. Según la geometría y el diseño del fabricante su comportamiento puede variar en lo que se refiere a respuesta de reacción, tracción o absorción, diferenciando así a cada modelo de bicicletas.

-Amortiguador: En el caso del amortiguador trasero, según lo mencionado anteriormente, el modelo más común empleado en estos casos es el de amortiguador de aire, debido a su bajo peso, su capacidad de ajuste personalizado y su fácil mantenimiento. Muchos modelos de bicicletas incorporan sus propios sistemas de bloqueo mediante la activación por medio de una palanca en el manillar permitiendo endurecer o liberar la suspensión en marcha.

3.1.3 SUSPENSIÓN TRASERA EN MTB

Es un mecanismo que se encuentra montada sobre la rueda trasera de la bicicleta y el cuadro de esta. Absorbiendo todo tipo de vibraciones e impactos transmitidos por la rueda hacia el ciclista, según mencionado anteriormente. Está compuesto por un basculante, una bieleta y un amortiguador que dependiendo del diseño de estos y cómo están integrados sobre el cuadro se pueden clasificar en diferentes tipos de suspensiones traseras “Horst Link” o de cuatro barras, monopivote, pivote virtual “PPV”, Split pivot, o amortiguamiento flotante. Para comprender mejor el funcionamiento de la suspensión trasera de una bicicleta debemos entender los siguientes conceptos:

-Anti-Squat: Parámetro que describe la capacidad por parte de la suspensión trasera para resistir la compresión inducida por la aceleración durante el pedaleo, dicho de otro modo, es la relación que tiene la pedalada sobre el propio sistema de suspensión. Cuando el ciclista pedalea, se produce un reparto de masa hacia la parte trasera de la bicicleta, comprimiendo la suspensión trasera. El anti-squat se encarga de contrarrestar este efecto generando tensión en la cadena sobre el basculante, en una bicicleta con un mal anti-squat se nota como mucha de la fuerza que ejercemos sobre los pedales se pierde en la constante compresión y extensión de la suspensión [21]. La posición del pivote principal y la trayectoria de la cadena, influyen en el comportamiento del anti-squat. Es calculado por métodos como el de Cossalter [22], y expresado en tanto porcentual, donde un 100% de anti-squat implica que la suspensión permanece neutra ante las fuerzas de pedaleo, valores inferiores permiten cierta compresión.

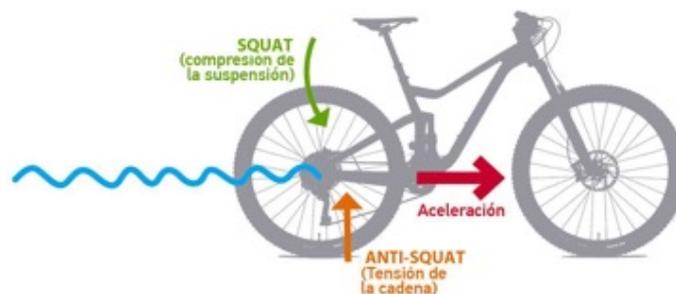


Ilustración 24 Anti-Squat (Fuente: MounainBike).

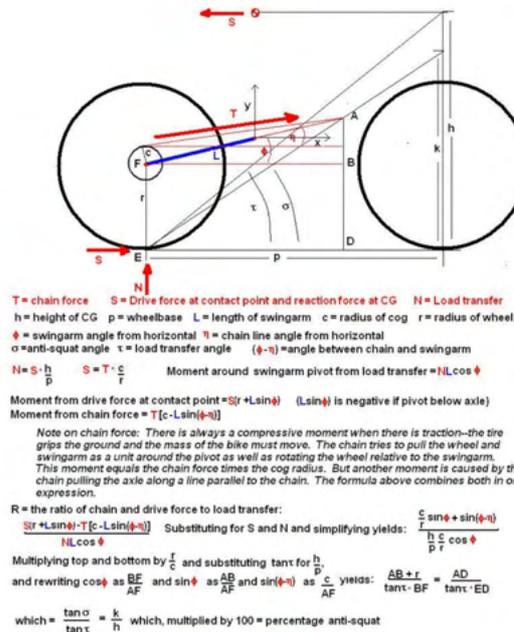


Ilustración 25 Cálculo del Anti-Squat mediante el método Cossalter (Fuente:Linkage Desing).

-Sag: Hundimiento inicial que experimenta la suspensión debido al peso del ciclista en posición estática y sin aplicar fuerzas. Se expresa en tanto porcentual, del recorrido total de la suspensión, generalmente está en torno al 20% y el 30% en las bicicletas de montaña. El previo ajuste del Sag es imprescindible, así como su constante revisión para garantizar el correcto funcionamiento, manteniendo la rueda en contacto con el terreno incluso en descenso pronunciados y al atravesar irregularidades facilitando una conducción más cómoda y evitando el riesgo a que se dañe la suspensión. Su ajuste varía en función. Del tipo de bicicleta, modalidad practicada y preferencias del ciclista.



Ilustración 26 SAG (Fuente:LaBicicleta).

-Leverage Ratio: Conocido como relación de palanca entre el recorrido del cuadro trasero y el recorrido del amortiguador. Esta relación interviene directamente en la sensibilidad, progresividad y eficiencia del sistema. Normalmente los valores de Leverage ratio oscilan entre 2:1 y 3:1. Por ejemplo, una bicicleta con 150mm de recorrido que utilice un amortiguador de 50 mm de recorrido tiene un LR de $150/50=3$. Si el amortiguador es de 57mm el LR es de $150/57= 2.63$ luego por cada milímetro que se desplaza el amortiguador, la rueda trasera recorre 2,63mm. [23]



Ilustración 27 Leverage Ratio (Fuente: Vorsprung suspension).

-Brake-Squat: Parámetro que evalúa la influencia de la frenada trasera sobre el comportamiento de la suspensión trasera, el valor se expresa en tanto porcentual. Refleja cómo responde la suspensión ante una deceleración. Un valor del 100% representa un equilibrio total entre la compresión de la suspensión en la frenada y la extensión provocada por la inercia del ciclista, manteniendo constante la geometría del sistema. En cambio, un valor del 0% en el brake squat implica que el sistema de frenado y la suspensión son completamente independientes, es decir al frenar, la suspensión se extenderá gracias a la inercia que lleva el ciclista hacia delante. Los valores más comunes en bicicletas de montaña están en torno al 50% de brake-squat.

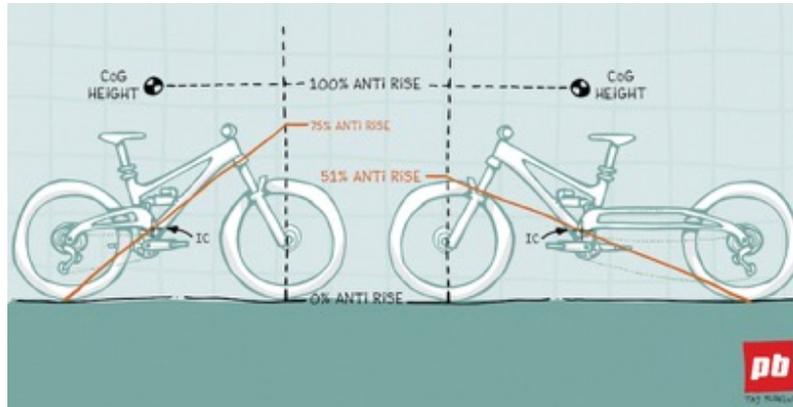


Ilustración 28 Brake Squat (Fuente: PinkBike).

-Pedal Kickback: Fenómeno por el cual los pedales rotan hacia atrás de forma involuntaria debido a la compresión de la suspensión trasera, especialmente cuando la cadena se encuentra bajo tensión. Este efecto puede ser perceptible en situaciones como aterrizajes bruscos o descensos técnicos, provocando una sensación leve pero incómoda para el ciclista.

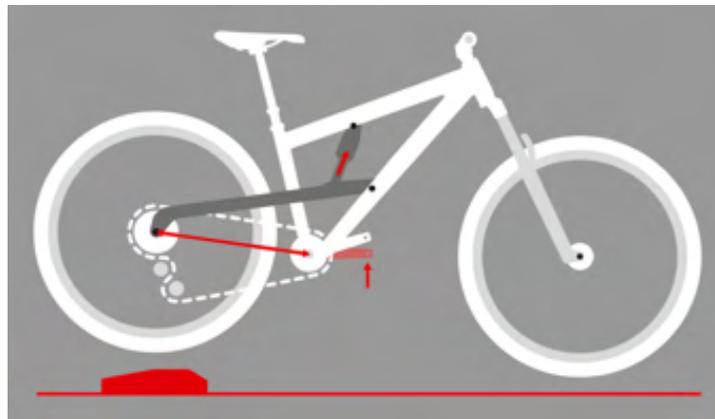


Ilustración 29 Pedal Kickback (Fuente: 32 Dientes).

3.1.3.1 Monopivote y monopivote articulado

Sistema de suspensión trasera de los más simples en la industria del ciclismo de montaña. Está formado por un único punto de giro que conecta el cuadro con el basculante trasero, provocando que el amortiguador se comprima directamente, sin la interferencia de bieletas con formas geométricas complejas. Su simple configuración se traduce en ahorro de peso, bajo requerimiento de mantenimiento y fiabilidad mecánica. En cambio, al no contener

elementos que desacoplen las fuerzas producidas en el pedaleo y la frenada, se convierte en una suspensión más sensible a estas.

El sistema monopivote surge como una evolución de este, dónde se mantiene el único eje de giro en el basculante, pero incorpora una bieleta para independizar el amortiguador del triángulo trasero proporcionando mayor progresividad y recorrido diferente además de una mejor independencia de la pedalada y frenada en comparación con la monopivote, a pesar de seguir siendo un sistema en el que interfieren bastante. [24]



Ilustración 30 Sistema Monopivote (Fuente: ESMTB).

3.1.3.2 Horst Link (4 barras)

Sistema también conocido como suspensión de cuatro barras, se caracteriza por incorporar un punto de pivote adicional situado por delante del eje de la rueda trasera, en la vaina. Su disposición permite que la rueda trasera se mueva de forma más independiente respecto del resto del cuadro, reduciendo mucho más las tensiones generadas en el pedaleo y el frenado de la rueda trasera. Debido a sus numerosas articulaciones, permite obtener una respuesta mucha más progresiva y eficaz sobre terrenos técnicos. Uno de sus inconvenientes está en el aumento de peso, así como la demanda de mayor mantenimiento.



Ilustración 31 Sistema Horst Link (4 barras) (Fuente: YouTube, Daniel Araneda).

3.1.3.3 Split pivot

También conocido como Active Braking Pivot (ABP), evoluciona del monopivote articulado ya que el triángulo trasero está unido a los dos extremos del amortiguador, con una bieleta en la parte superior y directamente a las vainas en el inferior e incluye un punto de giro concéntrico a la rueda. Dave Weagle, con su sistema DW-Link fue el máximo exponente o desarrollador de este sistema que BH adoptó al inicio de sus Lynx para luego desarrollar un sistema propio (derivado del DW-Link) como es el Split Pivot. [18]



Ilustración 32 Sistema Split Pivot, con punto de giro en rueda trasera (Fuente:ESMTB).

3.1.3.4 Pivote Virtual o PPV

El sistema de pivote virtual o también conocido como “Virtual Pivot Point”, se caracteriza por la ausencia de un eje de giro fijo entre el cuadro y la rueda trasera, por lo que el sistema no está limitado por la geometría del cuadro. El basculante está formado por una única pieza que une vainas y tirantes, se conecta el triángulo principal mediante dos bieletas articuladas que giran en sentidos opuestos, generando así un punto de pivote virtual, que va variando su posición a lo largo del recorrido de la suspensión. Este sistema mejora la eficiencia de la pedalada y la tracción de la bicicleta, además ofrece un control más preciso de la curva de compresión, obteniendo una suspensión sensible y progresiva. Entre sus inconvenientes está su diseño complejo que añade peso a la estructura y su constante mantenimiento para garantizar el correcto y eficaz funcionamiento.



Ilustración 33 Sistema Pivote Virtual (Fuente: ESMTB).

3.1.3.5 Amortiguación Flotante

La principal característica de la amortiguación flotante es que no se ancla directamente al cuadro, sino que queda suspendido entre dos bieletas, unidas al basculante y al triángulo principal, consiguiendo que el sistema sea accionado por ambos extremos, mejorando la compresión y la respuesta ante impactos y pedaleo. El objetivo es aumentar el efecto conseguido en los VPP de que a la hora de pedalear un extremo busque comprimir el amortiguador mientras que el otro tire de él compensándose ambas. Sus desventajas son las mismas que en el sistema VPP, además de que se incrementa el coste del sistema y se pierde algo de sensibilidad al principio del recorrido del amortiguador. [18]



Ilustración 34 Sistema amortiguación flotante (Fuente: MTB pro).

3.2 MATERIALES EN MTB

Las bicicletas de montaña recogen una amplia gama de materiales empleables para la fabricación de estas. Atendiendo a las diferentes características que se requieran ya sean físicos o económicos. Los principales materiales empleados son el acero, aluminio, titanio y fibra de carbono.

-Acero: Ha sido el material más empleado en la industria del ciclismo hasta los últimos años. Aunque su uso se ha visto reemplazado por materiales más ligeros como el aluminio el titanio o la fibra de carbono, sigue siendo una opción planteable debido a su resistencia estructural, durabilidad y capacidad para absorber vibraciones. Normalmente se recurre al uso de aceros aleados con el objetivo de conseguir un material más equilibrado, destaca el acero aleado 4130 (“Chromology”) formada por un 1% de Cromo (Cr) y 0,2% de Molibdeno (Mo). Su elevada densidad, da lugar a cuadros más pesados.

Propiedades	Métrica	Imperial
Resistencia a la tracción, última	560 MPa	81200 psi
Resistencia a la tracción, límite elástico	460 MPa	66700 psi
Módulo de elasticidad	190 - 210 GPa	27557 - 30458 ksi
Módulo de masa	140 GPa	20300 ksi
Módulo de cizallamiento	80 GPa	11600 ksi
Relación Poissons	0.27 - 0.33	0.27 - 0.33
Alargamiento a la rotura	21.50%	21.50%
Reducción de la superficie	59.6%	59.6%
Dureza, Brinell	217	217
Dureza, Knoop	240	240
Dureza, Rockwell B	95	95
Dureza, Rockwell C	17	17
Dureza, Vickers	288	288
Macinabilidad	70	70

Ilustración 35 Propiedades mecánicas del Acero aleado 4130 (Fuente: Alloys International).

-Titanio: Sin duda es uno de los materiales más valorados en la industria del ciclismo, ya que combina ligereza, resistencia mecánica y resistencia a la corrosión. Aunque su elevado coste y dificultad de fabricación provoca que no sea tan común como lo es el aluminio o el carbono a excepción de en las bicicletas de alta gama y proyectos más personalizados. A nivel estructural, el titanio contiene una resistencia específica (resistencia/peso) muy alta, que da lugar a fabricar cuadros muy ligeros y duraderos, así como una gran capacidad de absorción de vibraciones, aportando una sensación de suavidad a la hora de pedalear sin requerir uso excesivo de suspensión; por lo que es un material muy atractivo para ciclistas de largas distancias y aficionados al Trail técnico. Destaca también su alta resistencia a fatiga. Algunos inconvenientes de trabajar con titanio son que requiere soldaduras especializadas ya que es altamente reactivo al oxígeno, nitrógeno e hidrógeno a altas temperaturas, por eso se debe soldar en atmósferas muy controladas, como puede ser mediante soldadura tipo TIG y complejidades en cuanto a procesos de fabricación como lo es su mecanizado debido a la baja conductividad térmica del titanio provoca que el calor se concentre en la herramienta de corte o procesos de conformado complicados debido a la baja ductilidad a temperatura ambiente, a menudo se necesitan procesos de conformado en caliente (por encima de los 400°C). Todo eso encarece notablemente el producto final.

Propiedades	Métrica	Imperial
Resistencia a la tracción, última	≥ 862 MPa	≥ 125000
Resistencia a la tracción, límite elástico	≥ 724	≥ 105000
Alargamiento a la rotura	≥ 10%	≥ 10%
Módulo de elasticidad	105 - 120 GPa	15200 - 17400 ksi
Relación Poissons	0.30	0.30
Módulo de cizallamiento	43,0 - 45,0 GPa	6240 - 6530 ksi

Ilustración 36 Propiedades mecánicas del Titanio (Fuente: Alloys International).

-Aluminio: Es el material más empleado en el sector de ciclismo, gracias a su relación peso, resistencia mecánica y coste. Su bajo peso lo convierte en una opción ideal para conseguir

estructuras ligeras sin sacrificar rigidez ni durabilidad. Al igual que en el caso del acero, no se emplea el aluminio puro, sino aleaciones específicas que mejoran sus propiedades. Las más empleadas son el aluminio 6061 o el aluminio 7075, que incorporan elementos como silicio, magnesio, cobre o zinc, aportando mejor soldabilidad, mayor resistencia y dureza superficial.

Entre las ventajas del aluminio está su bajo coste comparado con el titanio o el carbono y su resistencia a corrosión es razonable, aunque se suele tratar con anodizados o pinturas epoxi para mejorar la protección. Este material nos permite fabricar cuadros con geometrías más complejas, siendo muy aplicable para bicicletas de doble suspensión como es el caso. Su única desventaja es su susceptibilidad de fallo a causa de la fatiga frente a sollicitaciones críticas.

Propiedades	Métrica	Inglés
Resistencia a la tracción	115 MPa	16680 psi
Límite elástico	48 MPa	6962 psi
Resistencia al cizallamiento	83 MPa	12038 psi
Resistencia a la fatiga	62 MPa	18992 psi
Módulo elástico	70-80 GPa	10153-11603 ksi
Relación de Poisson	0.33	0.33
Alargamiento	25%	25%
Dureza	30	30

Ilustración 37 Propiedades mecánicas del Aluminio 6061 (Fuente: Alloys International).

Propiedades	Métrica	Imperial
Dureza, Brinell	150	150
Dureza, Knoop	191	191
Dureza, Rockwell A	53.5	53.5
Dureza, Rockwell B	87	87
Dureza, Vickers	175	175
Resistencia a la tracción	572 MPa	83000 psi
Resistencia a la tracción	503 MPa	73000 psi
Alargamiento a la rotura	11%	11%
Módulo de elasticidad	71,7 GPa	10400 ksi

Ilustración 38 Propiedades mecánicas del Aluminio 7075 (Fuente: Alloys International).

-Fibra de Carbono: Siendo uno de los materiales más apreciados y empleados no solo en la industria ciclista sino en cualquier sector automovilístico, aeroespacial, automotriz y electrónica; gracias a sus increíbles características destacando su relación peso-rigidez, así como su capacidad para ser moldeada en formas aerodinámicas y formar estructuras optimizadas.

Se trata de un material compuesto formado por fibras finas y resistentes de carbono unidas entre sí integradas en una matriz de resina epoxi, permitiendo una personalización del comportamiento estructural gracias a las diferentes configuraciones de estos compuestos como puede ser, la orientación de las fibras que te influye directamente en la resistencia de cada eje, siendo las configuraciones más comunes a 0° (máxima rigidez longitudinal), 90° (refuerzo transversal) y 45° (mejora la resistencia de cizallamiento y la torsión); el tipo de fibra empleado por ejemplo carbono estándar (T300, T700), carbono de alto módulo (T800, M40J) o incluso carbonos híbridos con fibras de vidrio o Kevlar; otro factor determinante es el espesor, es decir el número de capas empleadas ya que cuantas más capas, mayor rigidez y resistencia pero más peso y menos capas implica más flexibilidad y ligereza pero menor

durabilidad. Esto permite adaptar localmente la estructura según las necesidades de carga y deformación.

Entre sus principales ventajas, destaca su bajo peso, su gran resistencia mecánica y su excelente capacidad de absorción de vibraciones, lo que se traduce en un mayor confort y control sobre terrenos irregulares. Además, al no corroerse ni fatigarse como los metales, garantiza una buena durabilidad.

No obstante, la fibra de carbono presenta ciertas limitaciones como puede ser la fragilidad frente a impactos locales a diferencia de los metales mencionados previamente permiten deformarse antes de llegar a romperse. Por otra parte, su reparación es compleja y costosa sin garantizar la recuperación total de sus propiedades. También hay que mencionar que su proceso de fabricación es intensivo y costosos, desde la obtención de los materiales iniciales como la mano de obra elevando el precio final del producto.

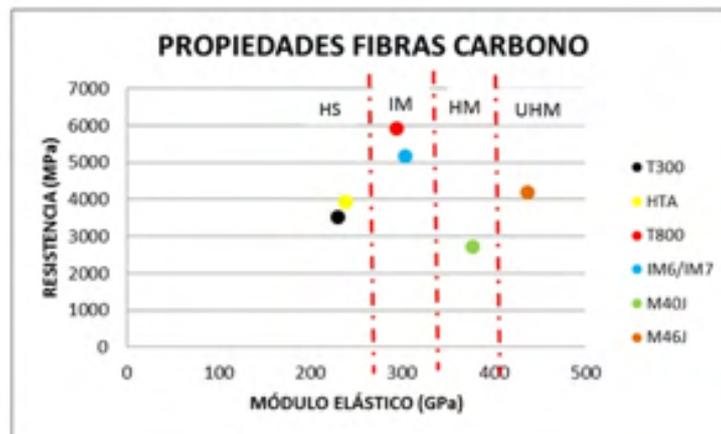


Ilustración 39 Propiedades mecánicas de las Fibras de carbono (Fuente: Triatleta a ratos).

3.3 *NORMATIVA EN BICICLETAS DE MONTAÑA*

La normativa reguladora para bicicletas de montaña, y por tanto aplicable para este proyecto es la norma UNE EN ISO 4210, elaborada por el Comité Técnico ISO/TC 149. Establece los requisitos de seguridad y métodos de ensayo para bicicletas antes de salir al mercado.[25] Esta norma se enmarca en las disposiciones europeas sobre seguridad en bicicletas. Su finalidad es garantizar que las bicicletas comercializadas cumplan con ciertos criterios

técnicos esenciales, como la resistencia estructural, la estabilidad, la eficacia del sistema de frenado y la visibilidad mediante elemento reflectantes.

La norma se estructura en 9 partes, la primera diferencia las categorías de bicicletas en función de su uso. La segunda parte se refiere a los requisitos que se deben de cumplir en función del tipo de bicicleta y en los apartados del 3 al 9 se concretan los ensayos y procedimientos que deben emplear los fabricantes para probar la seguridad de los componentes: [26]

-ISO 4210-1:2023. Ciclos. Requisitos de seguridad para bicicletas. Parte 1: Vocabulario. (Ratificada por la Asociación Española de Normalización en marzo de 2023.)

- ISO 4210-2:2023. Ciclos. Requisitos de seguridad para bicicletas. Parte 2: Requisitos para bicicletas de paseo y trekking, para adultos jóvenes, de montaña y de carreras. (Ratificada por la Asociación Española de Normalización en marzo de 2023.)

-ISO 4210-3:2023. Ciclos. Requisitos de seguridad para bicicletas. Parte 3: Métodos de ensayo comunes. (Ratificada por la Asociación Española de Normalización en marzo de 2023.)

- ISO 4210-4:2023. Ciclos. Requisitos de seguridad para bicicletas. Parte 4: Métodos de ensayo de frenado. (Ratificada por la Asociación Española de Normalización en marzo de 2023.)

- ISO 4210-5:2023. Ciclos. Requisitos de seguridad para bicicletas. Parte 5: Métodos de ensayo de la dirección. (Ratificada por la Asociación Española de Normalización en marzo de 2023.)

- ISO 4210-6:2023. Ciclos. Requisitos de seguridad para bicicletas. Parte 6: Métodos de ensayo del cuadro y la horquilla. (Ratificada por la Asociación Española de Normalización en marzo de 2023.)

- ISO 4210-7:2023. Ciclos. Requisitos de seguridad para bicicletas. Parte 7: Métodos de ensayo para ruedas y llantas. (Ratificada por la Asociación Española de Normalización en marzo de 2023.)

- ISO 4210-8:2023. Ciclos. Requisitos de seguridad para bicicletas. Parte 8: Métodos de ensayo para los pedales y el sistema de transmisión. (Ratificada por la Asociación Española de Normalización en marzo de 2023.)

- ISO 4210-9:2023. Ciclos. Requisitos de seguridad para bicicletas. Parte 9: Métodos de ensayo para los sillines y las tijas. (Ratificada por la Asociación Española de Normalización en marzo de 2023.).

Para el correcto estudio de optimización topológica sobre la bieleta, se tendrán en cuenta tanto la parte 2 como la parte 6, que corresponden con los requisitos que ha de cumplir una bicicleta de montaña y las simulaciones de los ensayos a realizar en el cuadro y horquillas. En el caso de las bicicletas con doble suspensión, clasificados como suspendidos en la norma, se establece como requisito fundamental que, ante una posible avería o rotura del amortiguador trasero, la rueda posterior no debe entrar en contacto con ninguna parte del cuadro. Al mismo tiempo, el basculante, encargado de sostener dicha rueda, debe permanecer unido al cuadro sin soltarse en ninguna circunstancia.

La bieleta recibe los esfuerzos procedentes del basculante, transmitidos a través de los impactos sobre la rueda trasera y las irregularidades del terreno. Esto se traduce en desplazamientos en el sentido de la fuerza soportada por los tirantes traseros, por lo que los ensayos a simular para verificar su correcto funcionamiento, se calcularán posteriormente.

4. DEFINICIÓN DEL TRABAJO

4.1 PROCEDIMIENTO

Se lleva a cabo la optimización topológica de la bieleta de la suspensión trasera de una bicicleta MTB modelo. Una vez obtenida la solución óptima, se realiza un refinamiento y rediseño de la geometría resultante. Finalmente, se fabrica un prototipo mediante tecnologías de impresión 3D.

Las fases a seguir son las siguientes:

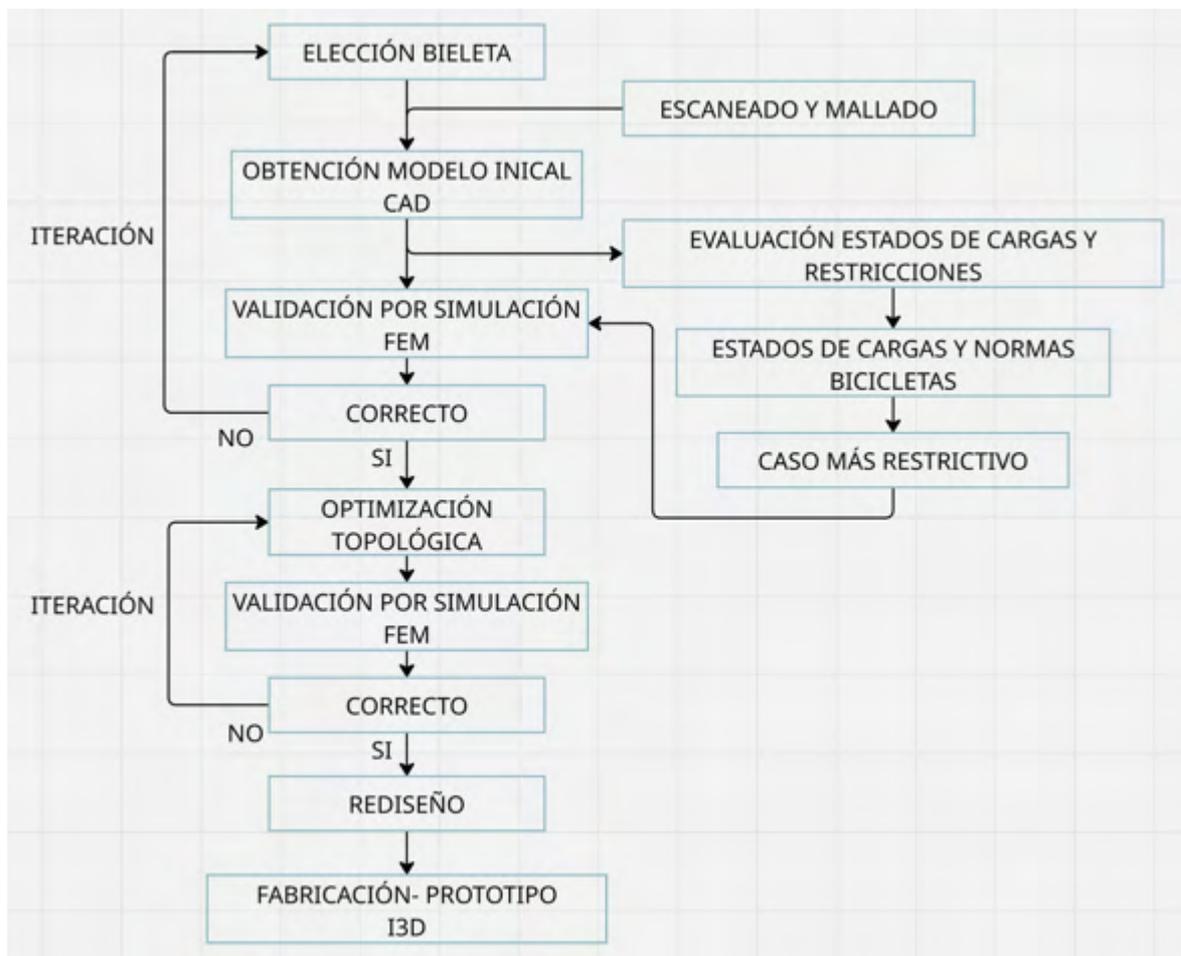


Ilustración 40 Desarrollo del trabajo a realizar (Fuente: Elaboración propia).

4.2 PROPUESTA DE DISEÑO

La pieza seleccionada en cuestión es una bieleta en bruto fabricada en aluminio y adquirida a un proveedor a través de Aliexpress. Apta para los modelos Specialized Epic Pro.

En la siguiente imagen, podemos apreciar la bieleta en estado bruto.



Ilustración 41 Bieleta original adquirida (Fuente: Aliexpress).

En la etapa final del proyecto, se imprimirá tanto la bieleta original como el prototipo ya optimizado por Impresión 3D mediante diferentes técnicas de impresión como lo son FDM y SLA.

4.3 ESTUDIO DE GEOMETRÍA

Para el estudio de la bieleta, partimos de un modelo de bicicleta externo ya que no optamos de las características específicas de la bicicleta Specialized Epic Pro, el modelo seleccionado en cuestión es la Specialized S-Works Stumpjumper, con un mismo sistema de suspensión trasera que emplea esta bieleta que será evaluada en los siguientes apartados.

Para evaluar el estudio de la geometría de la bicicleta modelo y poder evaluar correctamente las cargas aplicadas sobre la bieleta, antes debemos seleccionar la talla de la bicicleta. Para la elección de la talla de bicicleta se ha de tener en cuenta, el tipo de senderos que se recorre y el estilo de conducción. Estamos evaluando una bicicleta de Trail donde las medidas entre

tallas son similares, permitiendo versatilidad en la elección de las tallas. Inicialmente se determina la altura del usuario estándar y la medida de la tibia, siendo estas de 173-188cm y 38-49cm lo que equivale a una talla L considerando que es la talla más vendida por el fabricante. Equivale a una talla de bicicleta S4 para el modelo S-Works Stumpjumper de horquilla de 160mm.

En la siguiente imagen podemos evaluar las medidas y los ángulos de la bicicleta seleccionada. [27]



STUMPJUMPER CARBON (horquilla de 160 mm)		TALLA DEL CUADRO					
		S1*	S2	S3	S4	S5	S6
A	Stack (mm)	-	621	630	644	657	671
B	Reach (mm)	-	420	445	470	495	525
C	Longitud del tubo de dirección (mm)	-	100	110	125	140	155
D	Ángulo del tubo de dirección (°)	-	64,0	64,0	64,0	64,0	64,0
E	Altura del pedalier (mm)	-	340	340	340	340	340
F	Caída del pedalier (mm)	-	35	35	35	35	35
G	Trail (mm)	-	134	134	134	134	134
H	Longitud de la horquilla, total (mm)	-	573	573	573	573	573
I	Rake/offset de la horquilla (mm)	-	44	44	44	44	44
J	Distancia de centro a parte delantera (mm)	-	755	785	816	848	884
K	Longitud de vainas (mm)	-	432	432	432	442	442
L	Distancia entre ejes (mm)	-	1186	1216	1247	1288	1325
M	Altura de entrepierna (mm)	-	751	745	745	745	751
N	Longitud del tubo del sillín (mm)	-	385	405	425	445	465
O	Ángulo del tubo del sillín (°)	-	76,0	76,5	76,5	76,8	77,2
P	Longitud del tubo superior, horizontal (mm)	-	574	596	625	649	678
	Longitud de la biela (mm)	-	165	165	170	170	170
	Anchura del manillar (mm)	-	780	800	800	800	800
	Anchura del sillín (mm)	-	155	143	143	143	143

Ilustración 42 Geometría bicicleta Specialized Stumpjumper (Fuente: Specialized).

Se ha de mencionar, que faltan algunos datos técnicos sobre la geometría de la bicicleta y esenciales para el análisis de los diferentes estados de carga de la bicicleta, en concreto, el ángulo que existe entre los tirantes del basculante trasero. Debido a que son tirantes rígidos y no varían su geometría, podemos obtener gracias a principios básicos de geometría el ángulo requerido.

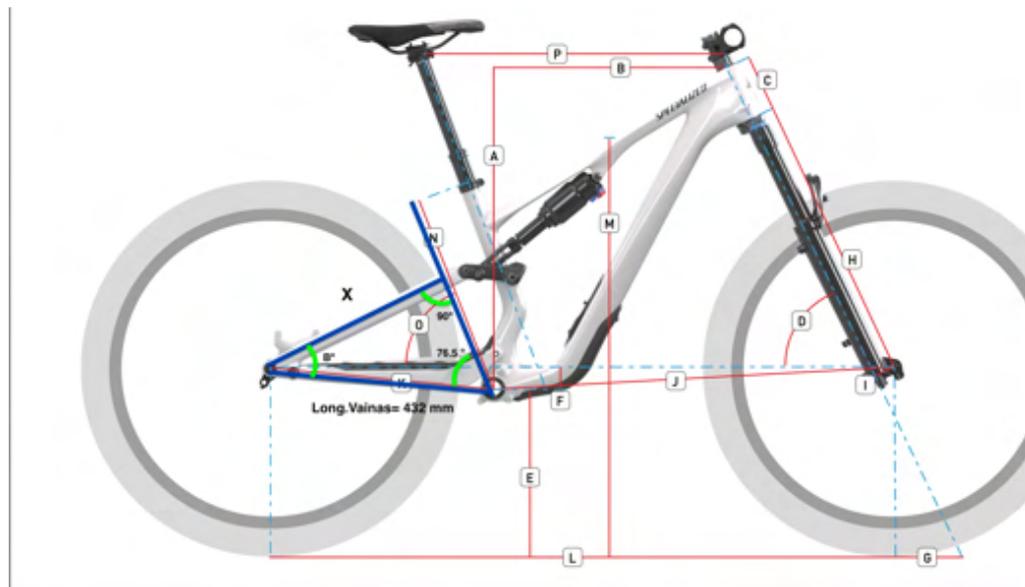


Ilustración 43 Trigonometría aplicada para la determinación del ángulo del triángulo trasero (Fuente: Elaboración propia).

Aplicando trigonometría, obtenemos el ángulo β :

$$\text{sen}(76.5^\circ) = \frac{X}{432} \rightarrow X = 420,063 \text{ mm}$$

$$\text{cos}(\beta) = \frac{420,063}{432} \rightarrow \beta = 13,50^\circ$$

Con los valores de X y β , podemos determinar las cargas que sufre la bieleta en diferentes casos.

Dado que la bieleta, forma parte de un sistema articulado, se considera un coeficiente de transmisión de carga, en función de tipo de carga aplicada y naturaleza (quasi-estática o dinámica). Este coeficiente está basado en estimaciones razonadas de reparto de carga en bicicletas de doble suspensión.

4.4 ESTUDIO DE CARGAS

Para el correcto análisis y evaluación de cargas que recibe la bieleta y poder realizar la simulación por elementos finitos, se ha de evaluar la bieleta frente a diferentes estados de cargas.

4.4.1 ESTADO DE CARGAS 1

El procedimiento de ensayo aplicable se encuentra descrito en el subapartado 4.5 de la parte 6 de la norma UNE EN ISO 4210, correspondiente a la sección de cuadro y horquilla en el que se detalla el ensayo de fatiga del cuadro bajo una carga vertical.

En este ensayo, se coloca el cuadro en su orientación de funcionamiento, permitiendo la rotación de la rueda y usando un rodillo en la rueda delantera para permitir cubierta flexibilidad en la horquilla delantera durante el ensayo. Sobre la tija del sillín se ejerce el caso más extremo, aplicando 1200N de manera vertical sobre la tija del sillín, correspondiente a los requerimientos específicos para bicicletas de montaña. Para evaluar la fatiga, se mantiene durante 50000 ciclos a una frecuencia de 3Hz, para poder evaluar el comportamiento a fatiga del cuadro. [28]

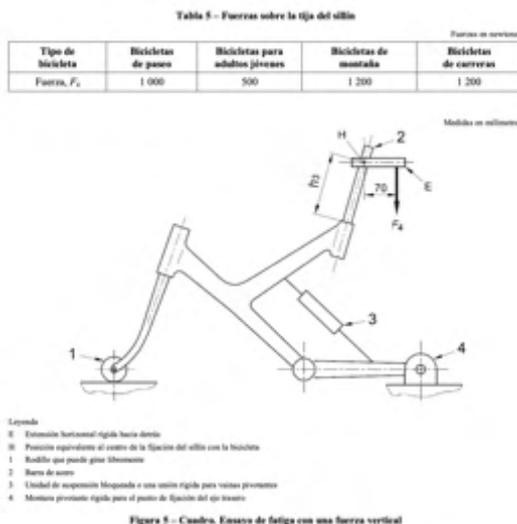


Ilustración 44 Estado de Cargas N°1, Norma UNE EN ISO 4210, 4.5, parte 6 (Fuente: UNE-EN-ISO).

Se toma esta configuración como una hipótesis de carga crítica para estudiar el comportamiento estructural de la bieleta del sistema de suspensión trasera.

En nuestro caso, aplicando la geometría evaluada previamente obtenemos la fuerza resultante sobre la bieleta:

$$F_{aplicada} = 1200 \text{ N}$$

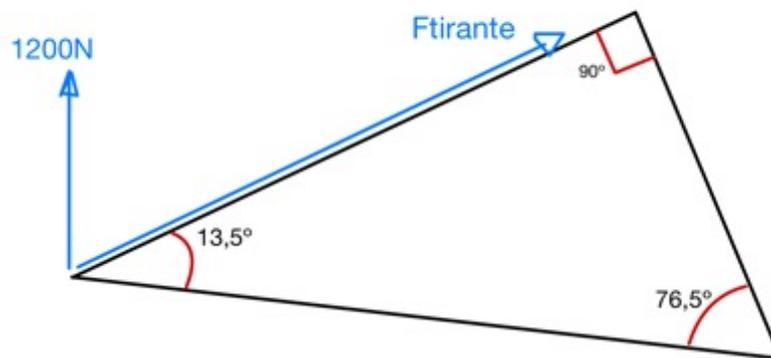


Ilustración 45 Cálculo de la Fuerza soportada por el tirante de la Specialized Stumpjumper, para el estado de cargas N°1 (Fuente: Elaboración propia).

$$\cos(76.5) = \frac{1200}{F_{tirante}} \rightarrow F_{tirantes} = 5140,389 \text{ N}$$

Estimando una transmisión a la bieleta del 32.5% debido a que es una carga baja y mucho se distribuye en el cuadro obtenemos una $F_{transmitida} = 1670,626 \text{ N}$ aplicada por ambos tirantes sobre la bieleta, que se distribuye a mitad en los puntos de apoyo, por lo que cada tirante ejerce sobre la bieleta una $F_{tirante} = 835,313 \text{ N}$ y proyectado en ejes X e Y para realizar el ensaño quedan en: $F_x = 812,233 \text{ N}$ y $F_y = 194,999 \text{ N}$.

4.4.2 ESTADO DE CARGAS 2

Se toma la referencia el ensayo indicado en el Anexo C (de carácter informativo) de la norma UNE EN ISO 4210, Parte 6, en concreto el apartado C.1 (Cita Norma UNE.EN) asignado a bicicleta de doble suspensión o cuadros suspendidos, ensayo de juego de neumático.

El ensayo se basa en la aplicación de una carga intensa aplicada verticalmente sobre la rueda trasera para garantizar que la rueda no choca con ningún elemento del cuadro y no se produce la separación del basculante respecto a la estructura principal, aún con fallo del sistema de amortiguación, a su vez la no rotura de la bieleta.

Para la realización, el neumático, ha de estar inflado a presión máxima determinada por el proveedor, el sistema de suspensión completamente abierto y el amortiguador trasero, en el caso de ser un amortiguador neumático, se presuriza la cámara a su mínima presión de acuerdo con las indicaciones del fabricante, para poder simular la máxima compresión del sistema. La bicicleta se ha de colocar en posición inversa a la de funcionamiento habitual y la carga se aplica de manera vertical sobre la rueda trasera, con un valor de 2800N durante 1 minuto, como podemos visualizar en la siguiente imagen: [28]

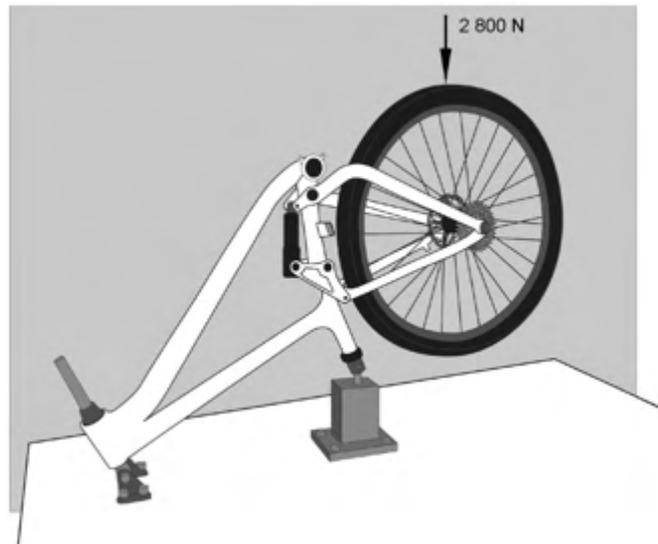


Ilustración 46 Estado de Cargas N°2, Norma UNE EN ISO 4210, Anexo C, parte 6 (Fuente: UNE-EN-ISO).

Para el estudio concreto de la bieleta, aplicamos la trigonometría mencionada previamente, en este caso:

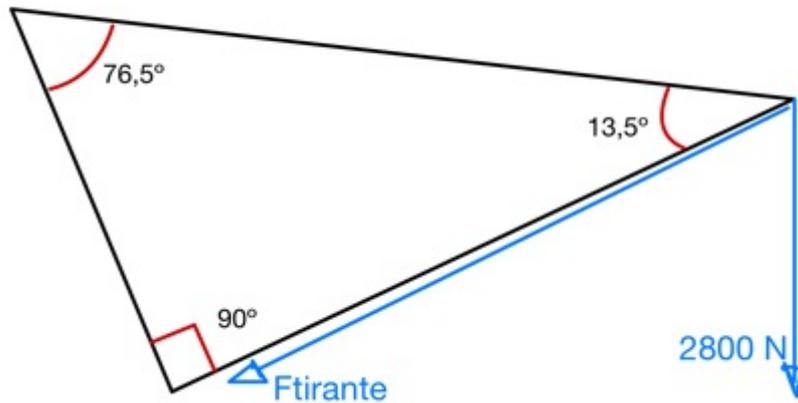


Ilustración 47 Cálculo de la Fuerza soportada por el tirante de la Specialized Stumpjumper, para el estado de cargas N°2 (Fuente: Elaboración propia).

Donde $\cos(76,5) = \frac{2800}{F_{tirante}} \rightarrow F_{tirantes} = 11994,241 \text{ N}$ con un coeficiente de transmisibilidad del 37.5% resulta en $F_{transmitida} = 4497,840 \text{ N}$ y por tanto cada uno de los dos tirantes transmite una fuerza total de $F_{tirante} = 2248,920 \text{ N}$, proyectado en X e Y resultan: $F_x = 2186,782 \text{ N}$ y $F_y = 524,999 \text{ N}$.

4.4.3 ESTADO DE CARGAS 3

Para el Estado de Cargas 3, se va a realizar un ensayo de choque modelando el salto de una bicicleta de montaña, casual. Para la que se han asumido las siguientes consideraciones: altura de salto 0.65m, masa del ciclista 75 Kg, masa de la bicicleta 14,48 Kg, velocidad inicial de 0m/s, deformación del impacto 0,13m y una transmisibilidad a la bieleta del 40% debido a la carga dinámica más el impacto.

Obteniendo los siguientes resultados del ensayo de choque:

Aplicando el principio de conservación de la energía podemos obtener fácilmente la fuerza aplicada sobre la rueda trasera. Toda la energía potencial gravitatoria del sistema (masa total del ciclista más bicicleta) se considera transformada en un trabajo mecánico durante la deformación vertical de 13 cm al aterrizar.

$$Ec = \frac{1}{2}mv^2$$

$$Ep = mgh$$

$$Emec = Ep + Ec$$

En este caso la $Ep = 89.48 * 9.81 * 0.65 = 570,569 J$. Asumimos que toda la energía se disipa durante el impacto como trabajo realizado por una fuerza media F actuando durante la deformación.

$$Ep = F * \delta$$

$$F = \frac{Ep}{\delta} = \frac{570.569}{0.13} = 4388,99 N$$

De nuevo, aplicando la geometría aplicada en casos anteriores:

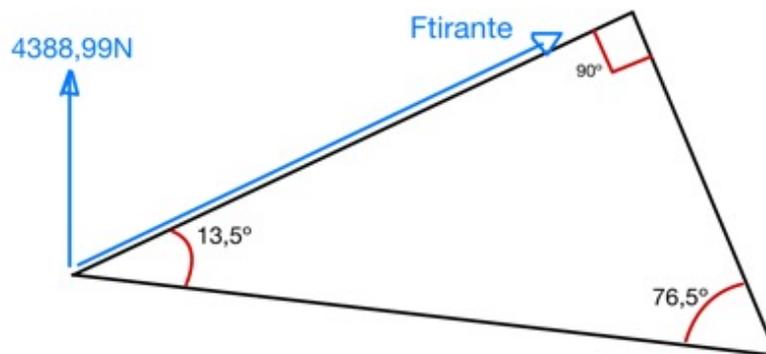


Ilustración 48 Cálculo de la Fuerza soportada por el tirante de la Specialezed Stumpjumper, con la carga aplicada según el ensayo de choque (Fuente: Elaboración propia).

Se obtiene $\cos(76,5) = \frac{4388.99}{F_{tirantes}} \rightarrow F_{tirantes} = 18800,947 N$ que aplicando el factor de transmisibilidad del 40% y repartiendo la fuerza por igual entre los dos tirantes traseros se obtiene la $F_{tirante} = 3760,189 N$, proyectado en X e Y, $F_x = 3656,295 N$ y $F_y = 877,798 N$.

4.4.4 ESTADO DE CARGAS 4

Se ha considerado en este estudio una situación de uso habitual, en la que el ciclista se encuentra sentado sobre el sillín con la bicicleta en posición estática. Se trata de replicar la

fuerza vertical que se transmite directamente desde el peso del usuario a todo el sistema de suspensión trasero, afectando, en concreto, sobre la bieleta.

Para el correcto análisis, se toma como referencia un peso corporal de 80 Kg y masa de las protecciones 10Kg, atendiendo a una distribución del peso corporal, reflejada en la siguiente imagen.

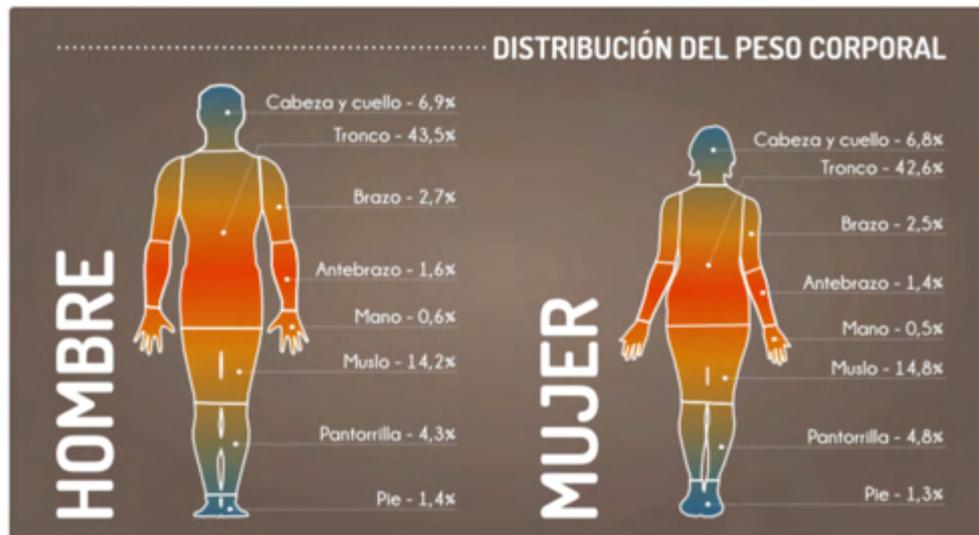


Ilustración 49 Distribución del peso corporal (Fuente: TFG Fatiga en suspensión trasera MTB).

Las fuerzas resultantes, se pueden dividir en 3, F1 sobre los pedales, F2 sobre el sillín donde interviene el peso de las piernas y el tronco y F3 sobre el manillar que incluye el peso de la cabeza, cuello, brazos, antebrazos y manos.

Siendo las fuerzas estimadas:

$$F1 = 0 \text{ N}$$

$$F2 = \left[\frac{43.5 + 2 * (14.2 + 4.3 + 1.4)}{100} \right] * 90 \text{ Kg} * \frac{9.81 \text{ m}}{\text{s}^2} = 753,4557 \text{ N}$$

$$F3 = \left[\frac{6.8 + 2 * (2.7 + 1.6)}{100} \right] * 90 \text{ Kg} * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 135,966 \text{ N}$$



Ilustración 50 Descripción de fuerzas sobre la bicicleta (Fuente: Elaboración propia).

Con la geometría indicada en apartados anteriores se obtiene una $F_{tirantes} = 3227,546 N$, con una transmisibilidad del 30% sobre la bieleta, y distribuida uniformemente entre los dos tirantes queda una $F_{tirante} = 484,131 N$, proyectada en ejes $F_x = 470,755 N$ y $F_y = 113,081 N$.

4.4.5 ESTADO DE CARGAS 5

Este estado de cargas plantea una situación complementaria al caso anterior, en este caso, el ciclista se encuentra de pie, apoyando completamente todo su peso sobre los pedales. Postura habitual en ascensos exigentes, sprints o bajadas rápidas.

Las fuerzas resultantes son las siguientes:

$$F1 = \left[\frac{43,6 * \frac{3}{4} + 2 * (14,2 + 4,3 + 1,4)}{100} \right] * 90 Kg * \frac{9,81m}{s^2} = 639,440 N$$

$$F2 = 0 N$$

$$F3 = \left[\frac{6,8 + 2 * (2,7 + 1,6) + 43,6 * \frac{1}{4}}{100} \right] * 90 Kg * 9,81 \frac{m}{s^2} = 232,202 N$$

Resulta una $F_{tirantes} = 2739,141 N$, con un factor de transmisibilidad a la bieleta del 32,5% y distribuida uniformemente entre los dos tirantes traseros, equivale a una $F_{tirante} = 445,110 N$. Proyectadas $F_x = 432,812 N$, $F_y = 103,909 N$.

4.4.6 ANÁLISIS Y CONCLUSIONES SOBRE LOS ESTADOS DE CARGAS

Una vez definidos y analizados los distintos estados de carga que pueden actuar sobre la bieleta de la suspensión trasera, se ha calculado la fuerza equivalente ($F_{tirante}$) a la que la bieleta es sometida.

Tras comparar los resultados obtenidos para cada caso planteado, se concluye que el caso más restrictivo corresponde con el estado de cargas 3, asociado a un ensayo de choque, modelando el salto de una bicicleta de montaña, partiendo de unas condiciones de contorno reales y comunes en el mundo del ciclismo de montaña. Se tomará como referencia para las simulaciones por elementos finitos, procesos de optimización topológica y diseño generativo que se desarrollarán en los siguientes apartados.

Se asume que, si la bieleta es capaz de resistir a este estado de cargas crítico sin comprometer su estructura, también será válida para el resto de los escenarios planteados, que someten a esta a esfuerzos menores. Garantizando que la solución final propuesta será segura y eficiente en condiciones reales de uso.

Estados de Cargas	Faplicada [N]	Ftirantes [N]	Ftirante transmitida	Fcada tirante	Fx [N]	Fy [N]
Estado de cargas 1						
Norma UNE 4210- Pt6/4/4.5	1200	5140,389	1670,626	835,313	812,233	195,000
Estado de cargas 2						
Norma UNE 4210-Pt6/ Anexo C	2800	11994,241	4497,840	2248,920	2186,782	525,000
Estado de cargas 3						
Ensayo choque, salto	4388,99	18800,947	7520,379	3760,189	3656,295	877,799
Estado de cargas 4						
Ciclista sentado	753,455	3227,546	968,2638	484,1319	470,755	113,018
Estado de cargas 5						
Ciclista de pie	639,44	2739,141	890,221	445,110	432,812	103,909

Tabla 3 Comparación estados de cargas (Fuente: Elaboración propia).

Para todos los análisis estructurales y simulaciones, se considerará un factor de seguridad de $n=1,5$. Este coeficiente permite un margen de seguridad adicional frente a las tolerancias de fabricación, variaciones en la calidad del material o situaciones de carga inusuales o no contempladas en el diseño. En el entorno del ciclismo de montaña, donde las condiciones del terreno son altamente variables y los componentes son sometido a esfuerzos, es común adoptar factores de seguridad del margen de 1,3 – 1,6 por lo que el valor seleccionado, representa una seguridad estructural razonable.

5. DESARROLLO DEL TRABAJO

5.1 *PROTOTIPO 1*

5.1.1 OBTENCIÓN MODELO CAD

Como punto de partida para el desarrollo del Trabajo de Fin de Grado, se ha llevado a cabo un estudio previo de las diferentes bieletas empleadas en sistemas de suspensión trasera para bicicletas de montaña. Donde se llega a la conclusión de dos modelos, aquellos articulados entre los tirantes traseros y el cuadro de la bicicleta a través del amortiguador y aquellos conectados entre los tirantes traseros, el cuadro de la bicicleta y el amortiguador en varios puntos.



Ilustración 51 Tipos de bieletas según su geometría (Fuentes: Actionsport, Decathlon).

Con base en esta evaluación, se decidió adquirir físicamente dos modelos de bicicletas para su análisis en detalle subvencionados por la Universidad Pontificia Comillas. El primer modelo se obtuvo a través de la plataforma Aliexpress [29] y el segundo modelo en Decathlon [30], evaluando los aspectos geométricos, tipo de anclajes, la compatibilidad con cuadros diferentes y sistemas de suspensión, y la facilidad de replicación o modificación en un entorno CAD, se seleccionó el modelo de Aliexpress como base del proyecto para su optimización topológica y futura obtención de prototipo 3D.



Ilustración 52 Bieletas compradas (Fuentes: Aliexpress, Decathlon).

Para la obtención del modelo CAD se hace uso de la ingeniería inversa, con técnicas de escaneo tridimensional. Permitiendo capturar con alta resolución la geometría externa de las piezas físicas, convirtiéndolas en modelos digitales.

El procedimiento se realiza empleando VXelements, software asociado al escáner empleado. Para garantizar una buena captura de la geometría, primero se aplica un spray matificante sobre la superficie para evitar reflejos que pueden confundir al escáner al perfeccionar las zonas más brillantes y agujeros.



Ilustración 53 Spray matificante aplicado a la bieleta (Fuente: Elaboración propia).

La bieleta se fija en una mesa rotativa, empleado el uso de mordazas que aseguran el no desplazamiento de esta durante el proceso. Se colocan unos marcadores de referencia óptica, a modo de pegatinas sobre la pieza y la mesa junto con unas piezas referenciadoras a modo de pelotas cubiertas de pegatinas, lo que permite mantener una referencia espacial coherente al escáner. La pistola de escaneo va emitiendo luz y sonido para ayudar al usuario a captar la mayor información posible, sin alejarse ni acercarse en exceso.

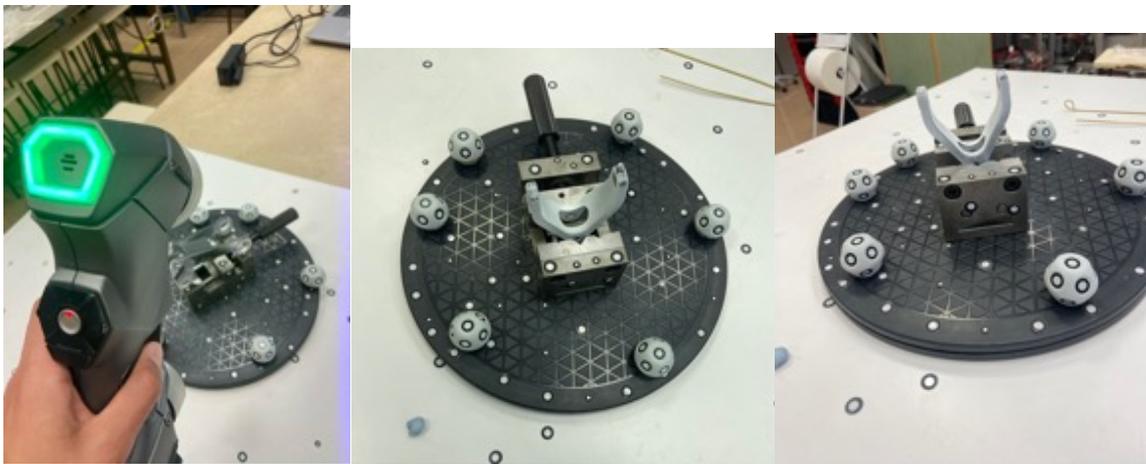


Ilustración 54 Escáner empleado y proceso de escaneado de la bieleta (Fuente: Elaboración propia).

Durante el escaneado, se visualiza en tiempo real el modelo que se está generando sobre la pantalla del ordenador, permitiendo identificar zonas incompletas. Puesto que la fijación de la pieza impide el acceso a distintas caras, se realizan dos escaneados desde distintas posiciones, que posteriormente se fusionarán. Es inevitable que el modelo generado presente ciertas imperfecciones, las cuales serán corregidas y suavizadas digitalmente, dejando una geometría óptima para su manejo en un entorno CAD.

Tras obtener los dos escaneos iniciales de la bieleta desde diferentes posiciones tal como se muestra en la imagen adjunta:



Ilustración 55 Modelos digitales obtenidos del escaneo (Fuente: Elaboración propia).

Se procede al proceso de fusión de ambas nubes de puntos, para facilitar esta operación, se identifican y asignan puntos de correspondencia entre ambas capturas, indicándole manualmente al software qué zonas representan la misma región física en los dos escaneados. Permitiendo al programa alinear y ensamblar ambas geometrías con mayor precisión

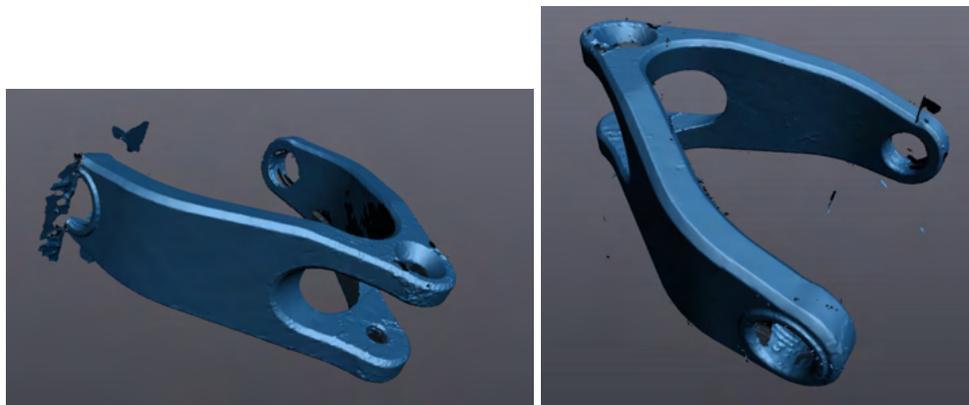


Ilustración 56 Fusión de los dos modelos digitales para crear una única bieleta (Fuente: Elaboración propia).

Ahora se procede a tratar la malla, empleando el conjunto de herramientas que proporciona VXEelements para limpiar, pulir, editar superficies y perfeccionar la pieza.



Ilustración 57 Variedad de herramientas empleadas para la obtención del modelo CAD (Fuente: Elaboración propia).

Durante esta fase, se identifica un inconveniente técnico, ya que la herramienta de extrusión en el programa VXelements requiere de una tarjeta gráfica con ciertas especificaciones técnicas como lo es el uso de una tarjeta gráfica mínima, que no está disponible en el equipo de trabajo habitual. Por ello, se plantea la alternativa de cerrar completamente los agujeros de la pieza en VXelements, generando un modelo completamente sólido y una vez exportado a Solid Edge, reconstruir los agujeros, tomando como referencia las medias reales de la bieleta obtenidas con un calibre.

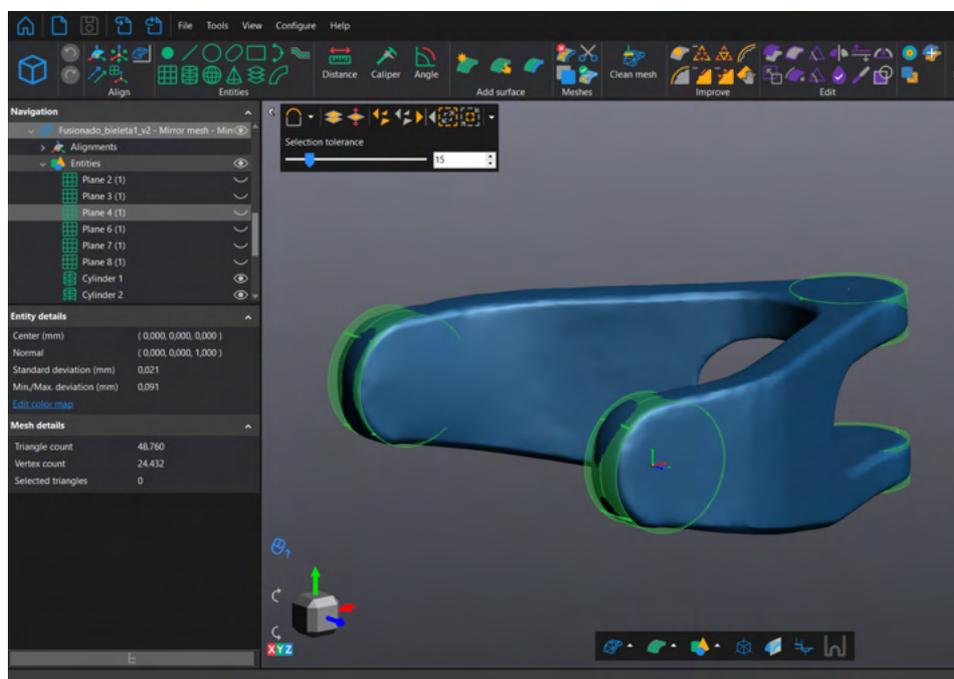


Ilustración 58 Bieleta reconstruida mediante VXelements (Fuente: Elaboración propia).

Una vez finalizada la limpieza y reconstrucción de la pieza, se emplea la herramienta de simetría de mallado con el objetivo de conseguir una pieza completamente simétrica, de cara a un diseño generativo simétrico y mantener el centro de gravedad de la bieleta equilibrado.

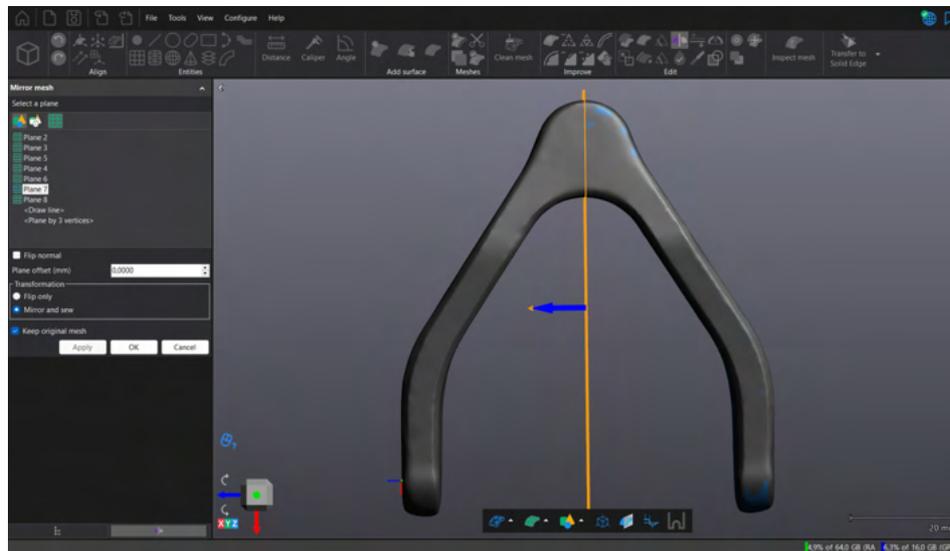


Ilustración 59 Simetría de pieza mediante VXelements (Fuente: Elaboración propia).

Es necesario adaptar la malla generada por el escáner (compuesta por una elevada cantidad de triángulos) mediante un proceso de reducción de malla que permite aligerar el archivo siempre y cuando no se pierdan características geométricas de esta. Cómo se puede visualizar en la siguiente imagen:

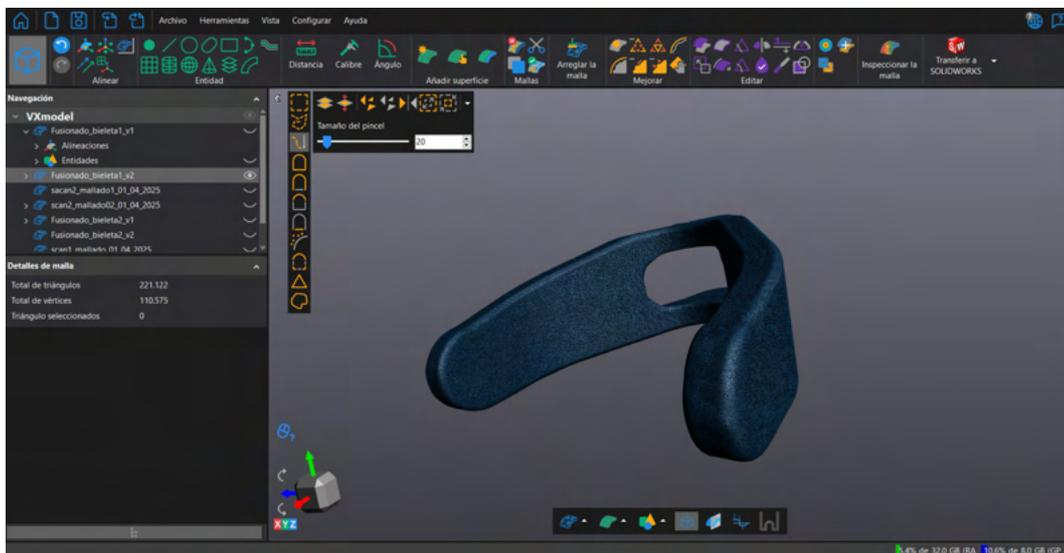


Ilustración 60Mallado inicial (Fuente: Elaboración propia).

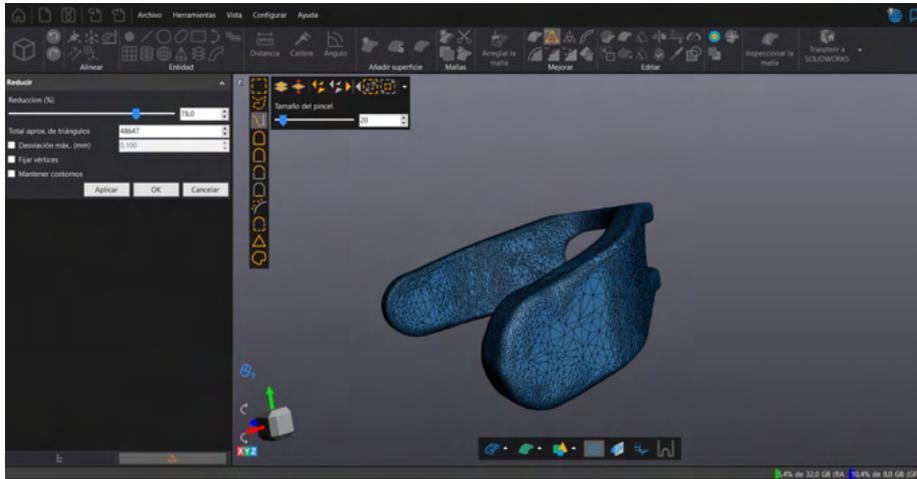


Ilustración 61 Reducción de la malla (Fuente: Elaboración propia).

Una vez ya la pieza lista para su exportación a Solid Edge, se genera la superficie automática y se referencia para poder orientarla correctamente en Solid Edge.

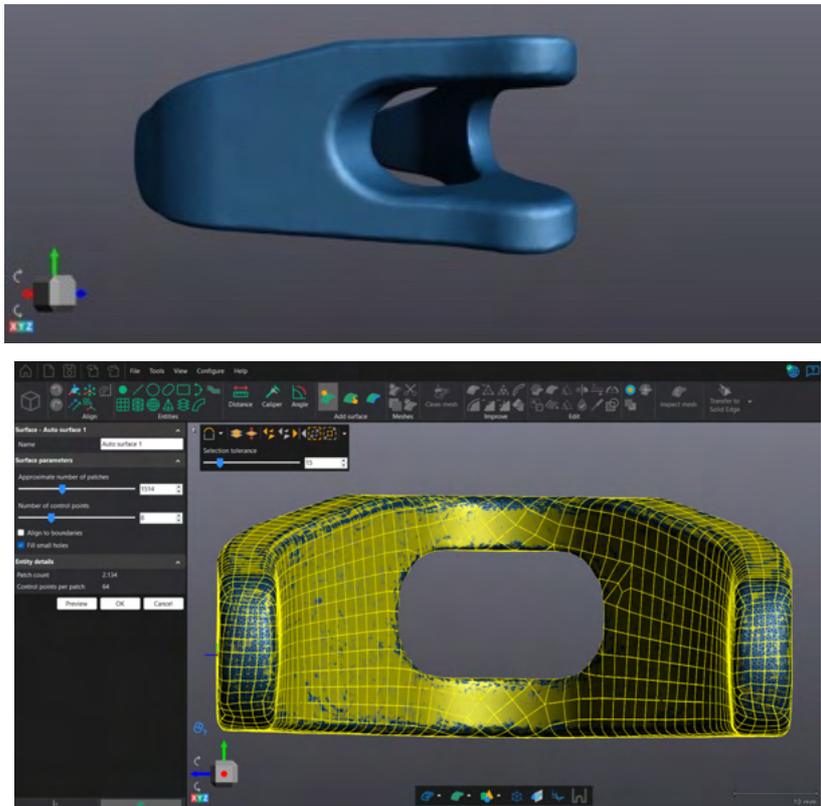


Ilustración 62 Autosurface en VxElements (Fuente: Elaboración propia).

Para exportar la malla a Solid Edge, se transforma en formato .STL, y se inicia un proceso de modelado a partir de superficies de referencia o ingeniería inversa, utilizándose la geometría de la malla como guía para generar cuerpos sólidos y editables.

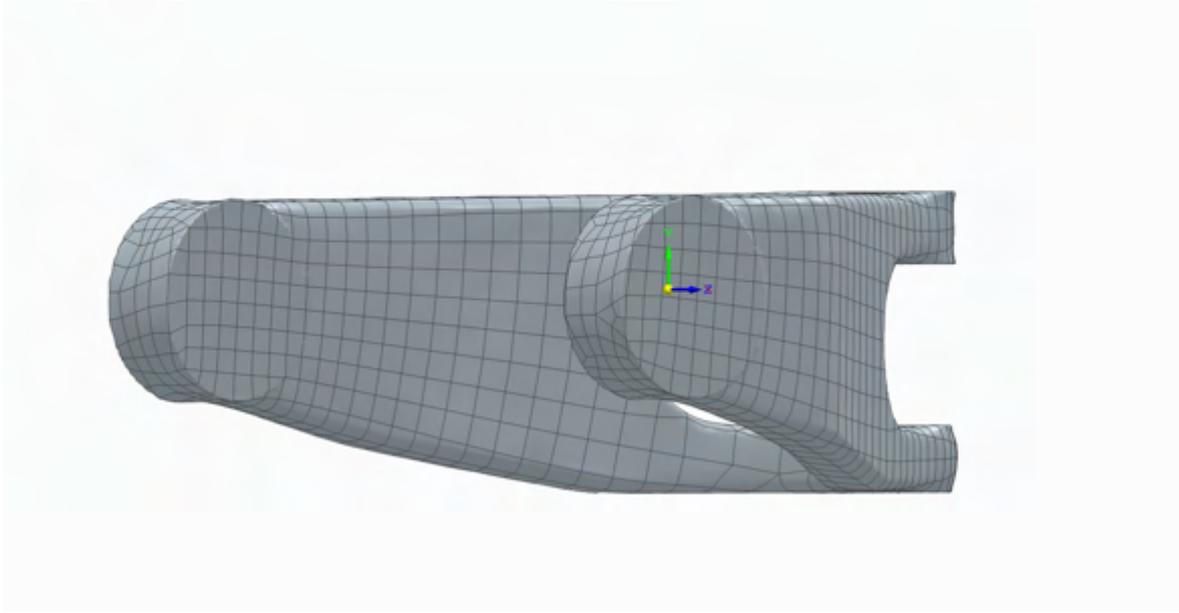
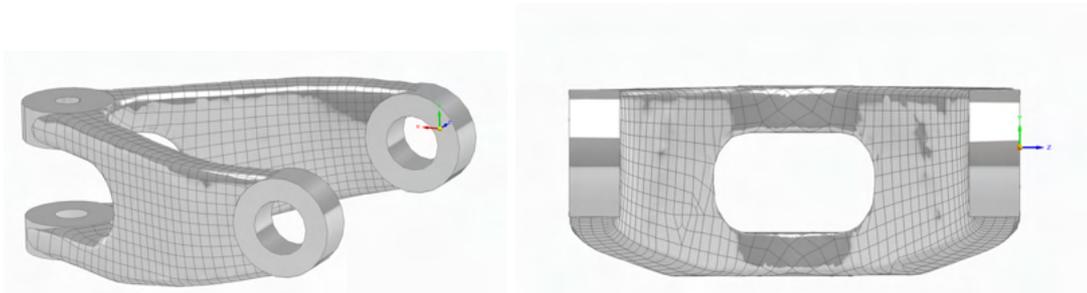


Ilustración 63 Modelo CAD funcional importado a Solid Edge de VXelements (Fuente: Elaboración propia).

Con la bieleta importada en Solid Edge en formato de pieza (.par), se procede a realizar los agujeros correspondientes mediante el comando de extrusión. Las dimensiones se definen con precisión a partir de mediciones realizadas con un calibre sobre la bieleta original. Este permitirá preservar ciertas partes de la geometría original en las fases posteriores de diseño. Cuyo resultado final de la bieleta en Solid Edge, es el siguiente:



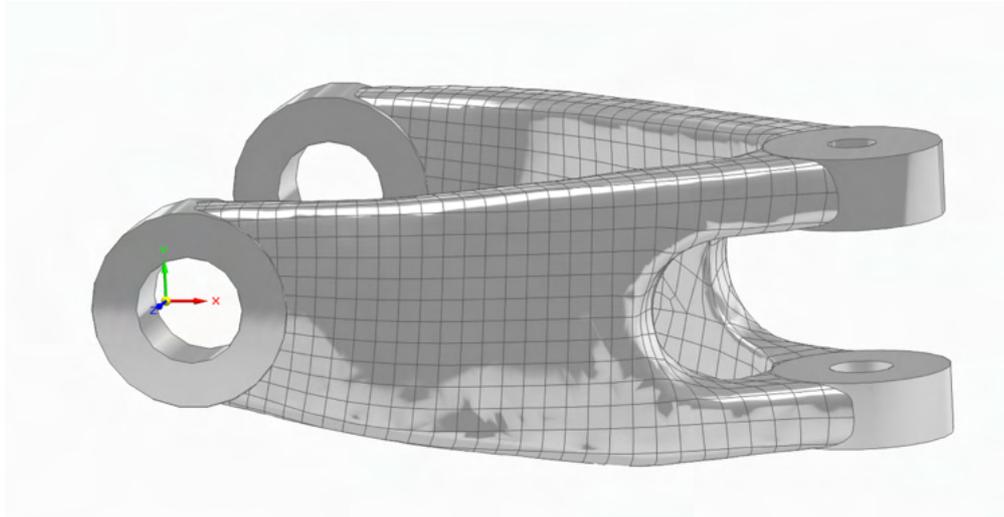


Ilustración 64 Bieleta con los agujeros, material y geometría inicial en Solid Edge (Fuente: Elaboración propia).

5.1.2 VALIDACIÓN MEDIANTE SIMULACIÓN FEM MODELO

Se procede a la validación del modelo optimizado mediante simulación de elementos finitos (FEM). El objetivo de este proceso es comprobar que la bieleta es capaz de soportar las condiciones de carga sin dar lugar a deformaciones plásticas y mantener su comportamiento estructural.

Para ello, se realiza un primer estudio aplicando el estado de cargas N°1, definido anteriormente, con el fin de analizar el comportamiento de la bieleta bajo dicha situación. Esta simulación permite obtener información sobre la distribución de tensiones, desplazamientos. Posibles concentraciones críticas en la geometría resultante.

Se emplea el comando de simulación en Solid Edge. En primer lugar, se determina el material de la pieza a emplear, en este caso es el Aluminio 6061-T6 por sus buenas propiedades mecánicas y su amplia aplicación en componentes de ciclismo. Véase la siguiente imagen de propiedades del Al 6061.

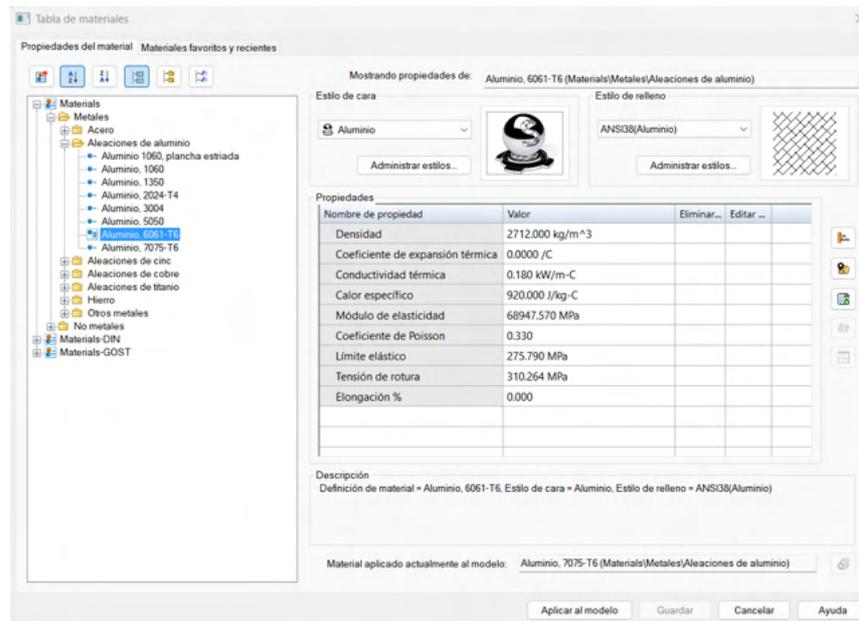


Ilustración 65 Propiedades del Aluminio 6061-T6 (Fuente: Elaboración propia).

A continuación, se definen las condiciones de contorno: se aplica el estado de cargas correspondiente al caso de estudio N°1: $F = 835,313 N$, en cada tirante, aplicada a cada agujero de unión con la bieleta y se fijan los grados de libertad en los orificios delanteros de la bieleta, que corresponden a su punto de articulación con el amortiguador trasero, como se puede comprobar en la siguiente imagen:

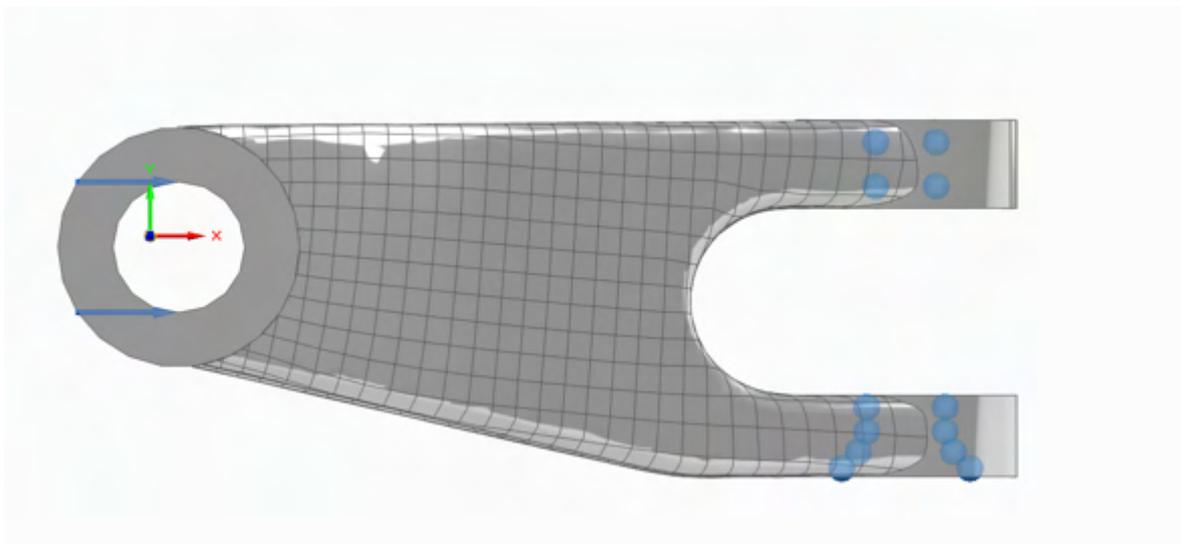


Ilustración 66 Condiciones de contorno aplicadas a la bieleta en Al 6061, según el estado de cargas N°1 (Fuente: Elaboración propia).

Se realiza un mallado previo de la bieleta con un tamaño subjetivo de malla de 1mm y ajustado al cuerpo:

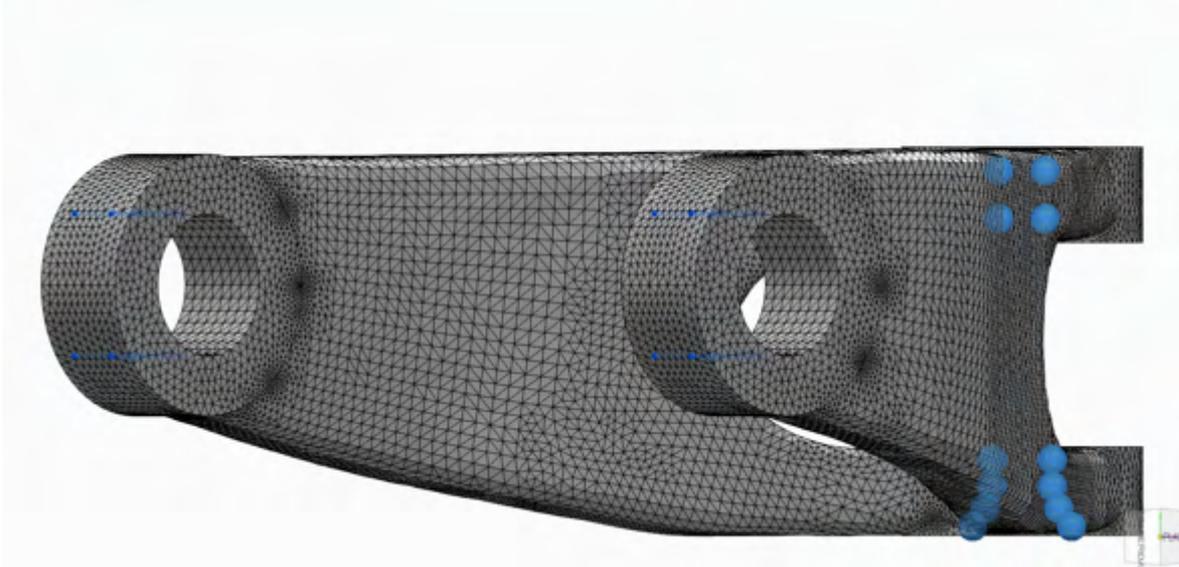
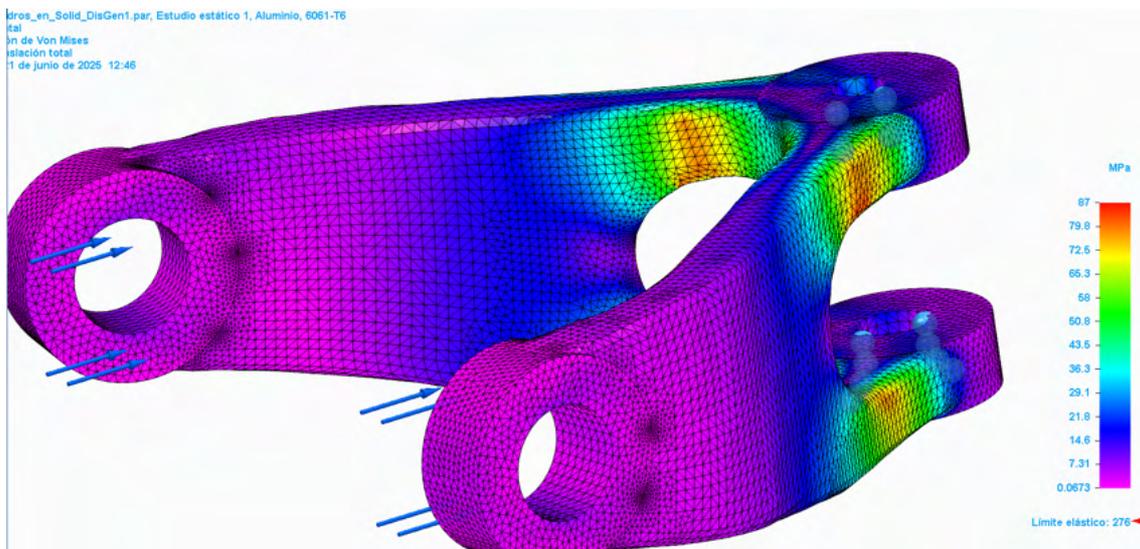


Ilustración 67 Mallado previo a la resolución de la bieleta para el estado de cargas N°1 (Fuente: Elaboración propia).

Una vez configurado el modelo se ejecuta la simulación, obteniéndose los resultados correspondientes a la distribución de tensiones y desplazamientos:



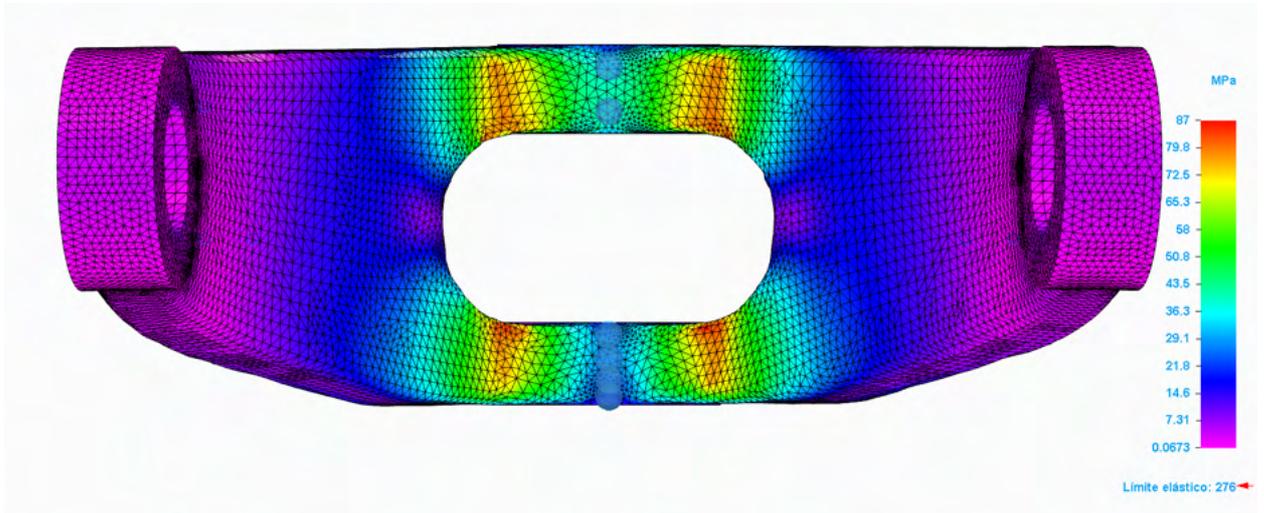


Ilustración 68 Distribución de tensiones de Von Mises obtenida en la simulación FEM del modelo inicial en Al 6061- T6, para el estado de cargas N°1 (Fuente: Elaboración propia).

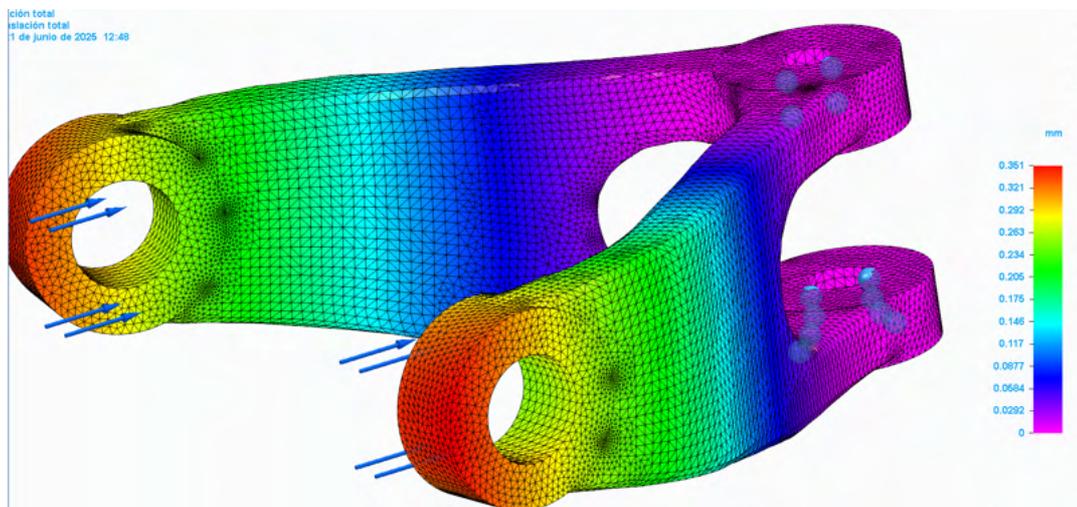


Ilustración 69 Desplazamientos obtenidos en la simulación FEM del modelo inicial en Al 6061- T6, para el estado de cargas N°1 (Fuente: Elaboración propia).

Los resultados de la simulación permiten verificar que la pieza cumple con los requisitos mecánicos del material seleccionado. La tensión máxima obtenida en el modelo es de 87 Mpa en la zona adyacente a los agujeros unidos al amortiguador. Dado que la $\sigma_{\text{max admisible}} = \frac{\text{Límite elástico}}{n} = \frac{275,790 \text{ MPa}}{1,5} = 183,860 \text{ MPa} > 87 \text{ Mpa}$ la pieza no

experimentará deformación plástica y se mantendrá dentro del régimen elástico bajo el estado de cargas número 1.

A continuación, se evalúa el estado de cargas número 3, correspondiente al caso más crítico. Este escenario representa un ensayo de choque, simulando el impacto generado al realizar un salto con bicicleta, tal y como se describió previamente en el apartado correspondiente a estado de cargas.

Se repite el mismo procedimiento, asignando el mismo material y mismas condiciones de contorno, pero en este caso, se introduce una carga de 3760,189 N. Obteniéndose los siguientes resultados:



Ilustración 70 Condiciones de contorno aplicadas a la bieleta en Al 6061, según el estado de cargas N°3

(Fuente: Elaboración propia).

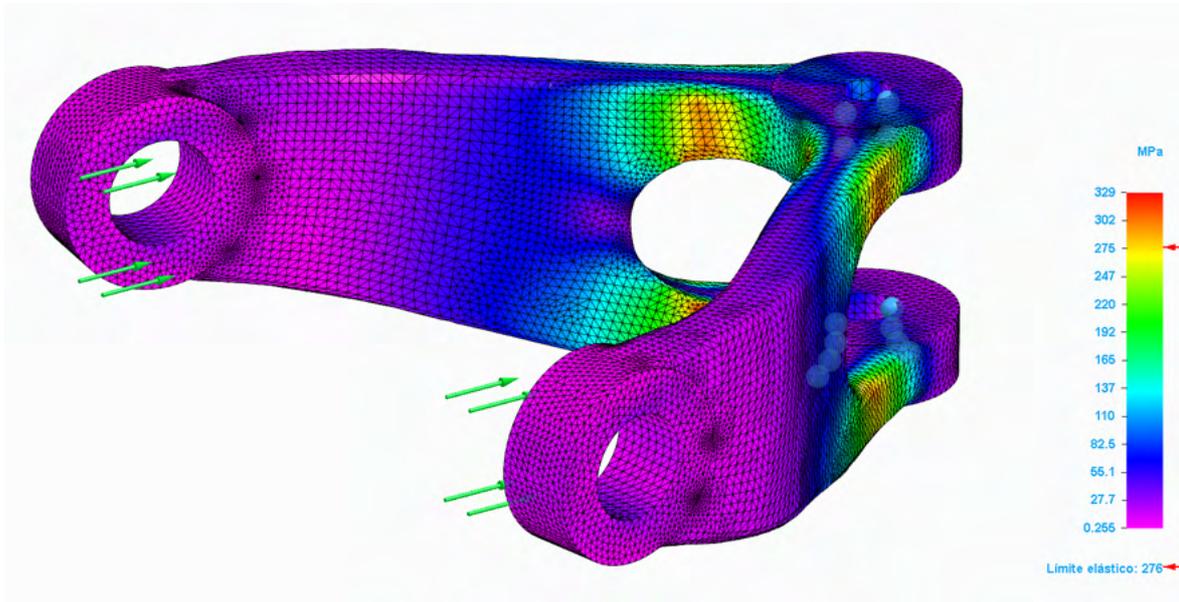


Ilustración 71 Distribución de tensiones de Von Mises obtenida en la simulación FEM del modelo inicial en Al 6061- T6, para el estado de cargas N°3 (Fuente: Elaboración propia).

Se observa que la bieleta no es capaz de resistir el estado de carga más crítico, ya que la tensión máxima obtenida en la simulación es de 329 MPa, superando tanto el límite elástico del material (276 MPa) como la tensión máxima admisible de 183,860 MPa ($n=1,5$). Esto implica que se producirá deformación plástica, comprometiendo la estructura de la bieleta. Como solución, se propone emplear un material con mejores propiedades mecánicas, como lo es el Aluminio 7075-T6, con mayor límite elástico.

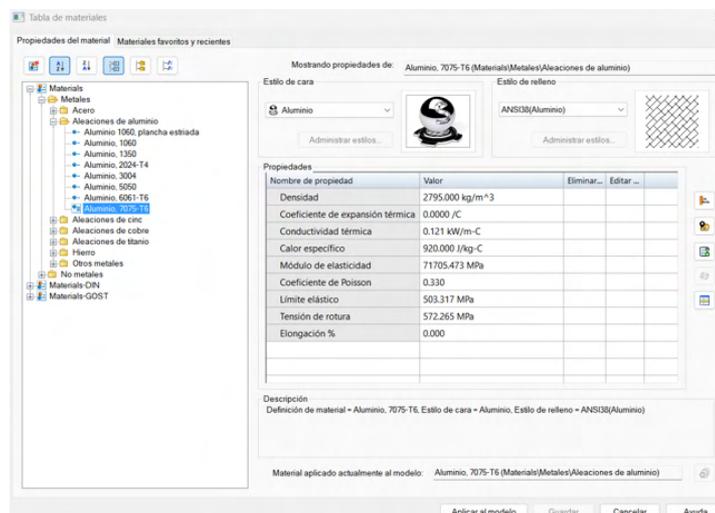


Ilustración 72 Propiedades del Aluminio 7075-T6 (Fuente: Elaboración propia).

A continuación, se realiza la nueva simulación considerando el cambio de material. En las siguientes imágenes se visualizan los resultados obtenidos de la simulación.

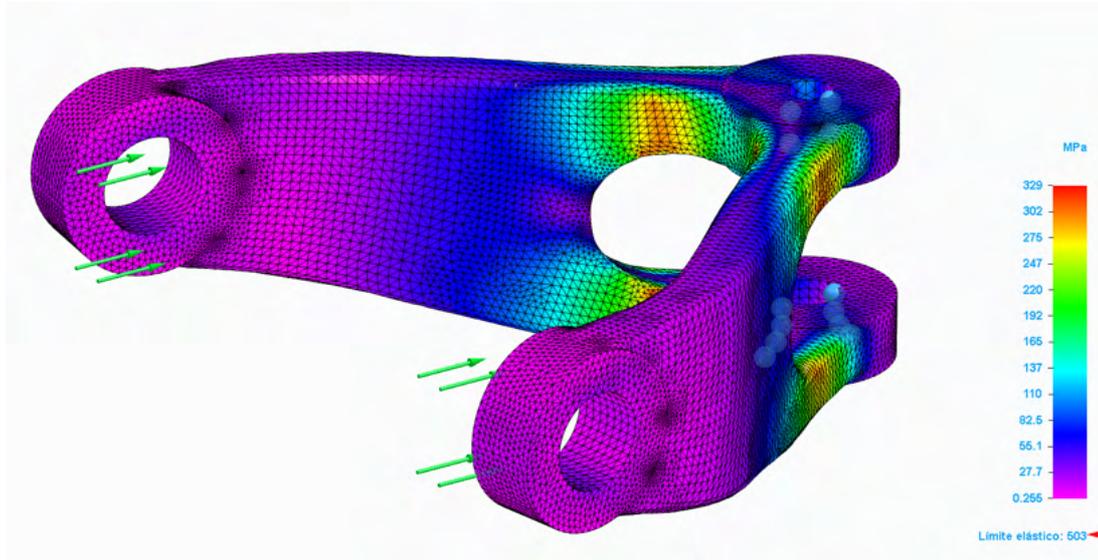


Ilustración 73 Distribución de tensiones de Von Mises obtenida en la simulación FEM del modelo inicial en Al 7075- T6, para el estado de cargas N°3 (Fuente: Elaboración propia).

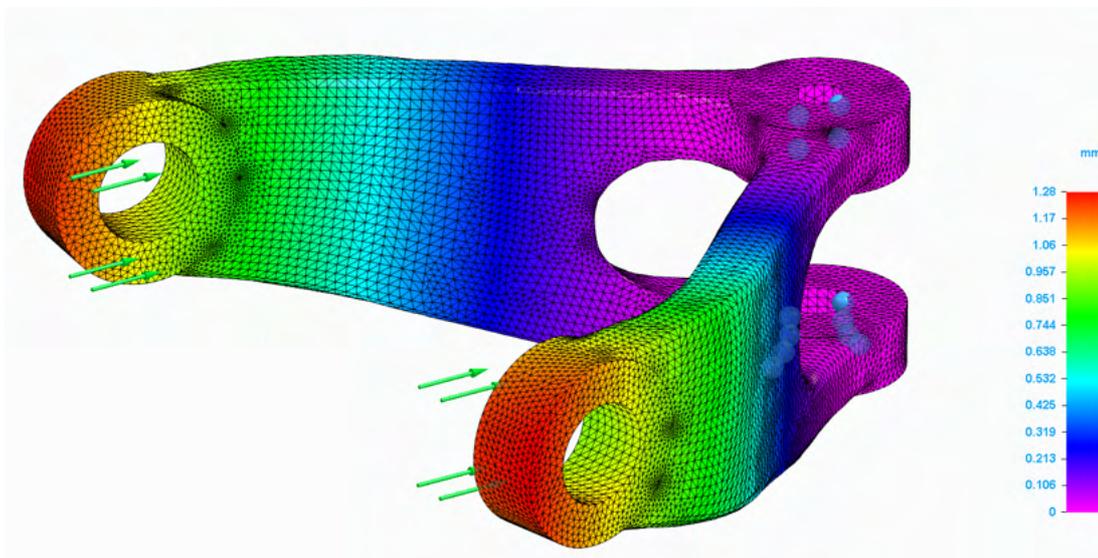


Ilustración 74 Desplazamientos obtenidos en la simulación FEM del modelo inicial en Al 7075- T6, para el estado de cargas N°3 (Fuente: Elaboración propia).

Observándose que la $\sigma_{max\ admisible} = \frac{Límite\ elástico}{n} = \frac{503,317\ MPa}{1,5} = 335,446\ Mpa > 329\ Mpa$, lo que indica que no se producirán deformaciones plásticas. Asimismo, el

desplazamiento máximo es de aproximadamente 1,28mm, valor aceptable en el contexto funcional de la bieleta.

Con esta mejora, se concluye que la pieza es apta para iniciar un proceso de optimización topológica sin deformarse previamente.

5.1.3 OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA

Para llevar a cabo la optimización topológica de la bieleta, se emplea el módulo de Diseño Generativo disponible en Solid Edge. Este proceso se basa en definir adecuadamente las condiciones de contorno, aplicando el estado de carga más desfavorable (Estado de carga 3), así como las restricciones de movimiento correspondientes, se especifican también las regiones que debe preservarse en la geometría final y se impone la condición de simetría con respecto a un plano de simetría para garantizar una geometría simétrica.

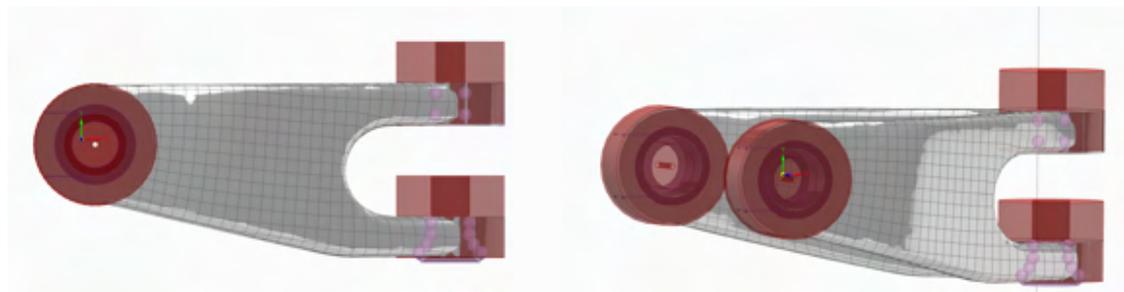


Ilustración 75 Condiciones de contorno empleadas para el diseño generativo en Solid Edge (Fuente: Elaboración propia).

Las fechas moradas indican la fuerza aplicada ($F=3760,189$ N). Las esferas rosas corresponden a las regiones articuladas (agujeros). Las zonas en rojo indican las regiones que deben preservarse del modelo original para mantener la funcionalidad. Finalmente, el plano visible corresponde al plano de simetría definido.

Durante el proceso de optimización topológica surgió un inconveniente, ya que tras realizar varias simulaciones ajustando distintos parámetros, el programa no fue capaz de interpretar correctamente la malla importada desde VXelements. Como consecuencia, las regiones a preservar no se respetan según lo definido por el usuario, lo que da lugar a geometrías erráticas o inconsistentes, no propias de un prototipo de una bieleta optimizada. En las siguientes imágenes se muestran algunas de las iteraciones generadas.

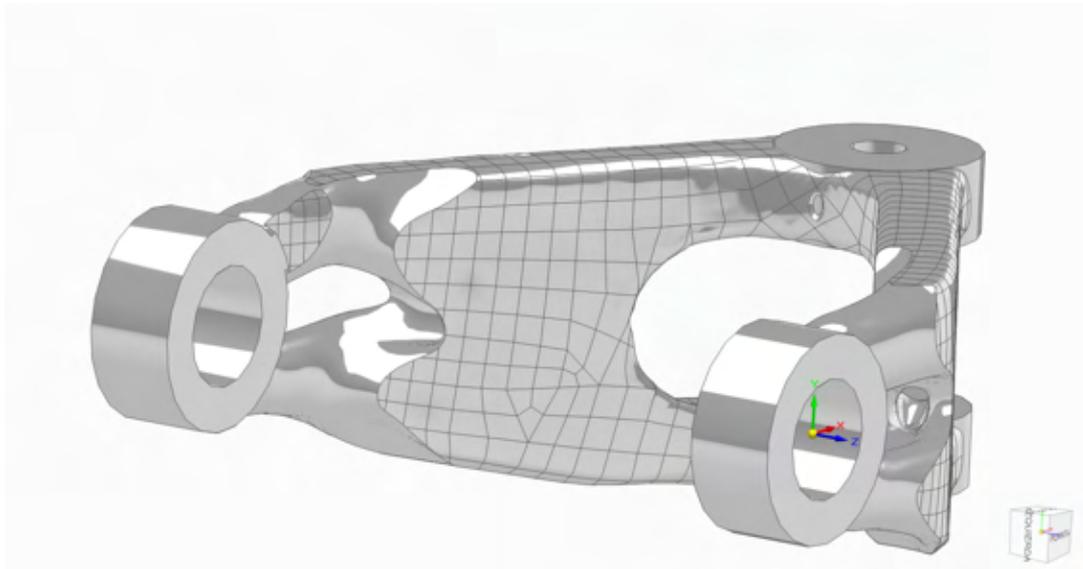


Ilustración 76 Resultados de la optimización topológica con un 18% de reducción de masa (Fuente: Elaboración propia).

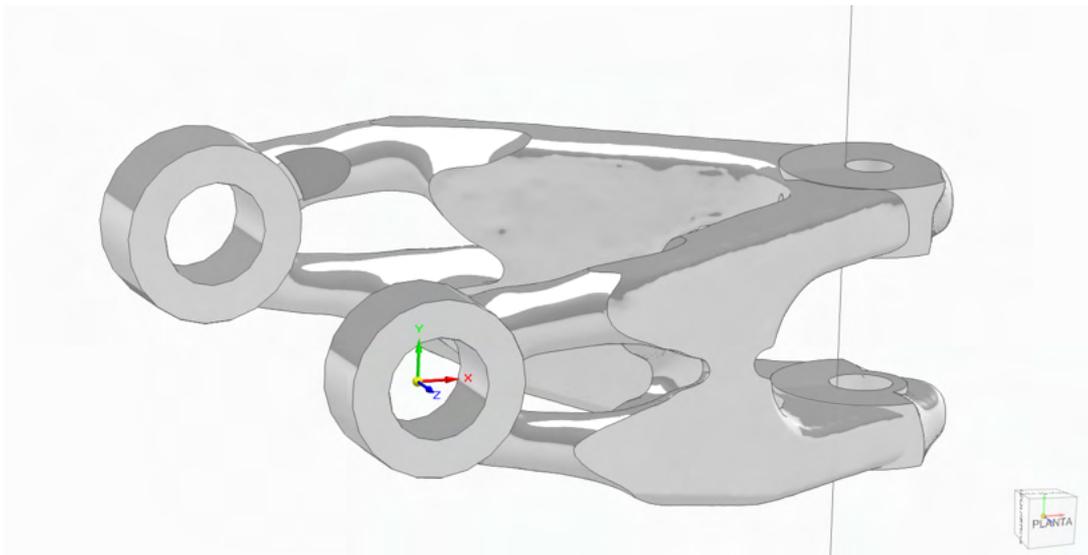


Ilustración 77 Resultados de la optimización topológica con un 24% de reducción de masa (Fuente: Elaboración propia).

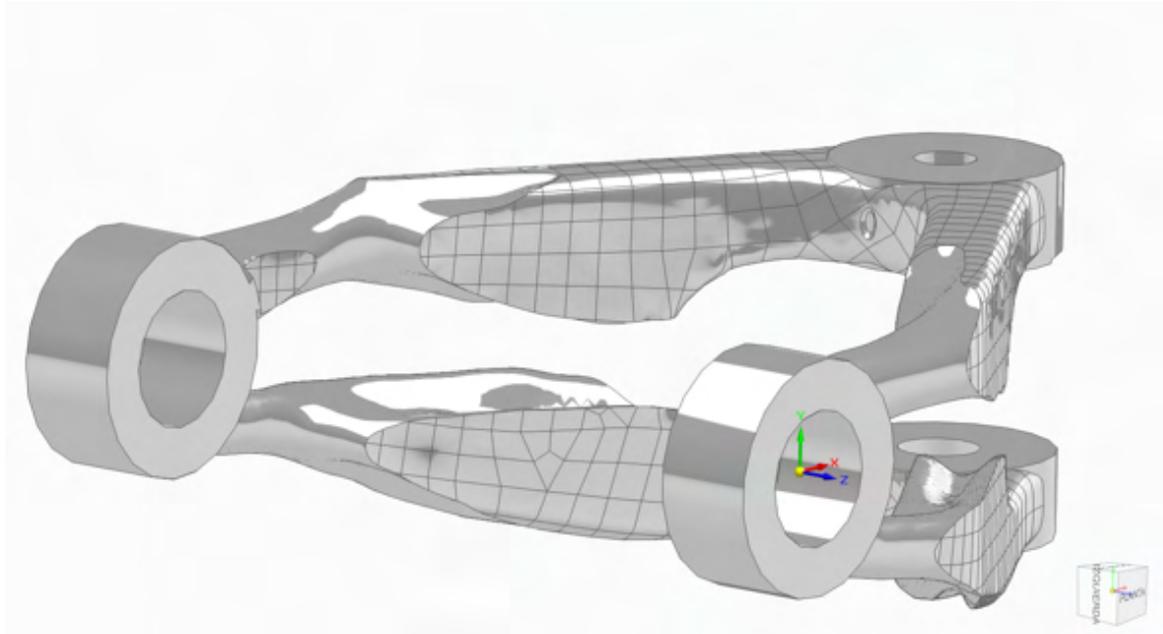


Ilustración 78 Resultados de la optimización topológica con un 30% de reducción de masa (Fuente: Elaboración propia).

Debido a este problema, se plantea el desarrollo de un nuevo prototipo, basado en una reconstrucción manual de la bieleta, partiendo de la geometría escaneada como referencia. Tal y como se muestra a continuación.

5.2 PROTOTIPO 2

5.2.1 OBTENCIÓN MODELO CAD

Tras las dificultades encontradas durante el desarrollo del primer prototipo, relacionadas con errores en la interpretación de la malla escaneada a la hora de aplicar la optimización topológica, se toma la decisión de replantear la estrategia. Como alternativa, se decide desarrollar un segundo prototipo, basado en un diseño modelado desde cero en Solid Edge, obteniendo la geometría y las medidas reales de la pieza previamente mallada en Solid Edge del prototipo 1. Este cambio permite que el software interprete correctamente los límites geométricos y las condiciones de contorno, garantizando mayor fiabilidad en los resultados obtenidos.

El proceso comienza desde la base del prototipo 1, con la creación de un boceto bidimensional en el plano de planta, representando la mitad de la bieleta, aprovechando su simetría, según se muestra en la imagen adjunta.

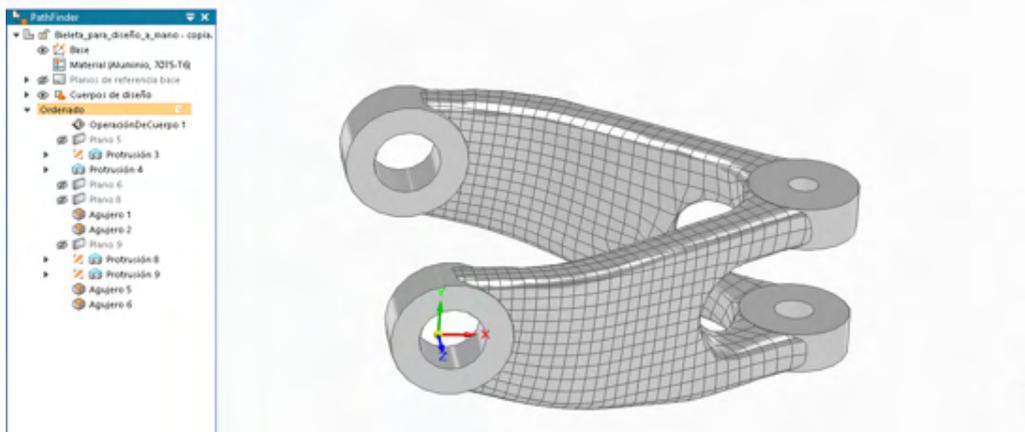


Ilustración 79 Modelo CAD inicial del prototipo N°1 del que se parte para el desarrollo del prototipo N°2 (Fuente: Elaboración propia)

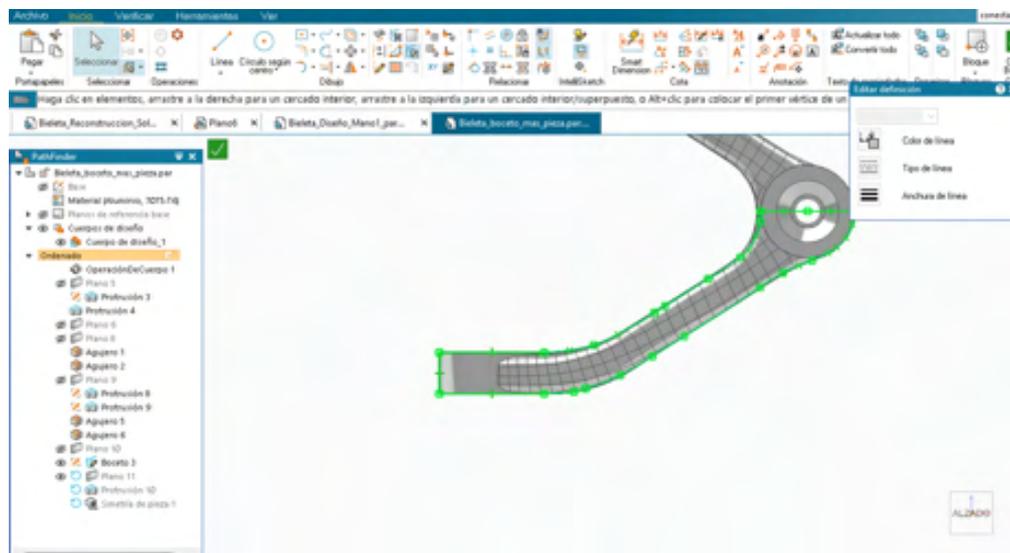


Ilustración 80 Creación de bocetos para la reconstrucción de la pieza en Solid Edge (Fuente: Elaboración propia).

Este boceto, permite captar los contornos esenciales de la pieza original para la extrusión. Se crea un nuevo archivo de pieza (.par) en Solid Edge, donde se pega el boceto anterior como base de trabajo. Para garantizar la simetría, se define un eje de simetría central a partir del cual se refleja el perfil obteniendo el contorno completo de la bieleta. Una vez definido,

se procede a extruir en la dirección perpendicular al plano de trabajo hasta la altura total de la bieleta, previamente medida. Cómo se muestra a continuación:

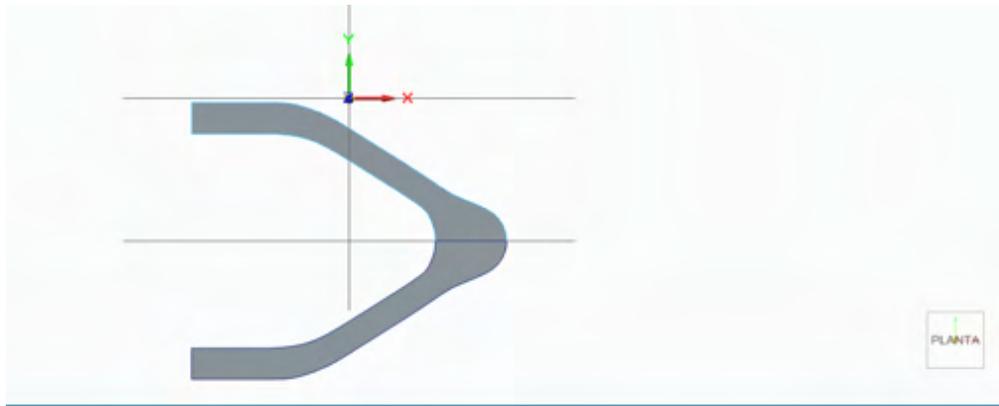


Ilustración 81 Definición de la planta de la pieza en Solid Edge (Fuente: Elaboración propia).

Una vez definido la planta de la bieleta, procedemos con el perfil. Para ello, se recrea el boceto bidimensional del perfil de la bieleta, manteniendo las relaciones geométricas establecidas, como conexiones y curvas con uniones tangentes.

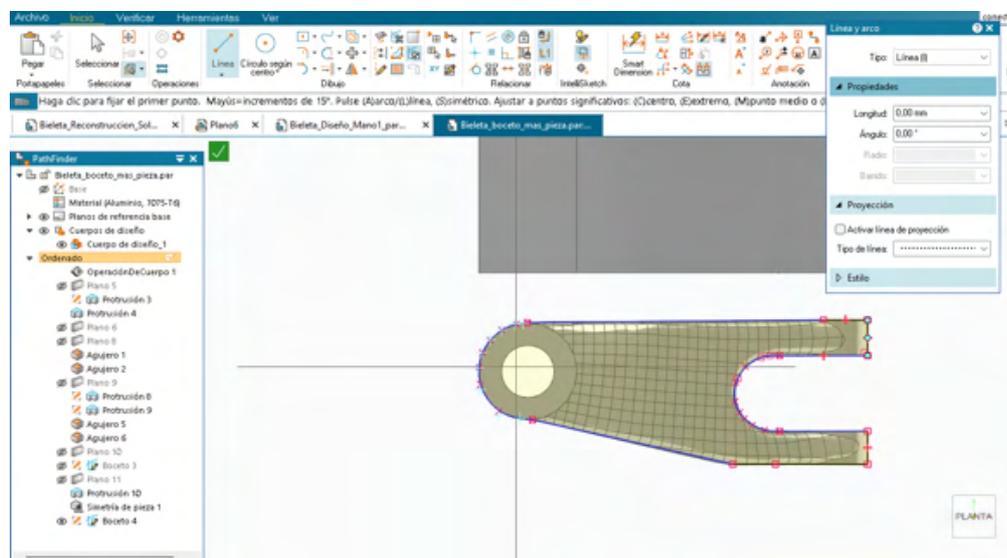


Ilustración 82 Boceto del perfil de la pieza en Solid Edge, extraído de la base del prototipo N°1 (Fuente: Elaboración propia).

Se realiza la extrusión, hasta alcanzar el lateral opuesto de la bieleta. Se genera un volumen de material sobrante, que no corresponde con la forma real de la pieza, que se ha de eliminar, para ello se modifican los bocetos iniciales de la planta y con la herramienta extruir, cortar.

Se va vaciando todo el material sobrante hasta obtener la forma de la bieleta precisa. Como se puede visualizar a continuación.

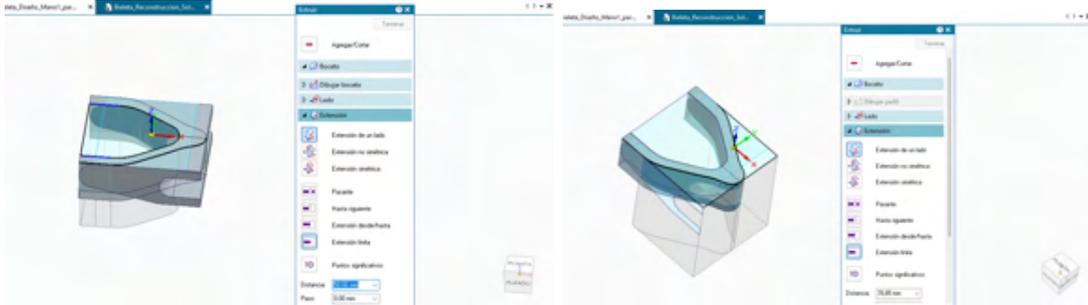


Ilustración 83 Extrusiones en Solid Edge, para obtener la geometría final de la bieleta reconstruida (Fuente: Elaboración propia).



Ilustración 84 Bieleta reconstruida, sin agujeros (Fuente: Elaboración propia).

Se procede a realizar los agujeros. Para ello, se toman las medidas reales obtenidas con el pie de rey sobre la bieleta física. Dos de ellos de diámetro 10.92mm sobre los laterales; en la parte superior de 5mm; y en la inferior un agujero avellanado de diámetro exterior 12mm e interior 6.5mm.



Ilustración 85 Bieleta reconstruida, con agujeros (Fuente: Elaboración propia).

5.2.2 VALIDACIÓN MEDIANTE SIMULACIÓN FEM MODELO

En este apartado se procede a estudiar la viabilidad estructural de la bieleta diseñada, se lleva a cabo una simulación mediante el método de elementos finitos (FEM). En este análisis se evalúan los estudios de carga realizados previamente, en concreto el estado de cargas número 3 que se corresponde con el más crítico, tal y como se ha analizado y comprobado en el prototipo N°1.

Con el objetivo de garantizar la resistencia de la bieleta ante esta situación, se define el material de la pieza como aluminio 7075-T6, debido a sus mejores propiedades mecánicas en comparación con el aluminio 6061 como se ha podido comprobar en el prototipo N°1 al someter el estado de cargas número 3, y no aguantar con un coeficiente de seguridad de $n=1.5$.

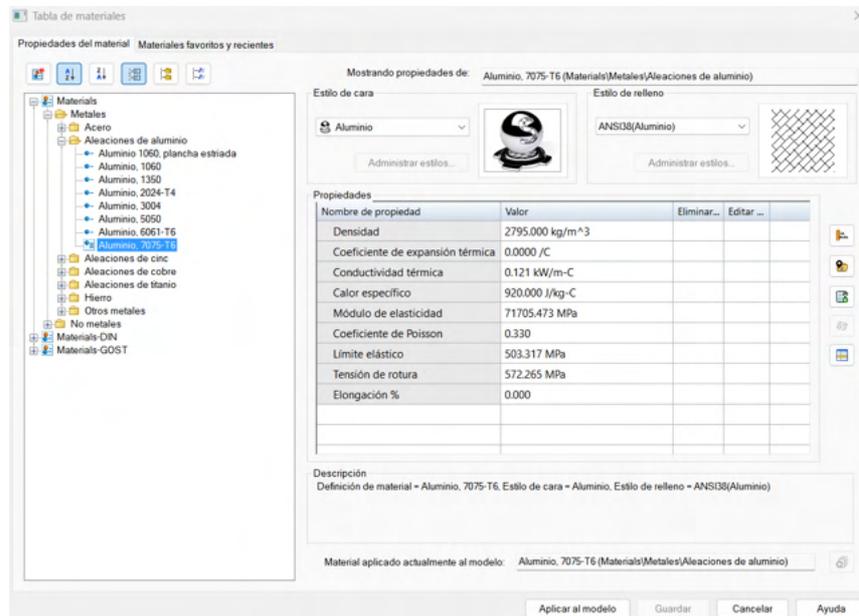


Ilustración 86 Propiedades del Aluminio 7075-T6 (Fuente: Elaboración propia).

Se procede a realizar el ensayo, para ello hay que determinar previamente las fuerzas aplicadas, y restricciones requeridas.

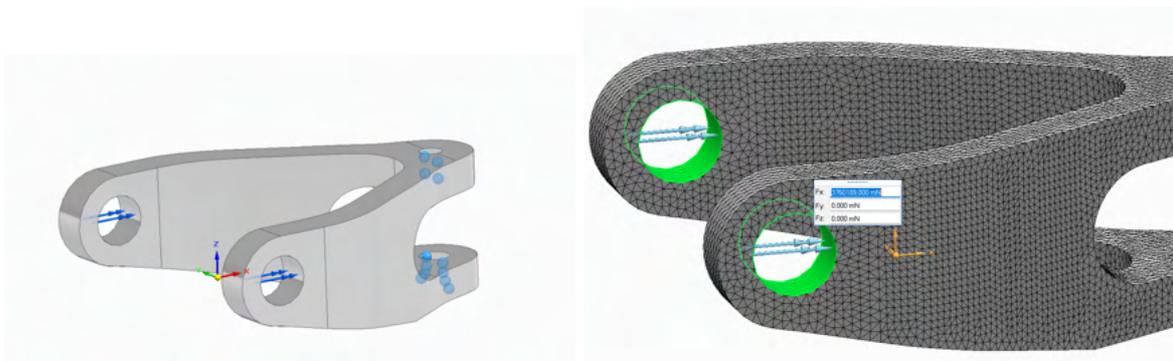
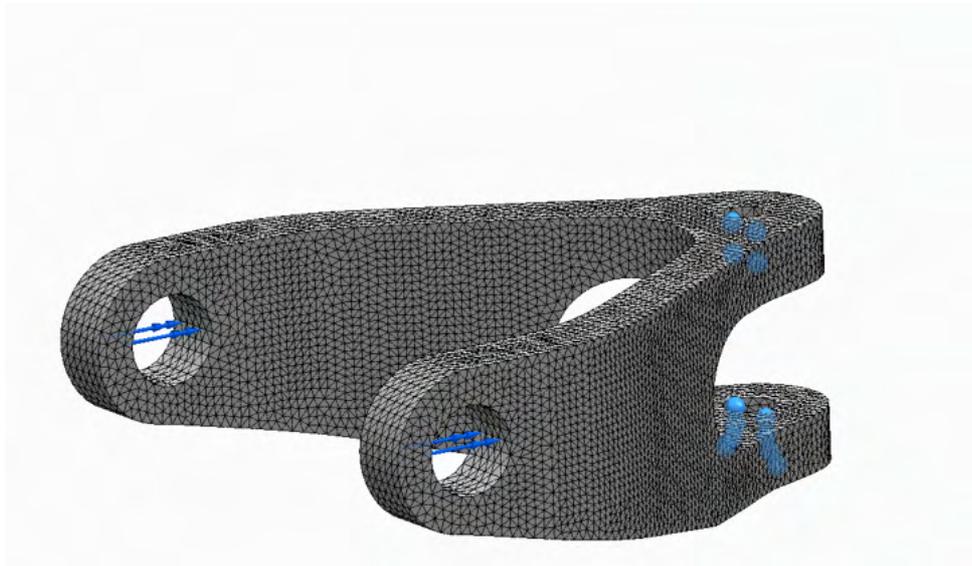


Ilustración 87 Condiciones de contorno aplicadas a la bieleta en Al 7075-T6, según el estado de cargas N°3 (Fuente: Elaboración propia).

Se aplican las fuerzas correspondientes al estado de cargas evaluado donde $F = 3760,189 \text{ N}$ para cada tirante, aplicadas en el sentido indicado en la imagen. A sí mismo, se impone la restricción de que los agujeros que van conectados al amortiguador trasero queden articulados.

Se crea la malla y se resuelve, obteniendo los siguientes resultados.



*Ilustración 88 Condiciones de contorno aplicadas a la bieleta en Al 7075, según el estado de cargas N°3
(Fuente: Elaboración propia).*

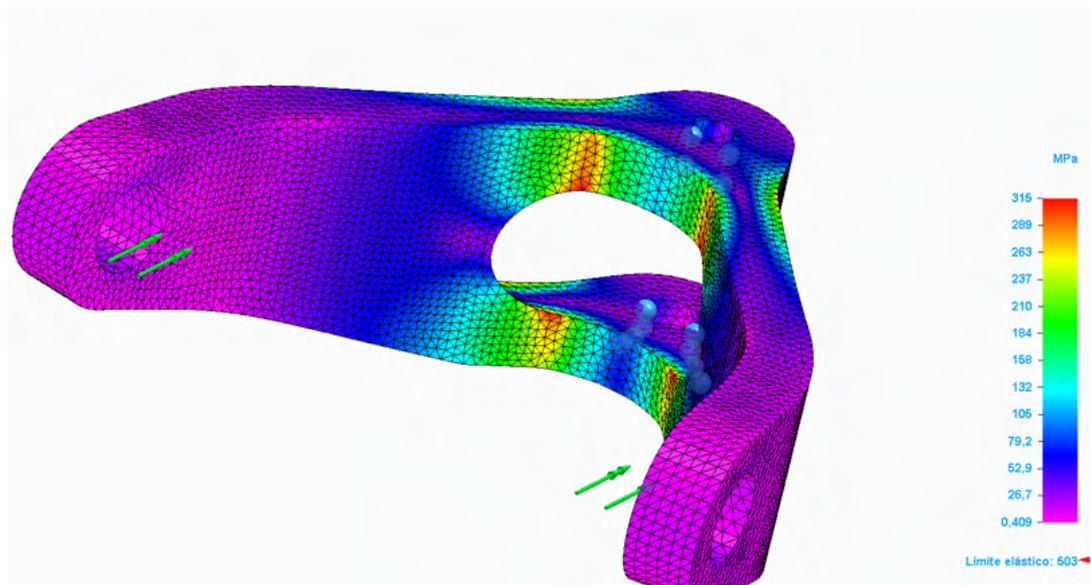


Ilustración 89 Distribución de tensiones de Von Mises obtenida en la simulación FEM en Al 7075- T6, para el estado de cargas N°3 (Fuente: Elaboración propia).

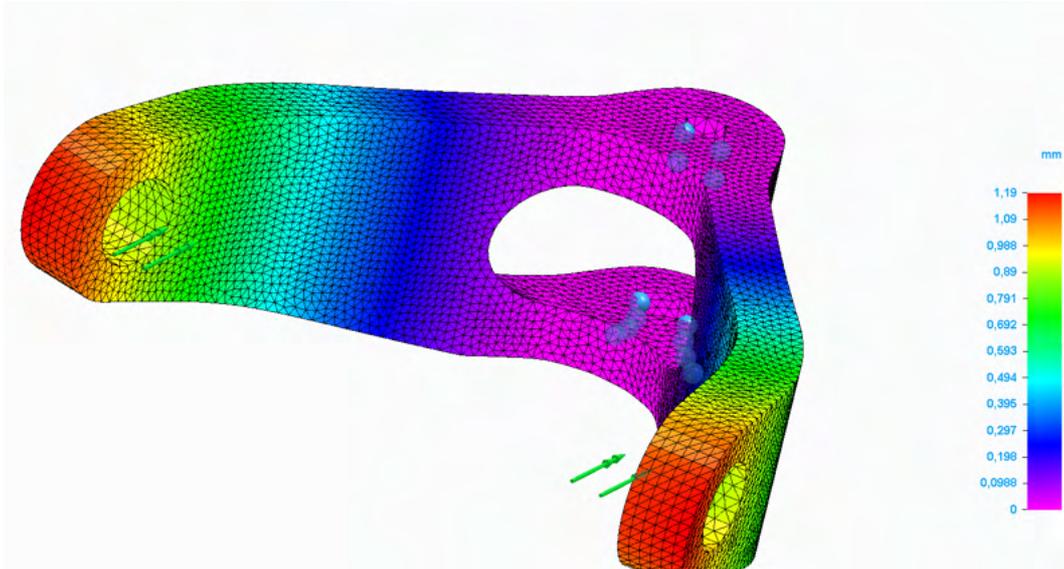


Ilustración 90 Desplazamientos obtenidos en la simulación FEM en Al 7075- T6, para el estado de cargas N°3 (Fuente: Elaboración propia).

Se observa que la tensión máxima que sufre la bieleta en el estado de cargas 3 equivale a 315 MPa, valor que queda por debajo del límite elástico aplicando el coeficiente de seguridad ($n=1.5$), $\sigma_{\text{max admisible}} = \frac{\text{Límite elástico}}{n} = \frac{503,317 \text{ MPa}}{1,5} = 335,446 \text{ Mpa} > 315 \text{ Mpa}$. Por

lo que, si se puede aplicar optimización topológica ya que la bieleta, no rompe.

El desplazamiento máximo se genera en la sujeción con los tirantes traseros, llegando a un valor máximo de 1,19mm.

5.2.3 OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA

Tras la validación mediante simulación FEM y una vez verificado que el modelo de bieleta es viable, se procede a realizar la optimización topológica con el objetivo de reducir la masa sin comprometer el comportamiento mecánico.

El proceso se lleva a cabo en apartado de diseño generativo dentro de Solid Edge. El cual permite identificar zonas del volumen original que no contribuyen significativamente a la resistencia estructural, y por tanto pueden ser eliminadas.

Se introducen las siguientes condiciones en el entorno de simulación: Entorno de diseño, la bieleta original; las fuerzas correspondientes al estado de cargas número 3; preservado de

regiones donde se limitan aquellas zonas que no deben ser modificadas por la optimización, agujeros articulados y plano de simetría para que la optimización sea simétrica.

Para las iteraciones realizadas, se emplea un sistema de fuerzas, simetría de plano y articulación de agujeros común para todos:

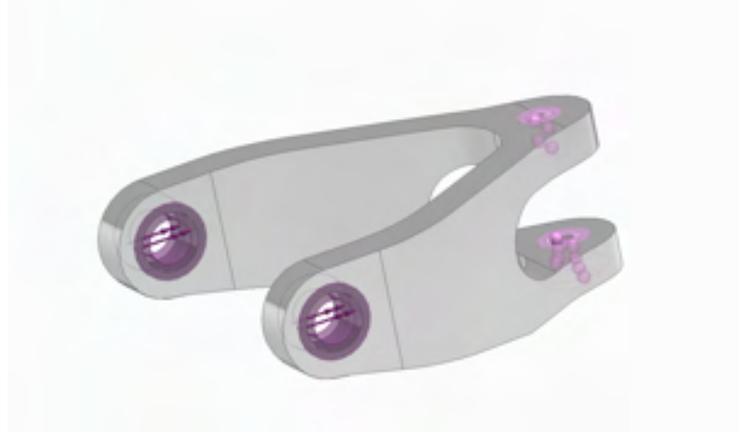


Ilustración 91 Fuerzas y articulaciones empleadas para el diseño generativo en Solid Edge (Fuente: Elaboración propia).

Se varía la región preservada y la cantidad de material indicado a reducir en las diferentes iteraciones, como puede visualizarse en las siguientes imágenes:

-Iteración 1:

En esta simulación se preserva la siguiente región:

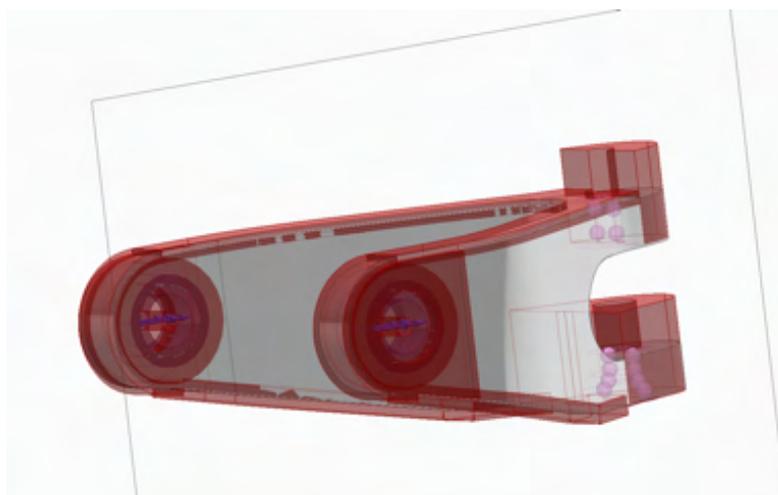


Ilustración 92 Condiciones de contorno empleadas para el diseño generativo en Solid Edge en la iteración 1 (Fuente: Elaboración propia).

Se aplica una reducción del 17%

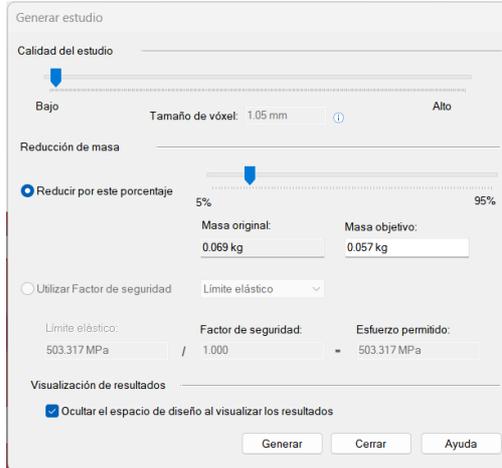


Ilustración 93 Reducción del peso en un 17% de masa aproximadamente (Fuente: Elaboración propia).

Obteniendo el resultado:

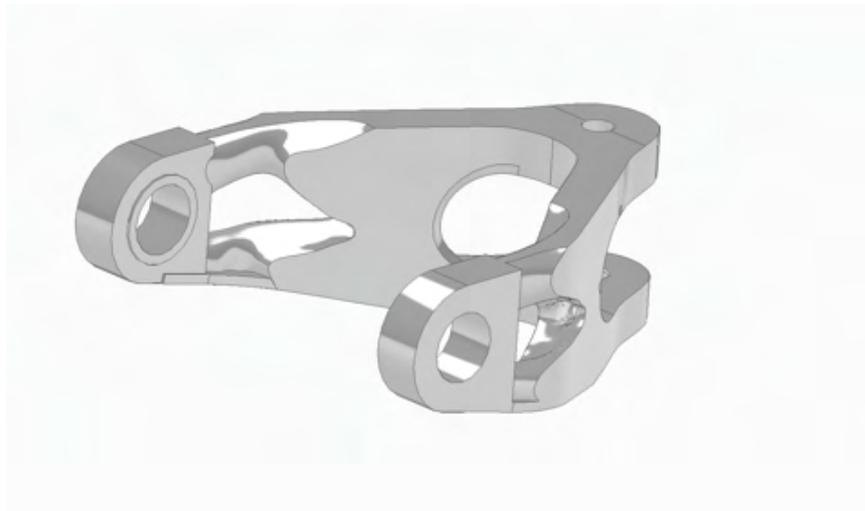


Ilustración 94 Optimización topológica de la bieleta a un 17% de reducción de masa para la iteración 1 (Fuente: Elaboración propia).

Se concluye que la región preservada alrededor de los agujeros que sujetan el tirante puede ser eliminada puesto que no están sometidos a una tensión elevada y permitiría reducir todavía más la masa de la bieleta.

-Iteración 2:

Se ajusta la región preservada:

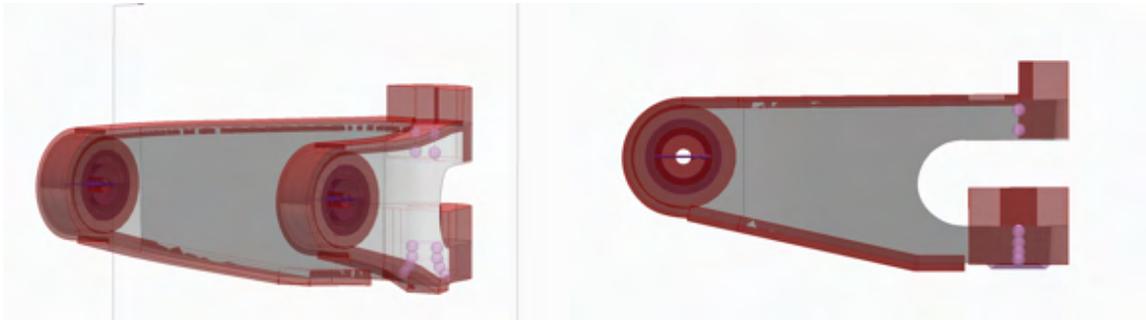


Ilustración 95 Condiciones de contorno empleadas para el diseño generativo en Solid Edge en la iteración 2 (Fuente: Elaboración propia).

Y una reducción de masa del 24% aproximadamente:

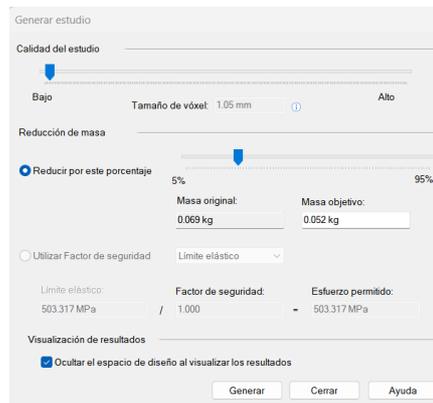


Ilustración 96 Reducción del peso en un 24% de masa aproximadamente (Fuente: Elaboración propia).

Obteniendo el resultado:

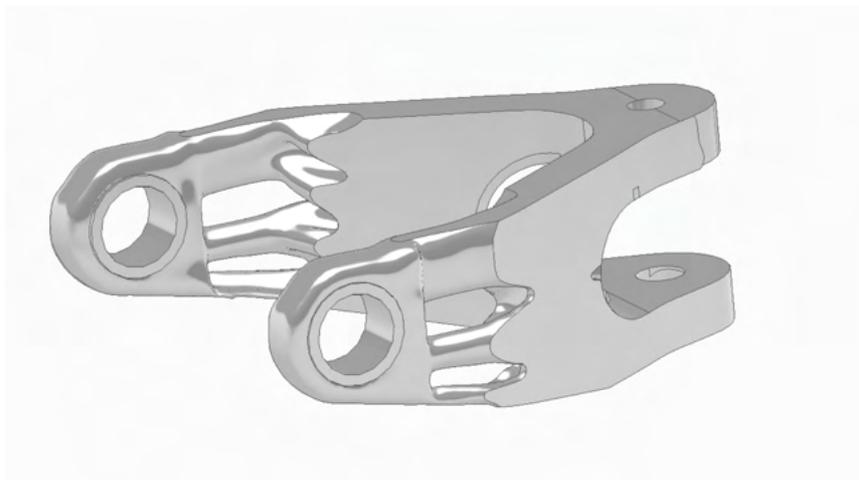


Ilustración 97 Optimización topológica de la bieleta a un 24% de reducción de masa en la iteración 2 (Fuente: Elaboración propia).

Se observa que queda una geometría un tanto errática y no termina de preservar las regiones preestablecidas, por lo que se toma la decisión de reducir la reducción de masa de la bieleta final.

-Iteración 3:

Se procede a ajustar la reducción de masa a un 21% aproximadamente, pasando de una masa inicial de 0,069 Kg a 0,055 Kg.

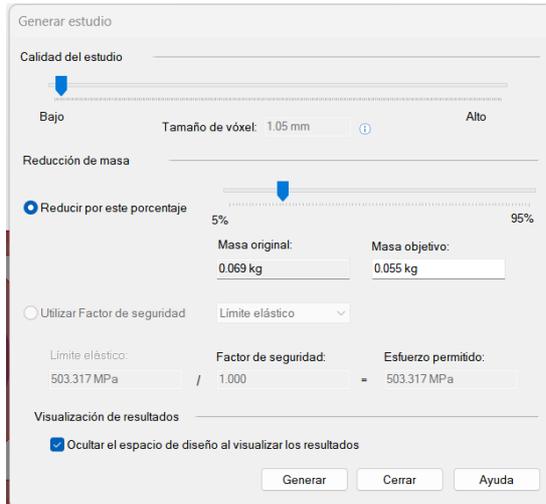
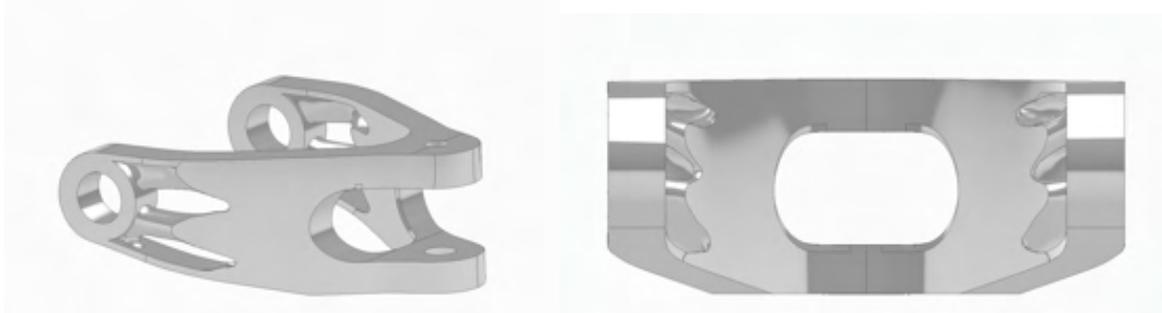


Ilustración 98 Reducción del peso en un 21% de masa aproximadamente (Fuente: Elaboración propia).

Cuyo resultado es:



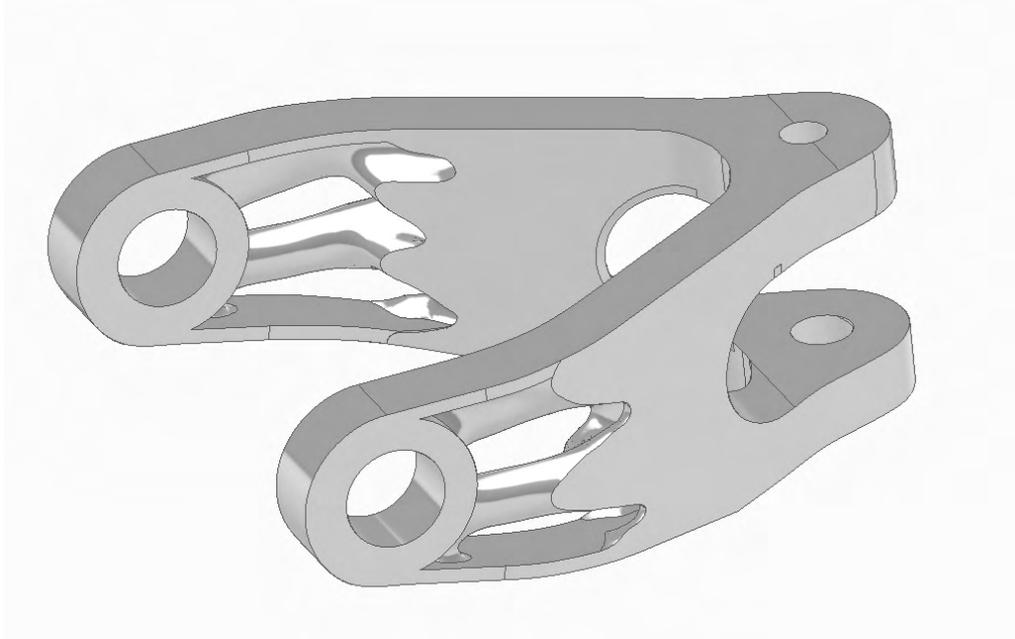


Ilustración 99 Resultado final, prototipo N°2. Con una reducción del 21% de masa (Fuente: Elaboración propia).

Esta versión presenta una distribución del material óptima, con una reducción de masa final de 21%. Ha sido considerada como la definitiva para su posterior análisis estructural y refinamiento sin comprometer su comportamiento.

Se ha de mencionar que el programa no termina de interpretar al 100% las solicitudes indicadas, se han llevado a cabo numerosas iteraciones, ajustando diferentes parámetros (tamaño del vórtex, reducción de masa y regiones preservadas). Hasta llegar a la geometría deseada, siendo estas 3 las más significantes para lograr el diseño final.

5.2.4 VALIDACIÓN MEDIANTE SIMULACIÓN FEM DEL MODELO OPTIMIZADO

Una vez obtenida la bieleta optimizada con una reducción de masa del 21% respecto al diseño original, se procede a validar su comportamiento estructural frente al estado de cargas número 3, previamente descrito, a través del método de elementos finitos como se realizó con la pieza original.

Se crea un nuevo estudio, con el material: Aluminio, 7075-T6. Asignamos las cargas soportadas, y las articulaciones correspondientes, como se indica a continuación:

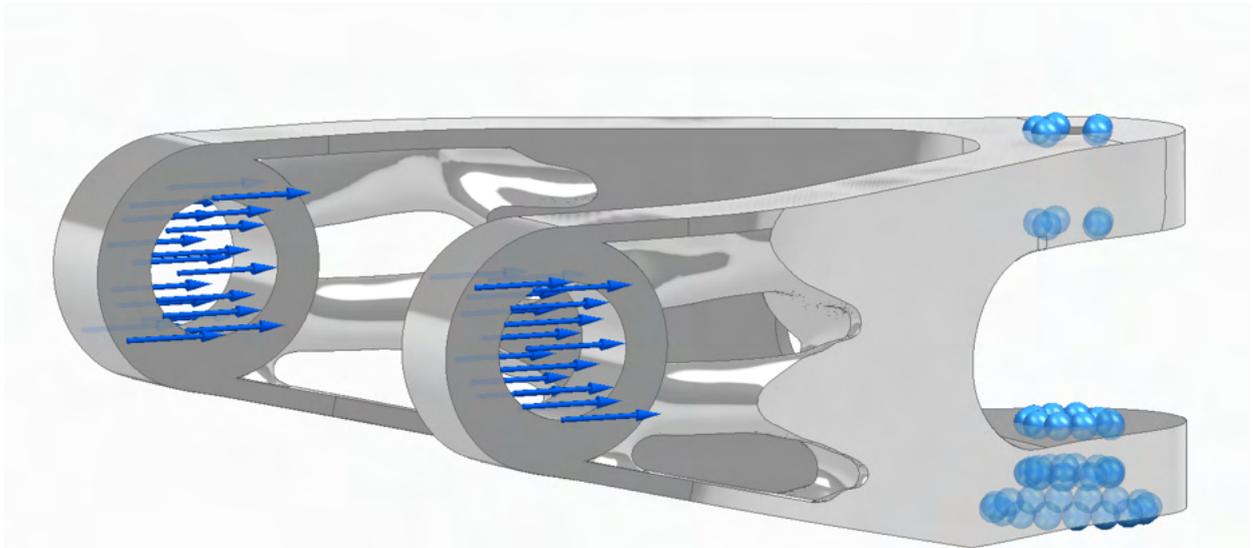


Ilustración 100 Condiciones de contorno aplicadas al prototipo N°2 en Al 7075-T6, según el estado de cargas N°3 (Fuente: Elaboración propia).

Se malla la pieza:

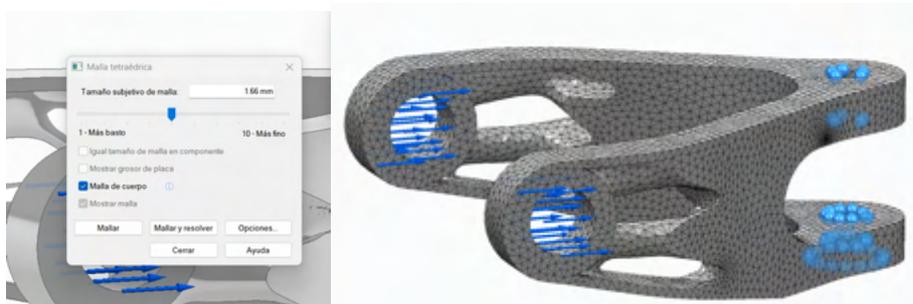


Ilustración 101 Mallado de la pieza, previo a la resolución (Fuente: Elaboración propia).

Se resuelve la simulación:

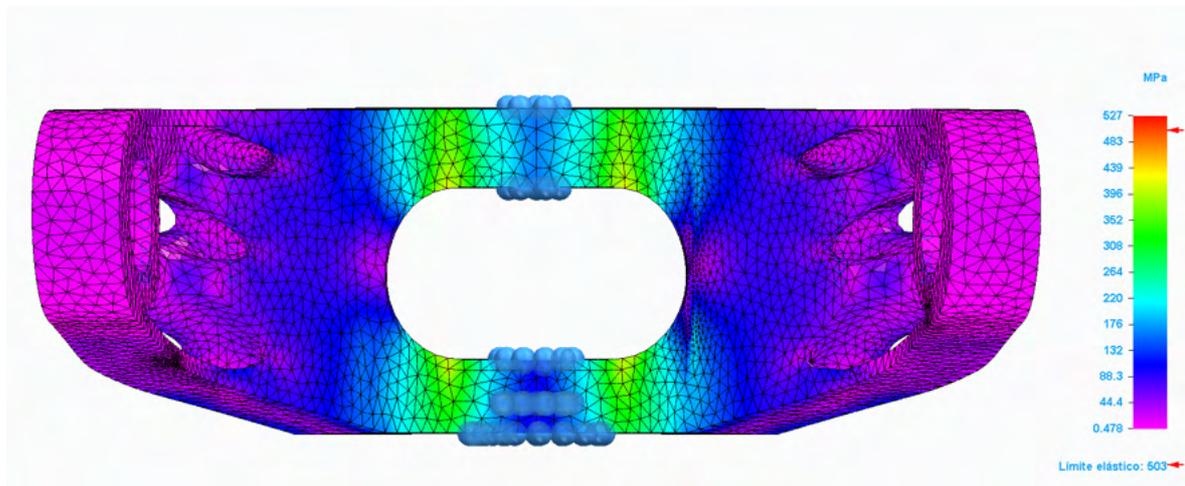
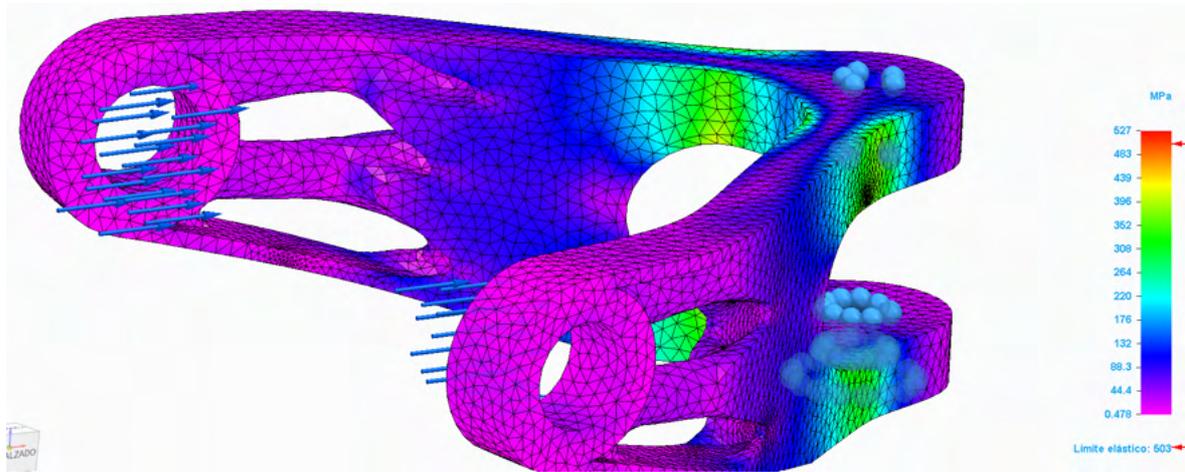


Ilustración 102 Distribución de tensiones de Von Mises obtenida en el prototipo N°2 tras la simulación FEM, en Al 7075- T6, para el estado de cargas N°3 (Fuente: Elaboración propia).

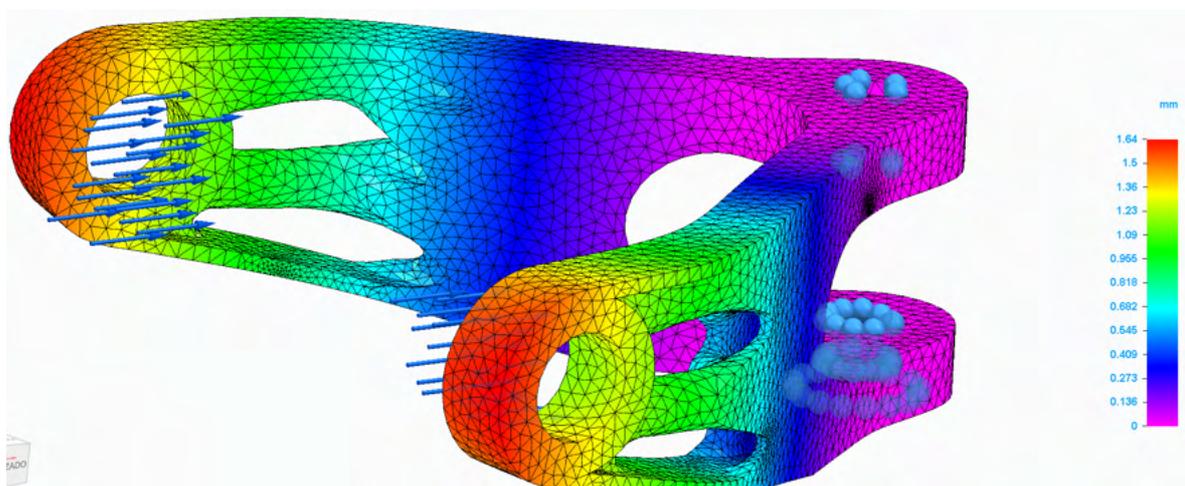


Ilustración 103 Desplazamientos obtenidos en el prototipo N°2, tras la simulación FEM en Al 7075- T6, para el estado de cargas N°3 (Fuente: Elaboración propia).

Esta simulación cumple con los requisitos solicitados. A nivel de tensiones máximas, la tensión máxima se encuentra en un rango de [330-308] Mpa.

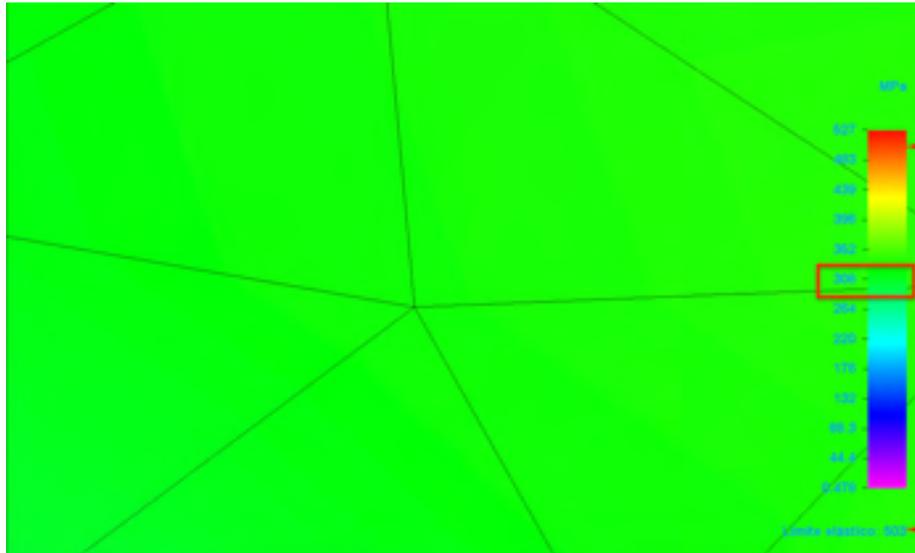
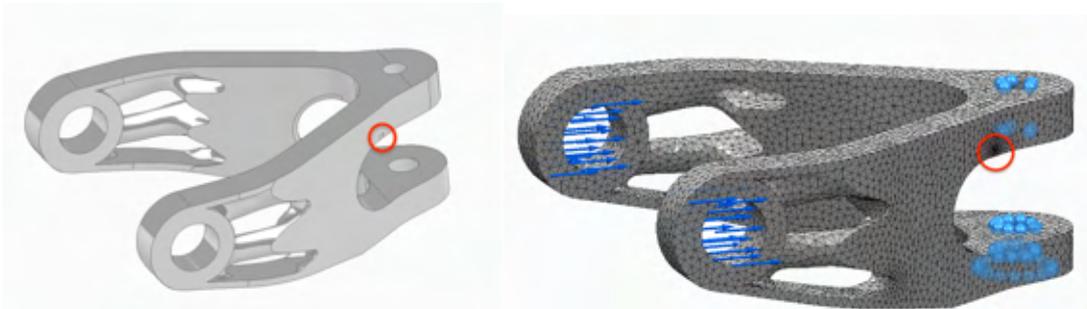


Ilustración 104 Tensión máxima generada en la pieza (Fuente: Elaboración propia).

Por lo que no somete la pieza a deformación plástica ya que el límite se encuentra en 335Mpa, como se ha visto previamente.

Asimismo, el desplazamiento máximo experimentado es de 1,64mm, manteniéndose muy próximo al registrado en el diseño inicial. Esto indica que la rigidez del sistema no se ha visto comprometida a pesar de la reducción de masa.

Se ha de mencionar que, debido a una imperfección en la malla de la pieza, se registra una tensión de 527 MPa en un punto en concreto de la pieza, como se puede visualizar:



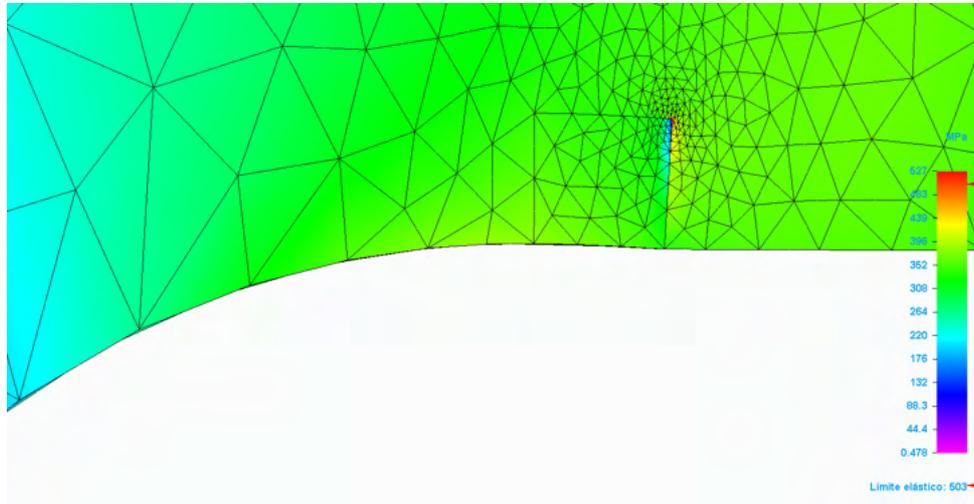


Ilustración 105 Defecto generado en el Diseño Generativo (Fuente: Elaboración propia).

No se considera relevante para los fines del análisis, ya que a continuación, se procede a realizar un refinado y suavizado de la geometría. Por lo que quedará eliminado y no afectará al comportamiento de la pieza.

5.2.5 REFINADO DE GEOMETRÍA

Una vez obtenida la geometría optimizada de la bieleta a través de Solid Edge, se procede a refinar su forma con el software Altair Inspire. El objetivo principal de esta fase es suavizar los contornos y transiciones de la pieza, mejorando su estética sin comprometer las condiciones estructurales de la pieza previamente establecidas.

En este caso particular, la geometría resultante del modelado ya presenta unas formas bastante limpias y funcionales. No obstante, se decide transferir el modelo al Altair Inspire para aplicar un último ajuste superficial.

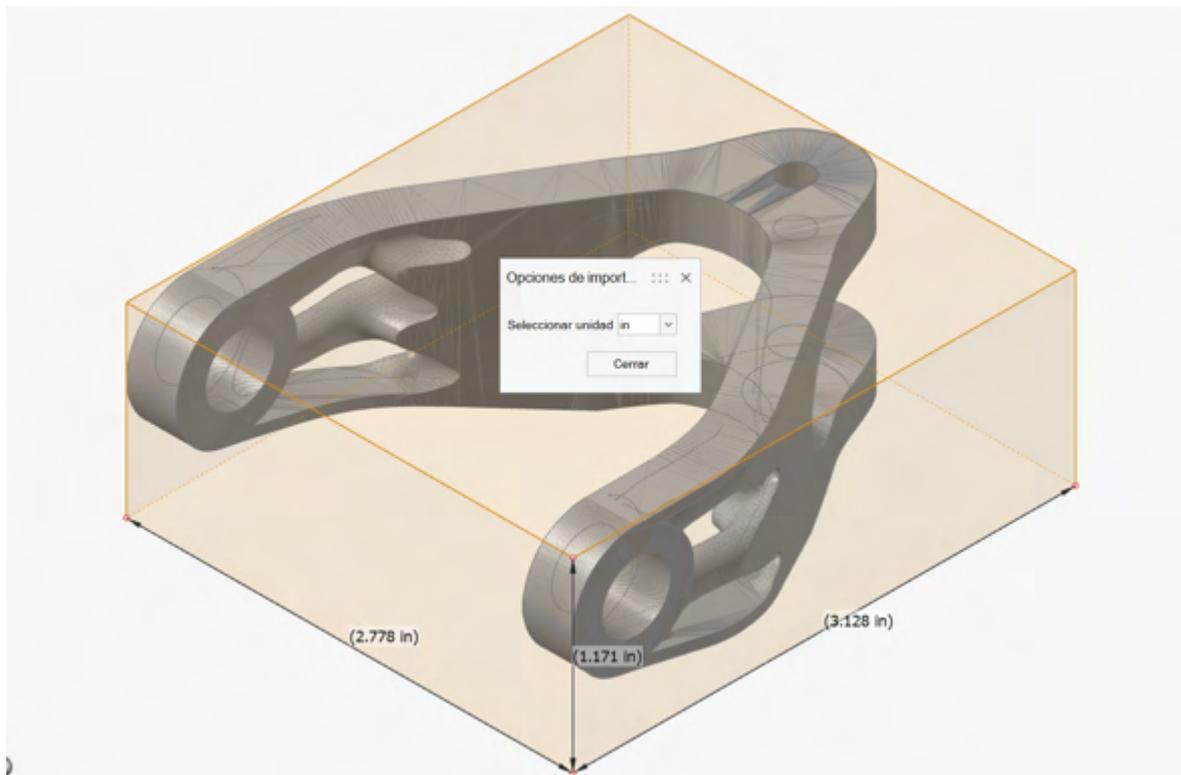


Ilustración 106 Importación del prototipo N°2 en Altair Inspire (Fuente: Elaboración propia).

Según se realiza la importación se observa como el programa interpreta incorrectamente las medidas ya que introduce unas medidas iniciales de 3.128mm x 2.778 mm, que ajustándolo en pulgadas concuerda con las medidas de la pieza original.

Se procede a crear una PolyNURB sobre la pieza, que se trata de una geometría creada con superficies que permite adaptarse a formas irregulares como pueden ser, curvas complejas, vástagos... hay varias maneras de obtenerlo. De manera manual, usando los comandos: envolver y pavimentar. Y de manera más directa activando el comando: ajustar, que depende de tres variables: número de polígonos, define como de fina es la transcripción de la geometría importada, es decir cuantos más polígonos pongamos, más se parecerá la PolyNURB a la malla importada; curvatura y el plegado automático, que determinarán como de adaptada queda la PolyNURB a la geometría inicial.

Para la geometría de la bieleta optimizada se consideran los siguientes parámetros:

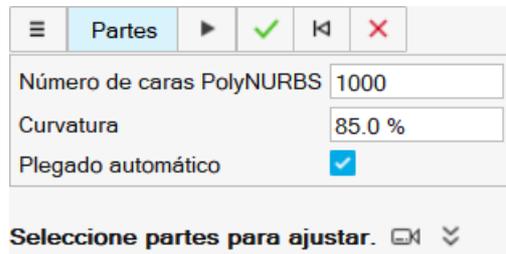


Ilustración 107 Ajuste de parámetros en la PolyNURB (Fuente: Elaboración propia).

Y se obtiene la siguiente geometría:



Ilustración 108 Resultados del suavizado del prototipo N°2 en Altair Inspire (Fuente: Elaboración propia).

Con Altair se consigue un refinamiento de la topología, eliminando bordes excesivamente abruptos o geometrías irregulares que puedan afectar al proceso de fabricación o a la integración de la pieza en la bicicleta.

5.2.6 VALIDACIÓN MEDIANTE SIMULACIÓN FEM DEL MODELO REFINADO

Para asegurarse que, tras el refinamiento de la geometría, no ha cambiado su comportamiento estructural, se procede a realizar otra simulación por elementos finitos.

Para ello, importamos el modelo como formato .step a Solid Edge, e iniciamos una nueva simulación introduciendo material, y las condiciones de carga del estado de carga número 3.

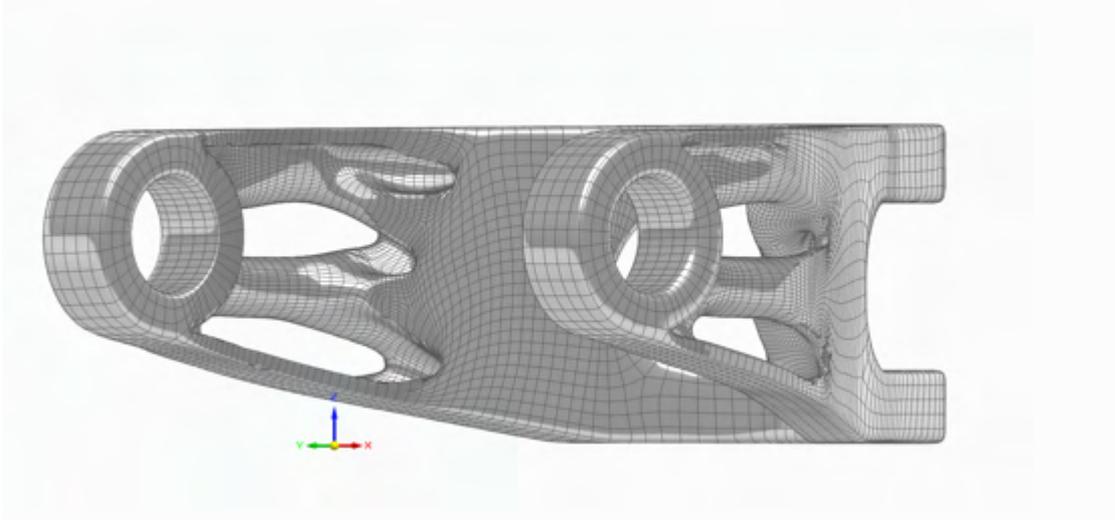


Ilustración 109 Importación del modelo final suavizado a Solid Edge (Fuente: Elaboración propia).

Las cargas y las zonas articuladas han de añadirse una a una, al haber importado la malla desde Altair:

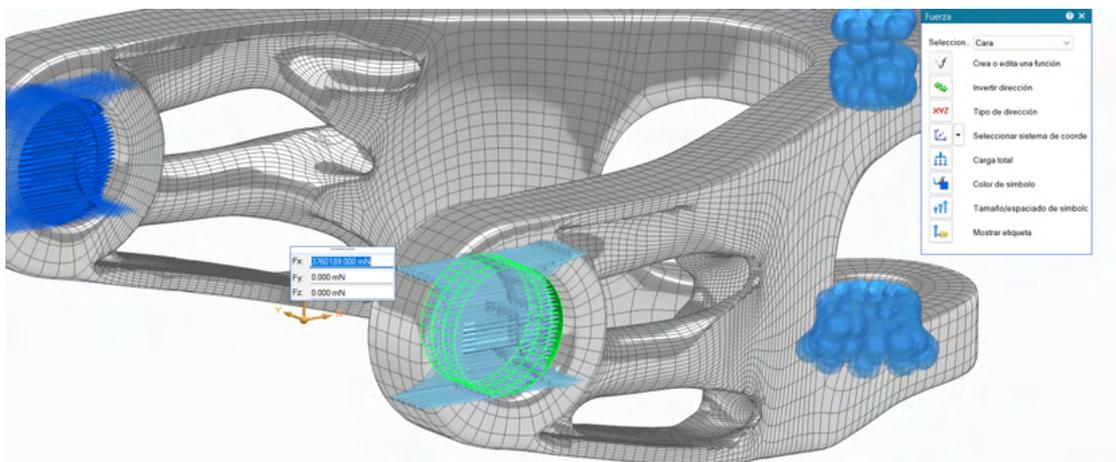


Ilustración 110 Condiciones de contorno aplicadas al modelo final, correspondiente al estado de cargas N°3 (Fuente: Elaboración propia).

Se realiza el mallado:

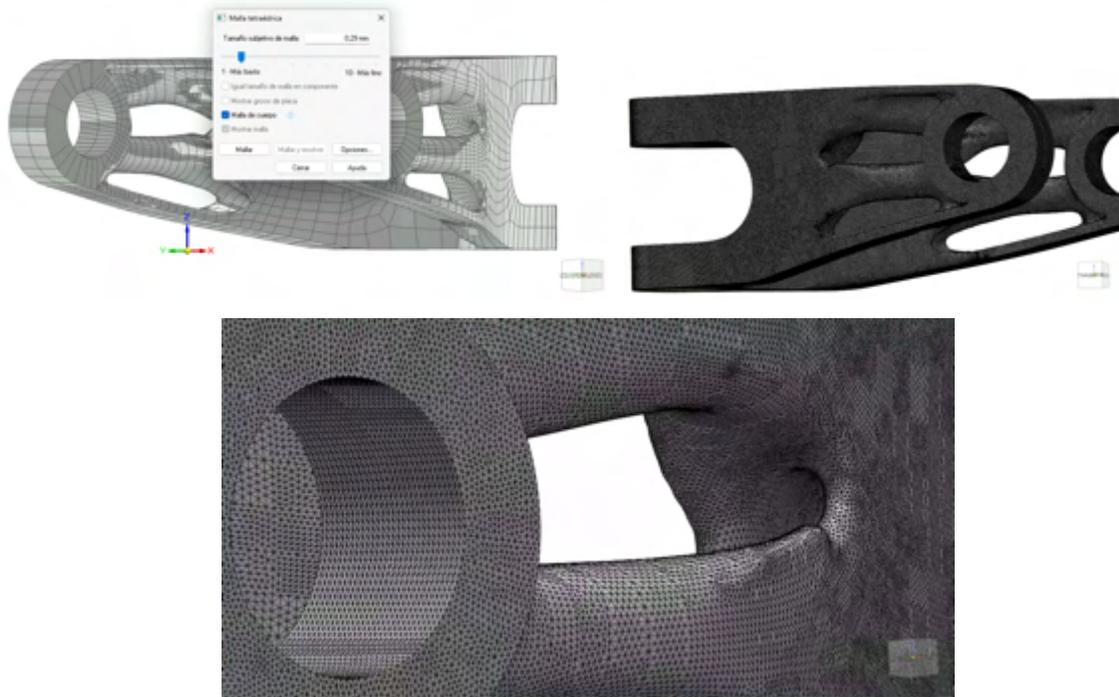


Ilustración 111 Mallado del modelo optimizado y suavizado (Fuente: Elaboración propia).

Se observa un mallado excesivamente detallado, y difícil de soportar por el programa tras 1h y 40 minutos de mallado.

El siguiente paso consiste en obtener los resultados de la simulación que, como consecuencia, es imposible de resolver.

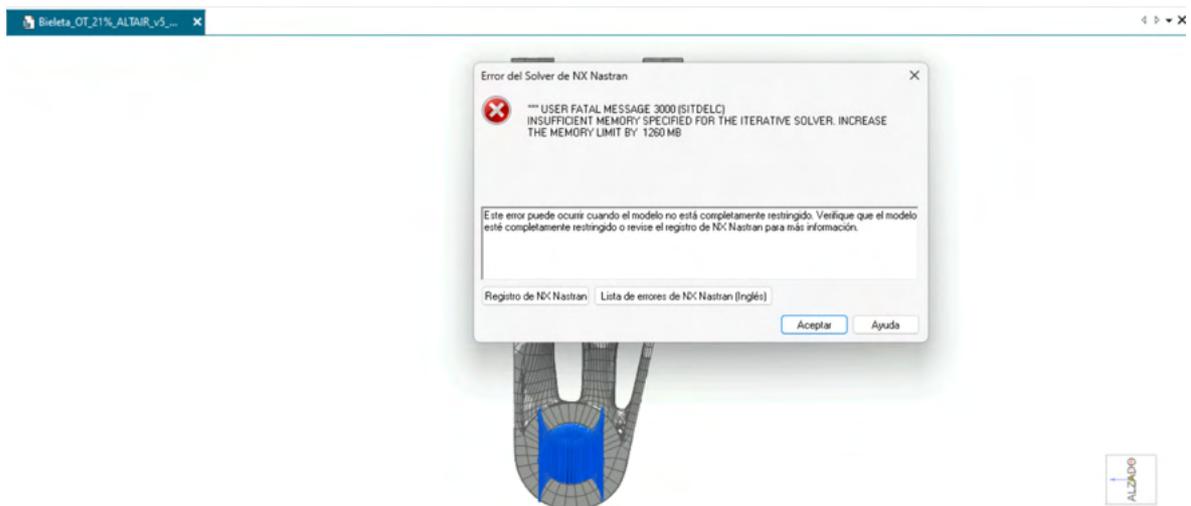


Ilustración 112 Error obtenido en la simulación (Fuente: Elaboración propia).

A pesar de los inconvenientes mencionados, se concluye que el proceso de suavizado no compromete el comportamiento estructural de la pieza. La diferencia de volumen entre la versión optimizada sin suavizar y la suavizada resulta ser mínima (Volumen sin suavizar: $19757,733\text{mm}^3$; con suavizado, $19346,906\text{mm}^3$ y en ningún caso se ha añadido ni eliminado material sobre la pieza en las zonas más críticas.

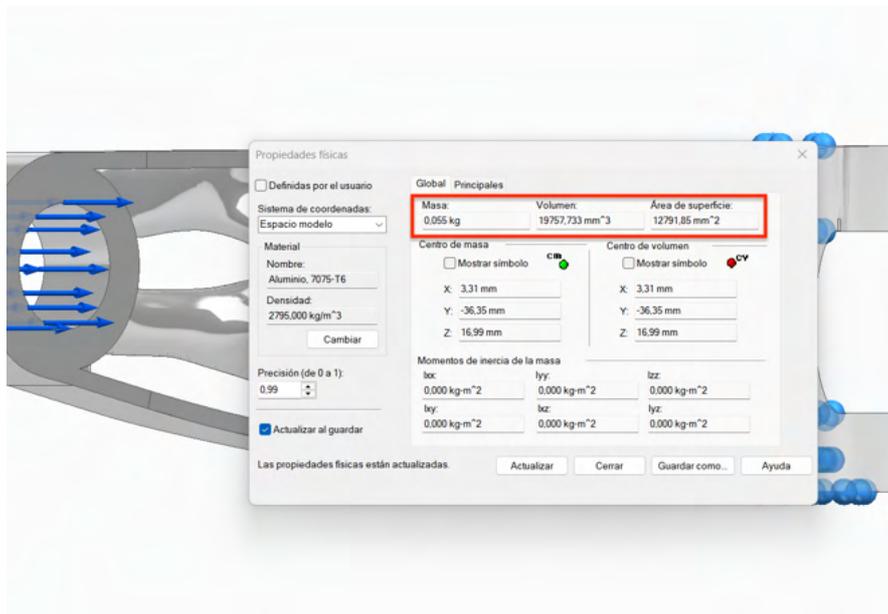


Ilustración 113 Propiedades de la bieleta optimizada, sin suavizar (Fuente: Elaboración propia).

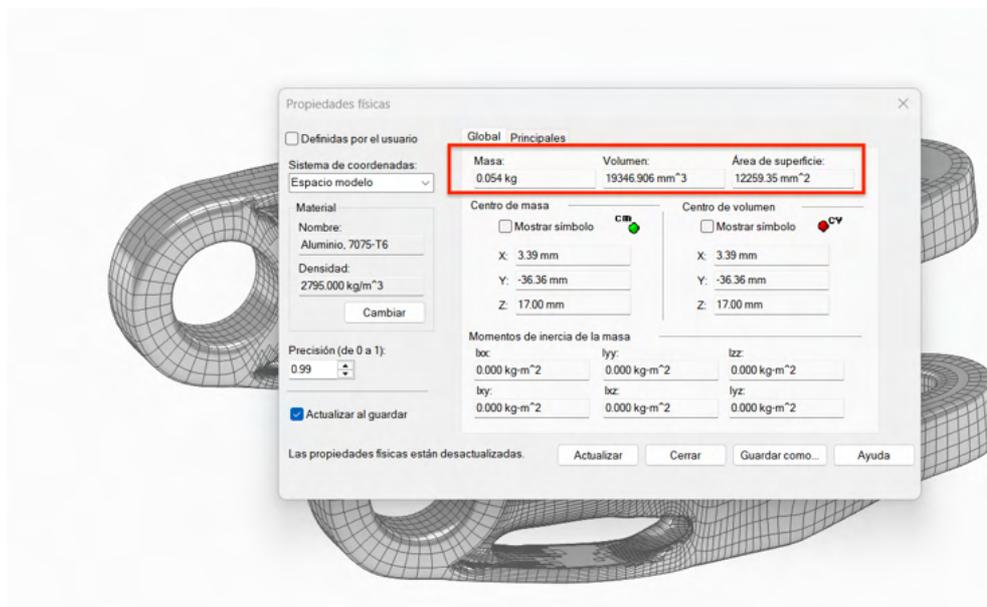


Ilustración 114 Propiedades de la bieleta optimizada y suavizada (Fuente: Elaboración propia).

Por tanto, se considera que la bieleta suavizada mantiene su integridad frente al estado de cargas crítico evaluado, asegurando así un funcionamiento óptimo.

El prototipo 2 queda de la siguiente manera:

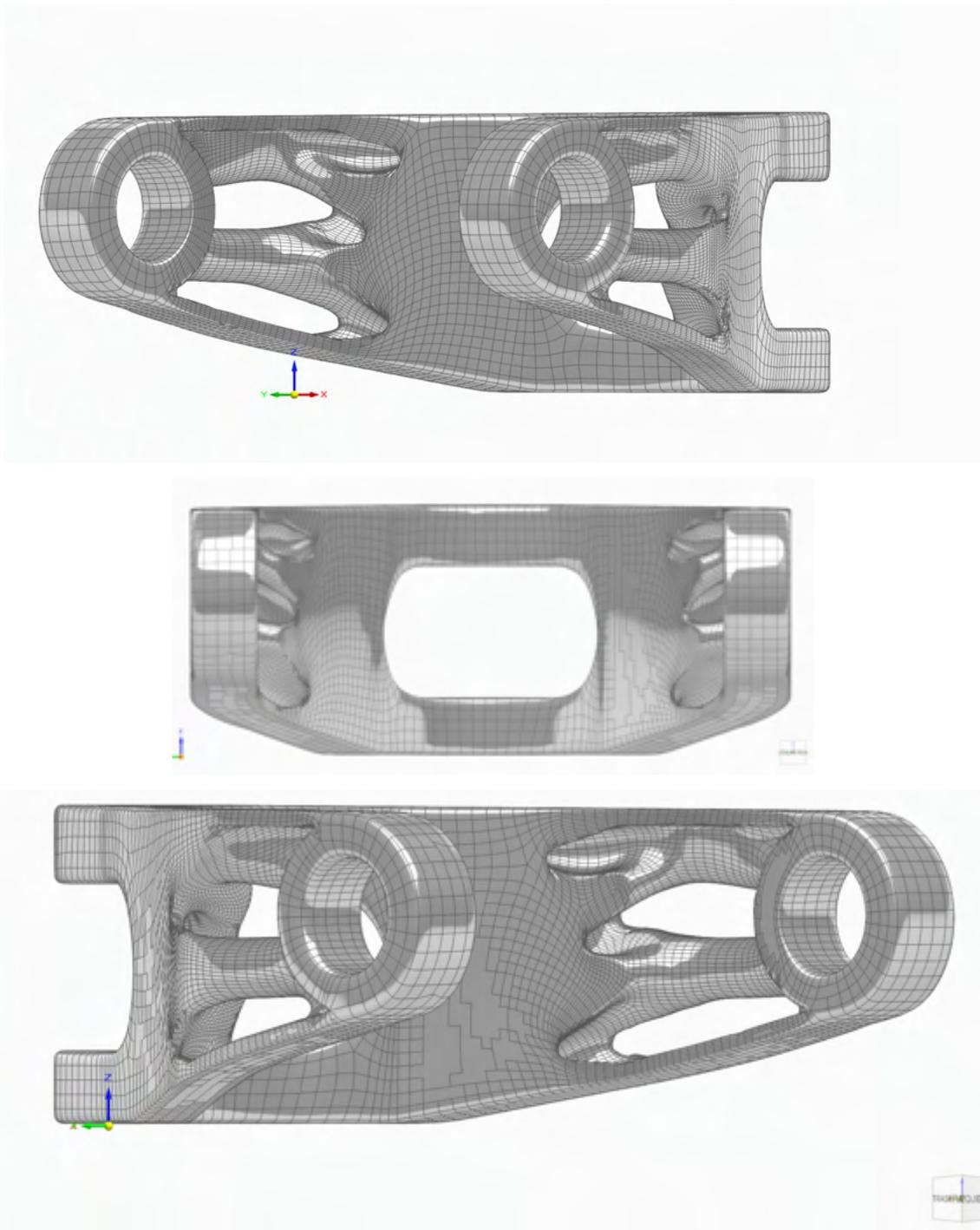


Ilustración 115 Resultados finales, prototipo N°2 suavizado (Fuente: Elaboración propia).

6. FABRICACIÓN DE PROTOTIPOS

6.1 METODOLOGÍA Y CARACTERÍSTICAS DE IMPRESIÓN 3D

El proceso de trabajo para obtener el prototipo de la bieleta impreso en 3D es el siguiente:

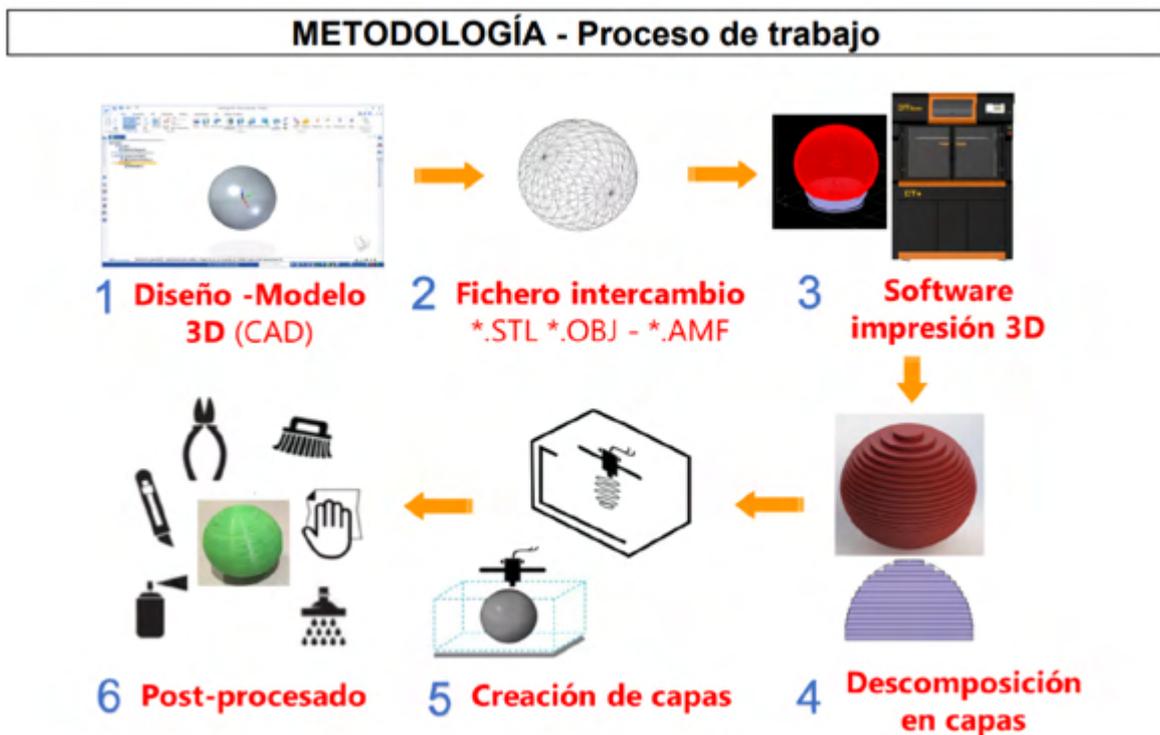


Ilustración 116 Proceso de trabajo en Impresión 3D (Fuente: Dept. Fabricación, ICAI).

Con el objetivo de validar físicamente el diseño optimizado de la bieleta, se procede a su fabricación mediante tecnologías de impresión 3D. Esta etapa permite evaluar su geometría final, aspectos prácticos del ensamblaje, rigidez estructural y la ergonomía de la pieza.

En el laboratorio ETSI-ICAI se dispone de 3 tecnologías diferentes de impresión. Con el fin de comparar los resultados obtenidos, en términos de calidad, precisión y resistencia mecánica, se van a imprimir los modelos en dos técnicas diferentes de impresión. Las tecnologías disponibles son:

-SLA (Estereolitografía): Se basa en la fotopolimerización de resinas líquidas mediante láser UV. Esta técnica permite obtener piezas con elevada precisión dimensional y un excelente acabado superficial, obteniéndose prototipos funcionales.

Entre los materiales que pueden utilizarse en SLA se encuentran diferentes tipos de resinas: Standard (para usos generales), Tough resins que simulan propiedades mecánicas de plásticos como ABS o policarbonato), Flexible resins óptima para piezas con cierto grado de deformabilidad, HighTemp resins para aplicaciones térmicas exigentes, materiales biocompatibles y usos médicos o dentales.

En el laboratorio se dispone de los modelos Formlabs 3 y Formlabs 3L. A continuación, se muestran las especificaciones técnicas de la impresora.

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 OS X 10.6.8 and up	
FILE TYPE	STL or OBJ	

Ilustración 117 Características de las impresoras Formlabs (Fuente: Dept. Fabricación, ICAI)

Los costes de los modelos son los siguientes:

IMPRESORA	COSTES € (sin IVA)
Formlabs-Form 3	5500 (paquete completo)
Formlabs-Form 3L	17300 (paquete completo)

Tabla 4 Costes impresoras por SLA (Fuente: Elaboración propia).

El software de impresión 3D empleado por estas impresoras, es el Formlabs Preform.

-FDM (Modelado por deposición fundida): consiste en la extrusión de un filamento termoplástico fundido a través de una boquilla caliente, depositando capa por capa el material sobre la base de impresión hasta formar la pieza completa. Es una metodología de fabricación rápida, para prototipos de bajo coste y no funcionales principalmente, meramente estéticos.

Entre los materiales más comunes se encuentran: PLA(Ácido Poliláctico), fácil de imprimir, biodegradable y buen acabado final; ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno) más resistente; PETG que combina rigidez y resistencia química con buena estabilidad térmica; Nylon para aplicaciones más específicas.

En el laboratorio se dispone de varias impresoras FDM: Prusa I3MK3, Markforged x7 y la Dynamical Tools DT 600+, con las siguientes características:

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.

Ilustración 118 Características de la impresora Prusa I3KMK3(Fuente: Dept. Fabricación, ICAI).

MARKFORGED X7



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

SOFTWARE

Con el control automático de versiones, la gestión automática de múltiples impresoras y la infraestructura de colaboración basada en la nube, Eiger es el software de impresión 3D más avanzado del mundo, diseñado para que la producción sea lo más sencilla posible. Eiger le permite imprimir materiales plásticos, metálicos y compuestos directamente desde su navegador.

Ilustración 119 Características de la impresora Markforged X7 (Fuente: Dept. Fabricación, ICAI).

DYNAMICAL TOOLS DT600+




ESPECIFICACIONES DT 600

Electrónica

Alimentación	240V, 50-60Hz
Máximo consumo de energía	3Kw/h
Conectividad	Wifi, Ethernet, Hot Spot, Mobile phone interface
Tipo de Drivers	Industrial Stepper Driver
Tipo de Motor	Industrial Stepper motor
Interface	7" Touch Screen LCD
Procesador	QuadCore 1,6 GHz

Datos de impresión

Precisión de fabricación	Standard ISO 2678-1
Diámetro del filamento	1.75mm
Software	Simplify 3D
Tipos de archivos	STL/OBJ/AMF
Diámetro de cabezal	0.4
*Otros diámetros opcionales	0.2, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2
Extrusor	Doble cabezal independiente
Modos de Impresión	Twin Mode - Dual Mode - Single Mode
Material	Materiales técnicos como ABS, ASA, HIPS, PC, PP, EP, Wood, Flex, Fibra de carbono, conductivos o magnéticos.

Mecánica

Temperatura máxima de superficie de impresión	150° c
Temperatura máxima de extrusor	500° c.
Estructura de aluminio anodizado	
Sistema de extracción rápida de la superficie de impresión	
Ejes X/Y anti-backlash	
Husillos de bolas con tuerca flotante	
Sistema de guiado lineal de alta precisión	
Asistente de alineación de cabezales	
Sistema de fabricación modular para un bajo mantenimiento	

Dimensiones

Tamaño de impresora	1145X790X930 mm.
Volumen de construcción	600X450X450 mm.

Hotend con separación térmica de titanio
Entorno calefactado - Temperatura interior controlada.

Wi-Fi

Protección de potencia

Procesador 1.6 GHz

Hot-End hasta 500°

Doble cabezal independiente

Fabricación híbrida

Cámara de monitorización

Sistema modular

Nivelación asistida

Entorno calefactado & HB

Notificación PUSH

Mecánica de precisión

Ilustración 120 Características de la impresora Dynamical tolos DT600+ (Fuente: Dept. Fabricación, ICAI).

Los costes de estas tres impresoras son los siguientes:

IMPRESORA	COSTE € (sin IVA)
Prusa I3MK3	825 (impresora)+ 500 (carenado)
Markforged x7	66500
Dynamical Tools DT 600+	36785

Tabla 5 Costes impresoras por FMD (Fuente: Elaboración propia).

-MJF (Fusión multijet por polvo): tecnología desarrollada por HP, emplea lecho de polvo termoplástico (habitualmente poliamida PA12) que se fusiona capa a capa mediante agentes de fusión y calor. A diferencia del resto de tecnologías, permite una mayor resolución de detalle, una distribución térmica más homogénea, y es más eficiente en cuanto a tiempos de impresión. No requiere de material de soporte, lo que permite geometrías complejas, con muy buen acabado superficial en tiradas de muchas piezas a la vez.

Los materiales más empleados, incluyen el PA12 (Poliamida 12), PA11 y TPU.

En el laboratorio universitario, se cuenta con una HP Jet Fusion 580 Color, una impresora MJF profesional capaz de producir piezas funcionales en escala real, más la opción de impresión a color. Aquí van sus características:

HP 580C



Información técnica

Impresora 3D HP Jet Fusion 580 Color

Rendimiento de la impresora	Tecnología	Tecnología HP Multi Jet Fusion
Volumen de producción efectivo		Hasta 332 x 190 x 248 mm (13,1 x 7,5 x 9,8 pulgadas)
Velocidad de producción ²		1817 cm ³ /h (111 in ³ /h)
Tiempo de producción completo para una altura de 248 mm (9,8 pulgadas)		Desde solo 14 horas: Limpieza y recuperación rápidas ³ Desde solo 20 horas: Limpieza y recuperación automáticas ⁴
Grosor de la capa		0,08 mm (0,003 pulgadas)
Resolución del cabezal de impresión		1200 ppp
Dimensiones (ancho x largo x alto)	Impresora	1565 x 955 x 1505 mm (61,6 x 37,6 x 59,3 pulgadas)
	Envío	1770 x 1143 x 2013 mm (69,7 x 45 x 79,3 pulgadas)
	Área de funcionamiento	2785 x 2530 x 2440 mm (109,6 x 99,3 x 96 pulgadas)
Peso	Impresión	650 kg (1433 lb)
	Envío	850 kg (1874 lb)
Condiciones ambientales	Temperatura operativa	20-30 °C (68-86 °F)
	Humedad operativa	20-70 % sin condensación
Emisiones acústicas ⁵	Posición frontal de operador	72 dB (sin silenciador) / 70 dB (con silenciador)
	Posición posterior de observador	80 dB (sin silenciador) / 75 dB (con silenciador)
Red ⁶	Gigabit Ethernet (10/100/1000Base-T), compatible con los siguientes estándares: TCP/IP, DHCP (solo IPv4) y TLS/SSL	
Disco duro	Disco duro de 1 TB (cifrado AES 256 y borrado seguro de datos DoD 5220M) y SSD de 1 TB (cifrado AES 256)	
Software	Software incluido	HP SmartStream 3D Build Manager HP SmartStream 3D Command Center
	Formatos de archivo compatibles	3MF, STL, OBJ y VRML v.2
Alimentación	Consumo	6300 W
	Requisitos	Configuración de un circuito dedicado: voltaje de entrada 221 - 240 V, 32 A o 200 - 220 V, 36 A, 50/60 Hz
Certificados y declaración	Seguridad	NA (Estados Unidos y Canadá): cumplimiento de IEC 61010-1, certificación NRTL; UE: Directiva de máquinas, cumplimiento de las normas EN 61010-1, EN 60204-1, EN ISO 12100 y EN ISO 13849-1
	Compatibilidad electromagnética	EN 55032:2012 Clase A; CISPR 32:2012 Clase A; FCC CFR 47 Parte 15 Clase A; ICES-003, Publicación 6 Clase A; EN 61000-3-12:2011; IEC 61000-3-12:2011; EN 61000-3-11:2000; IEC 61000-3-11:2000; EN 55024:2010; CISPR 24:2010
	Declaración medioambiental	Cumplimiento del reglamento REACH
Garantía y asistencia	Un año de garantía de hardware limitada	

Ilustración 121 Características de la impresora HP 580C (Fuente: Dept. Fabricación, ICAI).

El coste de esta impresora es de 110600 € (sin IVA).

6.2 IMPRESIÓN DE PROTOTIPOS

Se procede a realizar la impresión 3D de la bieleta en bruto y el prototipo N°2, mediante dos técnicas diferentes de impresión 3D: SLA y FDM.

6.2.1 IMPRESIÓN POR FDM

Para la fabricación mediante tecnología FDM, se han empleado dos impresoras: la Prusa I3MK3 y la Markforged X7. Antes del proceso de impresión, se realiza una simulación previa en los respectivos softwares de laminado: Ultimaker Cura (para la Prusa) y Eiger (para la Markforged) que permiten realizar un análisis previo, ofreciendo funcionalidades como:

- Importar los archivos STL o 3MF y escalar los modelos.
- Seleccionar diferentes parámetros como material, temperatura, altura de capa y densidad de relleno.
- Ajustar la orientación y configuración de soportes según la geometría.
- Visualizar la estrategia de impresión capa a capa.
- Estimar el tiempo total de impresión y el consumo de filamento.

La simulación resulta esencial para garantizar que la configuración seleccionada es adecuada para obtener las piezas según lo requerido por el usuario.

6.2.1.1 Impresión bieleta en bruto

En el caso de la bieleta sin optimizar, se imprime directamente en la Markforged x7 con material Onyx. Las características específicas de impresión para esta pieza se detallan en la siguiente tabla:

	PARAMETROS	VALOR
GENERAL	Impresora	Markforged x7
	Pieza	Bieleta en Bruto
	Material	Onyx
	Material de refuerzo	No
	Corte por capas	Si
AJUSTES	Altura de capa	0,200 mm
	Escala	1:1
	Uso de material de soporte	Si
	Tipo de material de soporte	Tipo normal
RELLENO	Patrón de relleno	Relleno triangular
	Densidad de relleno	23%
	Capas superiores e inferiores	0,60 mm
	Capas de pared	1,20 mm

Tabla 6 Parámetros a establecer en la impresión (Fuente: Elaboración propia).

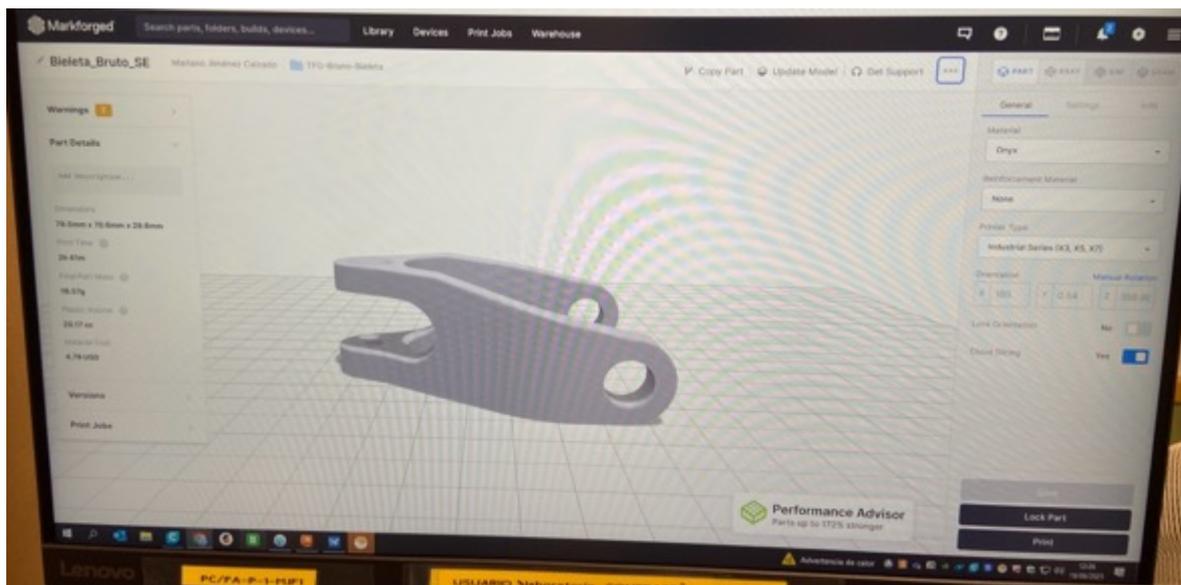


Ilustración 122 Representación de la simulación aplicada en el software Eiger (Fuente: Elaboración propia).

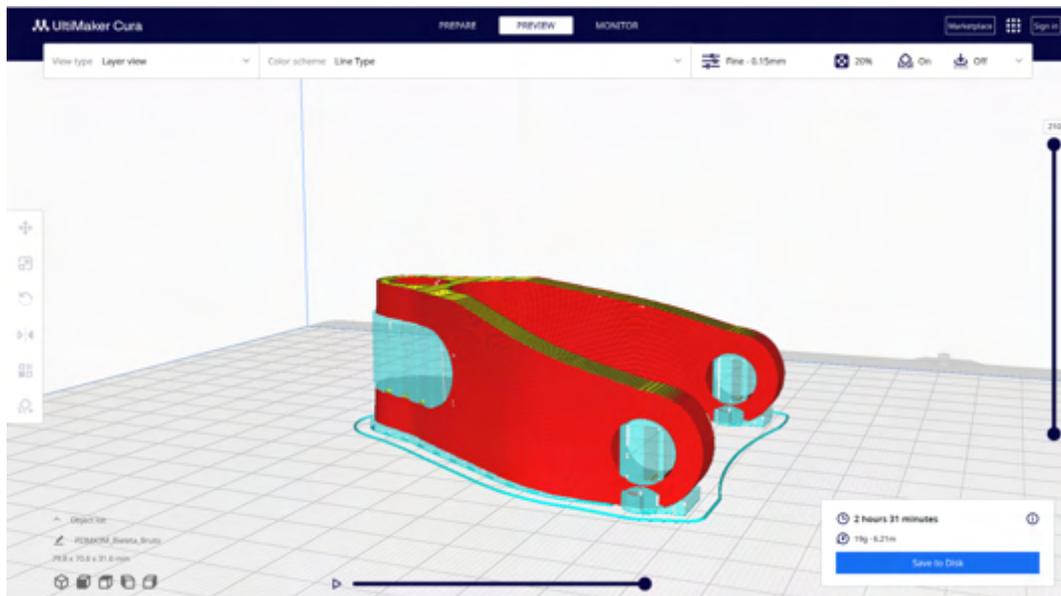


Ilustración 123 Representación de la simulación aplicada en el software Ultimaker Cura (Fuente: Elaboración propia).

Con estos ajustes ya configurados en el Software, se lanza la impresora a imprimir obteniendo la pieza. Una vez completado el proceso, se lleva a cabo un sencillo tratamiento de postprocesado eliminando manualmente el material de soporte con unos alicates.





Ilustración 124 Resultados de impresión de la bieleta en bruto en FDM, por la Markforged X7 (Fuente: Elaboración propia).

-Comparativa bieleta original con modelo impreso en 3D:



Ilustración 125 Comparativa bieleta original con el modelo impreso (Fuente: Elaboración propia).

6.2.1.2 Impresión bieleta optimizada y suavizada

En el caso del prototipo N°2, se realizan dos impresiones, una primera impresión con la Prusa I3MK3 en PLA, con el objetivo de verificar la geometría de la pieza y su viabilidad para ser fabricada mediante impresión 3D con las siguientes características:

	PARAMETROS	VALOR
PERFILES	Impresora	Prusa I3 MK3
	Pieza	Prototipo N°2
	Material	PLA 1,75 mm
	Resolución	Fina: 0,15 mm
DUREZA	Densidad de relleno	Si
	Patrón de relleno	Fina: 0,15 mm
	Grosor de pared	0,8 mm
SOPORTE	Tipo de material de soporte	Tipo árbol
	Ubicación de soporte	En todos lados
ADHESIÓN	Adhesión	No

Tabla 7 Parámetros a establecer en la impresión (Fuente: Elaboración propia).

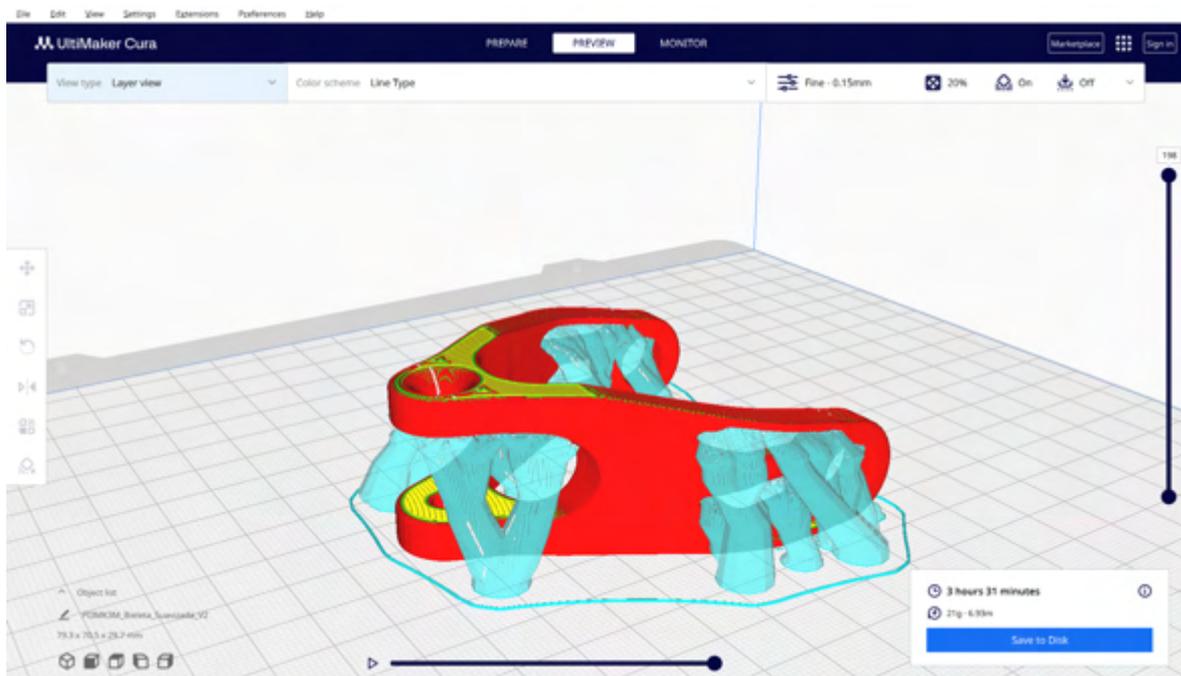


Ilustración 126 Representación de la simulación aplicada en el software Ultimaker Cura (Fuente: Elaboración propia).

Con los parámetros ya configurados en el UltimakerCura, se lanza la impresora a imprimir obteniendo la pieza.



Ilustración 127 Resultados impresión Prototipo N°2 en FDM, por la Prusa I3 MK3 (Fuente: Elaboración propia).

Para el postprocesado, se procede a retirar manualmente todo el material de soporte con ayuda de: una espátula, alicates, lijadora automática y lijadora manual. Para obtener la pieza perfectamente limpia:



Ilustración 128 Resultados impresión Prototipo N°2 tras el postprocesado (Fuente: Elaboración propia).

-Comparativa entre la bieleta original, la bruta y la optimizada.





Ilustración 129 Comparativa entre la bieleta original, la bruta y la optimizada (Fuente: Elaboración propia).

Confirmada la geometría y la viabilidad, se procede a la impresión definitiva en la Markforges x7, nuevamente en Onyx, con los siguientes parámetros:

	PARAMETROS	VALOR
GENERAL	Impresora	Markforged x7
	Pieza	Bieleta en Bruto
	Material	Onyx
	Material de refuerzo	No
	Corte por capas	Si
AJUSTES	Altura de capa	0,200 mm
	Escala	1:1
	Uso de material de soporte	Si
	Tipo de material de soporte	Tipo normal
RELLENO	Patrón de relleno	Relleno triangular
	Densidad de relleno	23%
	Capas superiores e inferiores	0,60 mm
	Capas de pared	1,20 mm

Tabla 8 Parámetros a establecer en la impresión (Fuente: Elaboración propia).

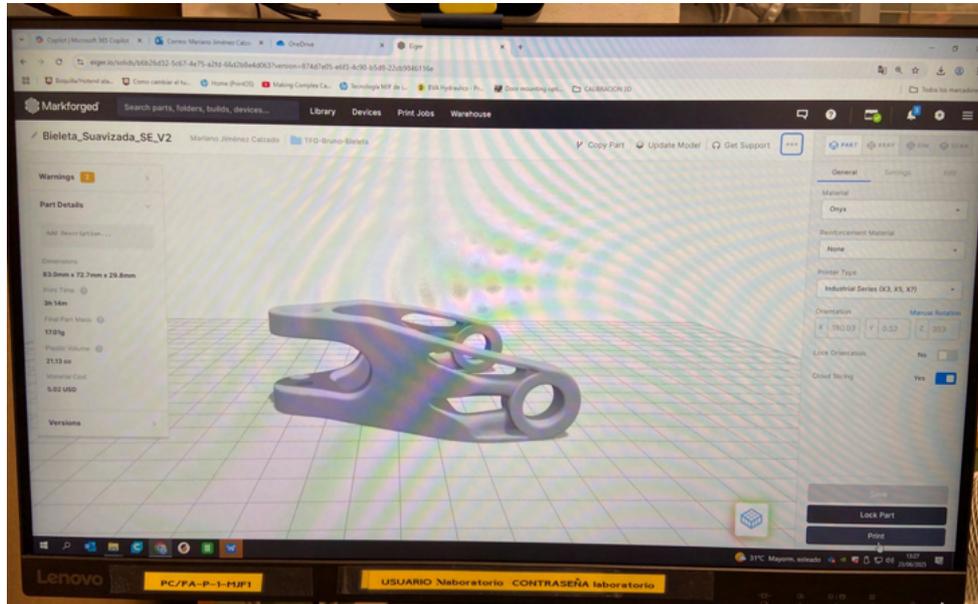


Ilustración 130 Representación de la simulación aplicada en el software Eiger (Fuente: Elaboración propia).

Una vez la simulación está lista, se lanza la impresora a fabricar las piezas, obteniéndose la pieza final:



Ilustración 131 Resultados impresión Prototipo N°2 en FDM, por la Markforced (Fuente: Elaboración propia).

Se emplean unos alicates y una lijadora manual para eliminar todo el material de soporte.



Ilustración 132 Resultados impresión Prototipo N°2 tras el postprocesado (Fuente: Elaboración propia).

-Comparativa bieleta original con la optimizada, impresa por FDM:



Ilustración 133 Comparativa entre la bieleta original y el prototipo N°2 (Fuente: Elaboración propia).

Las impresiones realizadas por FDM resultantes:



Ilustración 134 Resultados de las impresiones por FDM (Fuente: Elaboración propia).

6.2.2 IMPRESIÓN POR SLA

Se procede a realizar la impresión de la bieleta optimizada y suavizada mediante tecnología SLA, se opta por la impresora Formlabs 3, ya que el tamaño de la bieleta no requiere el uso de la versión 3L.

Antes de la impresión, se utiliza el software Formlabs PreForm, que permite preparar el modelo digital a gusto del usuario. A través de este entorno se puede:

- Importar los archivos en formato STL o 3MF
- Escalar los modelos
- Realizar la simulación de impresión capa a capa
- Seleccionar el tipo de resina a emplear
- Ajustar la orientación de la pieza para mejorar la estabilidad el acabado
- Definir la configuración del soporte
- Estimar tanto la cantidad de material necesario como el tiempo total de impresión

Esta fase es esencial para reducir errores y garantizar una buena pieza final. Se emplea como resina la Rigid 10k V1, con un grosor de capa de 0,100mm. Se ha de mencionar que la orientación de la pieza en esta tecnología de impresión es muy importante ya que, si se coloca una gran superficie sobre la plancha de la impresora, se puede provocar un efecto de capilaridad en la resina que provoque que la pieza salga defectuosa. Para ello, se orienta la

pieza hacia arriba e inclinada hacia un lado, apoyándose con el material de soporte. Como se puede visualizar a continuación.

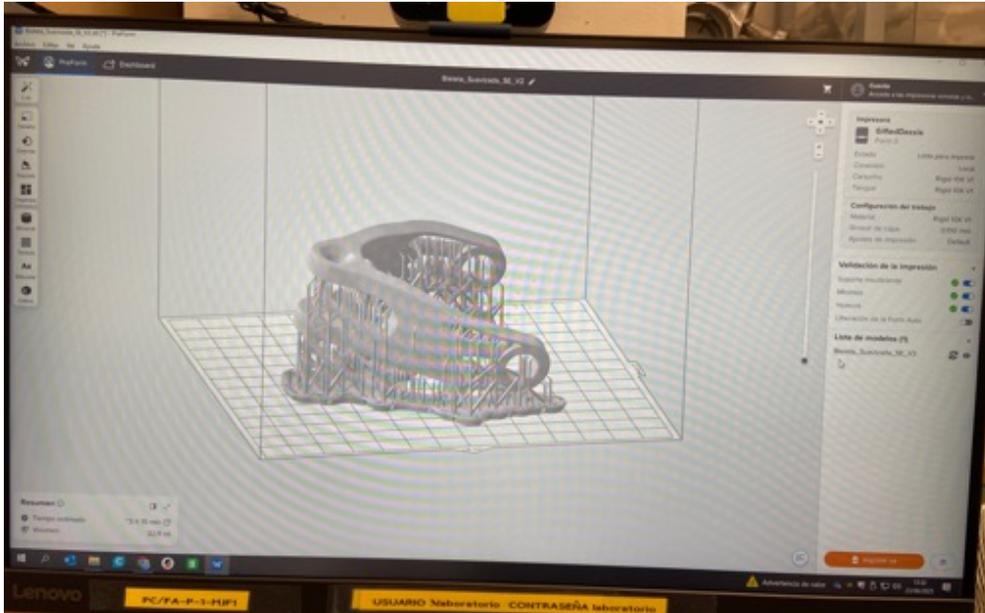


Ilustración 135 Simulación de impresión en el software Preform (Fuente: Elaboración propia).

Una vez realizada la correcta simulación y garantizado que todo está en orden, se lanza la impresora a fabricar las piezas:

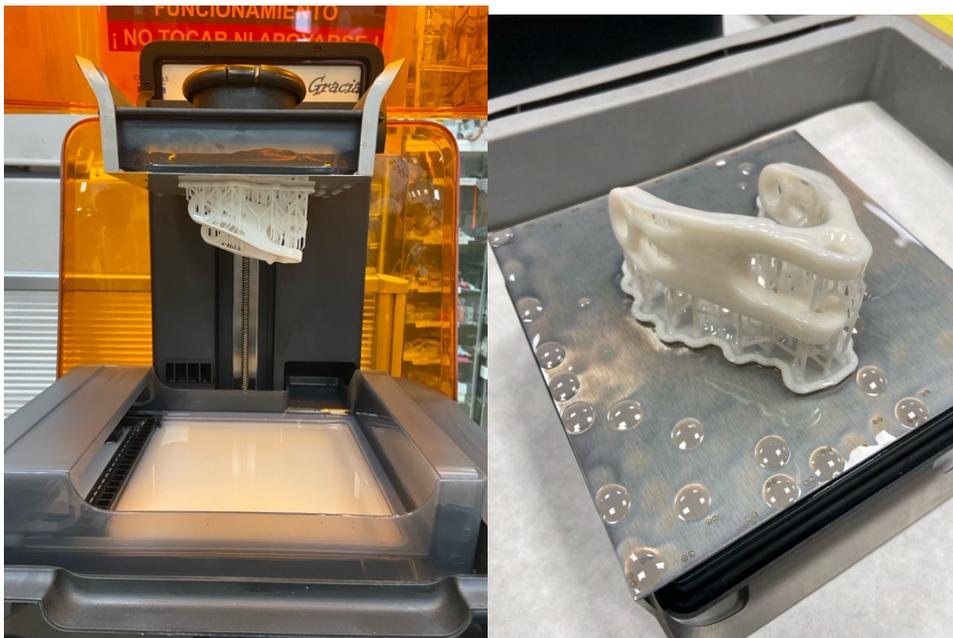


Ilustración 136 Resultados impresión Prototipo N°2 mediante SLA (Fuente: Elaboración propia).

En el caso de impresión por resina, el tratamiento postprocesado es más complejo que en el caso del FDM. En primer lugar, se sumerge la pieza, aun con los soportes en un tanque de alcohol, y con la ayuda de un pincel, se repasa la superficie para eliminar restos de resina sobrantes, repitiéndolo así varias veces combinando la retirada manual del material de soporte utilizando unos alicates o la propia mano.

Una vez limpia, la pieza se seca con aire a presión para asegurar la eliminación de restos. Y se procede al curado de la pieza, utilizando la máquina Form Cure, cuyo valor es de 5203 €. Se selecciona el tipo de resina empleado y se inicia el proceso: primero, una etapa de aclimatación de 15 minutos hasta alcanzar los 60°C, seguida de una hora de curado completo.

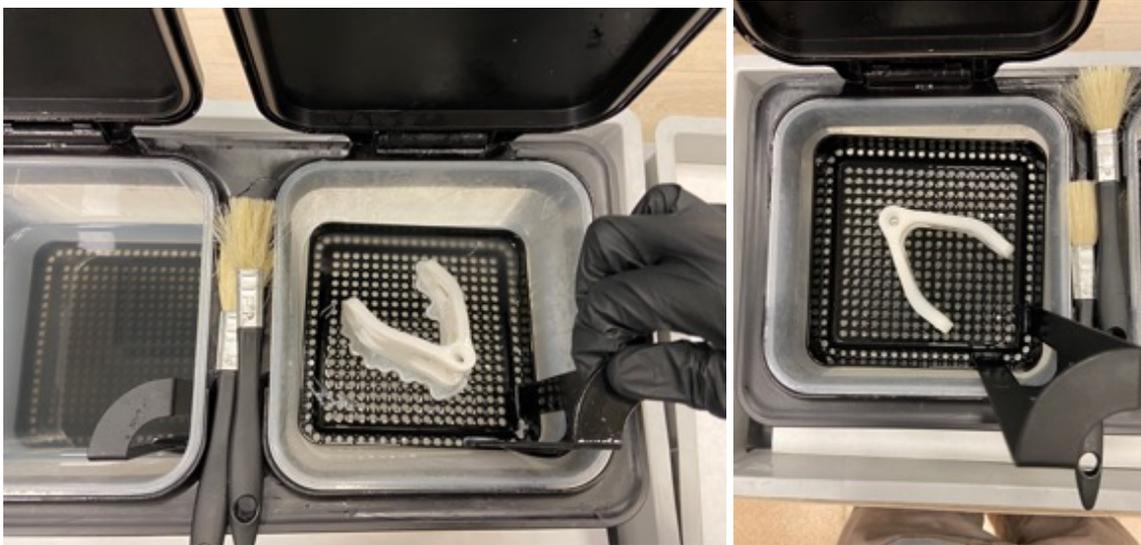


Ilustración 137 Proceso de postprocesado en SLA (Fuente: Elaboración propia).

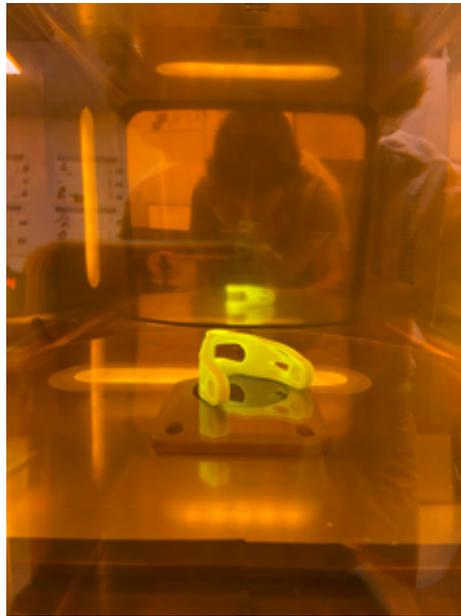


Ilustración 138 Curado de la pieza (Fuente: Elaboración propia).

Finalmente, una vez extraída la pieza, se pueden observar pequeñas marcas o picaduras realizadas por el material de soporte, que son eliminadas con un lijado manual con una lija fina. Obteniéndose como resultado la superficie limpia y uniforme.



Ilustración 139 Resultados impresión Prototipo N°2 tras el postprocesado en SLA. (Fuente: Elaboración propia).

- Comparativa con pieza original:



Ilustración 140 Comparativa pieza impresa en SLA con el modelo original (Fuente: Elaboración propia).

7. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se van a evaluar los costes de los prototipos, para ello se necesita tener en cuenta una serie de variables como pueden ser: la resolución y la precisión, repetitividad del proceso, materiales a emplear, propiedades mecánicas a obtener, el acabado superficial, el tiempo de ejecución y costes de postprocesado y mantenimiento.

Desde el punto de vista económico, la fabricación aditiva presenta una ventaja significativa frente a los métodos convencionales cuando se trata de series cortas o prototipos. Como se observa en la gráfica, el coste por pieza mediante impresión 3D se mantiene relativamente constante independientemente del número de unidades de producción, mientras que en la fabricación tradicional el coste inicial es muy elevado en comparación con la fabricación aditiva, pero disminuye notablemente al aumentar el tamaño de lote. Lo que significa que la impresión 3D es más rentable en fases de desarrollo o producción limitada, aun siendo muy competitivo dependiendo del tamaño de producción solicitado. [31]

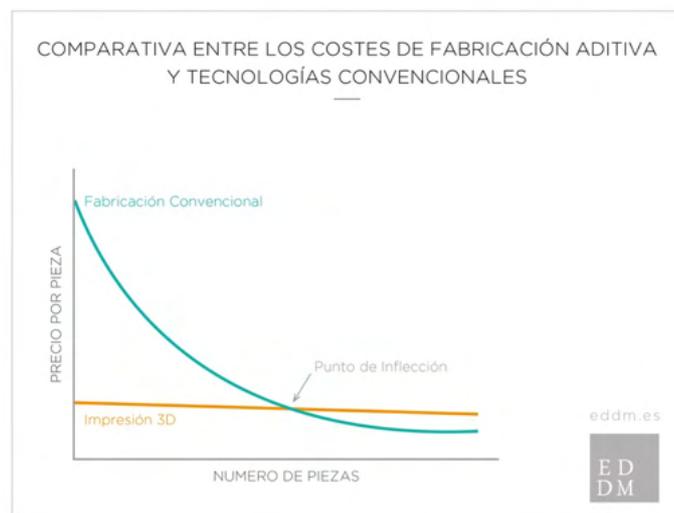


Ilustración 141 Gráfica comparativa entre los costes de fabricación aditiva y tecnologías convencionales

(Fuente: EDDM)

7.1.1 COSTES DE PROTOTIPOS

Para la evaluación de los costes de los siguientes prototipos, se ha llevado a cabo un análisis completo combinando dos metodologías. Por un lado, se sigue el método propuesto por Diego Trapero, referente en el ámbito de la impresión 3D y fundador de BitFAB [32]. Por otro lado, se utiliza la tabla de costes tradicional desarrollada por el Departamento de Tecnologías de Fabricación de ICAI.

7.1.1.1 Bieleta en bruto en FDM:

Para los costes de la pieza origina, se emplea la siguiente tabla Excel desarrollada por ICAI.

ANALISIS DE COSTES PARA PROTOTIPADO DE PIEZAS EN IMPRESORA 3D -FDM	
DATOS AMORTIZACIÓN MÁQUINA	
Precio máquina (€)	66.000
Coste mantenimiento anual (€)	6.600
Años de amortización	5
Amortización (h/año) - 200 días-año / 8 horas-día	1600
Precio Hora máquina-amortización (€/h)	10,73
Precio Hora venta-público (€/h)	10,73
DATOS COSTE MATERIAL	
Coste material modelo: filamento abs (€/cc) (240 €-750 cc)	0,32
Coste material de soporte	0,00
DATOS COSTE TÉCNICO ANALISTA	
Coste técnico analista del modelo - inc. desmoldeo (€/h)	20

PIEZA Bieleta Bruto		
CONCEPTOS PRESUPUESTADOS	Opción Solido	Costes parciales
Material modelo (cc)	20,17	6,45 €/ud
Soporte modelo (cc)	12,00	0,00 €/ud
Tiempo modelo (h)	2,41	25,85 €/ud
Piezas por bandeja (ud)	1,00	0,00 €/ud

Tiempo técnico-analista (h)	0,25	5,00 €
Cantidad de piezas	1,00	
Coste unitario (€) en ICAI + IVA	37,30 €/Ud	
Coste total (€) en ICAI + IVA	37,30 €	

Tabla 9 Coste por unidad de Bieleta en Bruto, impresa por FDM (Fuente: Dept.Fabricación, ICAI).

Obteniéndose un presupuesto de la bieleta en bruto de 37,30 € por unidad en modelado por deposición fundida.

7.1.1.2 Bieleta optimizada en FDM:

En el caso de los costes para la bieleta optimizada empleamos el análisis de costes desarrollado por BitFAB [32].

Se evalúa en primer lugar los costes del servicio. Siendo el material empleado Fiber ABS Onyx, a un precio de 20,35 € por 850g según el proveedor filament2print [33].

Cálculo de los costes del servicio	
Costes pedido	
Coste por hora preparación/postprocesado	20 [€]
Costes por hora de impresión	
Coste de amortización de la impresora	6,60 [€/h]
Coste de la electricidad	0,09 [€/h]
Coste por hora total	6,69 [€/h]
Costes de consumibles	
Coste de material	23,94 [€/kg]

Cálculo de los costes del servicio	
Costes pedido	
Coste por hora preparación/postprocesado	20 [€]
Costes por hora de impresión	
Coste de amortización de la impresora	6,60 [€/h]
Coste de la electricidad	0,09 [€/h]
Coste por hora total	6,69 [€/h]
Costes de consumibles	
Coste de material	23,94 [€/kg]

Tabla 10 Costes de servicio de impresión por FDM, con la impresora Markforged (Fuente: BitFAB).

Los costes de pedido son los siguientes:

Datos del pedido	
Tiempo de preparación/postprocesado	1 [h]
Datos de la pieza	
Tiempo de impresión	3,31 [h]
Masa	0,021 [kg]
Cantidad	1 [u]
Coste de pedido	
Costes de pedido	
Preparación/postprocesado del pedido	20 [€]
Coste de la pieza	
Material	0,50 [€/u]
Horas de impresión	22,16 [€/u]
Coste por pieza	22,66 [€/u]
Coste de todas las piezas	22,66 [€]
Costes totales del pedido	
Coste total del pedido	42,66 [€]
Cada unidad adicional	22,66 [€]

Tabla 11 Costes de pedido de impresión por FDM, con la impresora Markforged (Fuente: BitFAB).

Obteniéndose un presupuesto para la bieleta optimizada de 42,66 € por unidad en modelado por deposición fundida.

7.1.1.3 Bieleta optimizada en SLA:

Para la bieleta optimizada impresa por estereolitografía, empleando como material resina estándar plus 10k a un precio de 21,85 €/Kg se obtienen los siguientes costes

Para el servicio se establece:

Datos del servicio	
Coste de la impresora	66000 [€]
Periodo de amortización	5 [años]
Horas de uso por día laborable de la impresora	8 [h]
Coste luz	0,189 [€/kWh]
Potencia media de la impresora	0,5 [kW]
Coste de material	21,85 [€/kg]
Coste por hora de personal	20 [€/h]
Cálculo de los costes del servicio	
Costes pedido	
Coste por hora preparación/postprocesado	20 [€]
Costes por hora de impresión	
Coste de amortización de la impresora	6,60 [€/h]
Coste de la electricidad	0,09 [€/h]
Coste por hora total	6,69 [€/h]
Costes de consumibles	
Coste de material	21,85 [€/kg]

Tabla 12 Costes de servicio de impresión por SLA, con la impresora Formlabs 3 (Fuente: BitFAB).

Respecto del pedido:

Datos del pedido	
Tiempo de preparación/postprocesado	2 [h]
Datos de la pieza	
Tiempo de impresión	3,15 [h]
Masa	0,036 [kg]
Cantidad	1 [u]
Coste de pedido	
Costes de pedido	
Preparación/postprocesado del pedido	40 [€]
Coste de la pieza	
Material	0,79 [€/u]
Horas de impresión	21,09 [€/u]
Coste por pieza	21,87 [€/u]
Coste de todas las piezas	21,87 [€]
Costes totales del pedido	
Coste total del pedido	61,87 [€]
Cada unidad adicional	21,87 [€]

Tabla 13 Costes de pedido de impresión por SLA, con la impresora Formlabs 3 (Fuente: BitFAB).

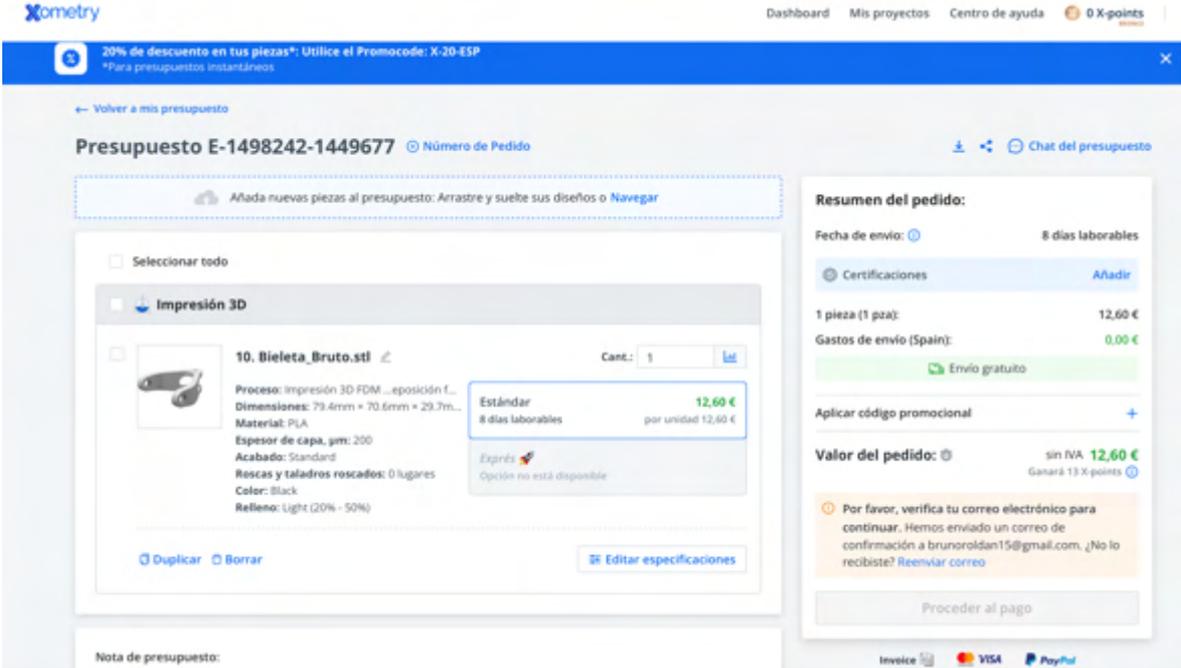
Obteniéndose un coste de pedido final para la bieleta optimizada impresa mediante SLA, de 61,78€/Ud.

7.1.1.4 Presupuestos online

Para realizar un presupuesto rápido y preciso, se emplean a las páginas web: Xometry e I.materialise [34] [35].

7.1.1.4.1 Bieleta en bruto en FDM:

Se adjunta el modelo en la web Xometry y se obtiene un presupuesto de 12,60 € por el prototipo de la bieleta en bruto mediante impresión 3D en FDM en PLA, por unidad.

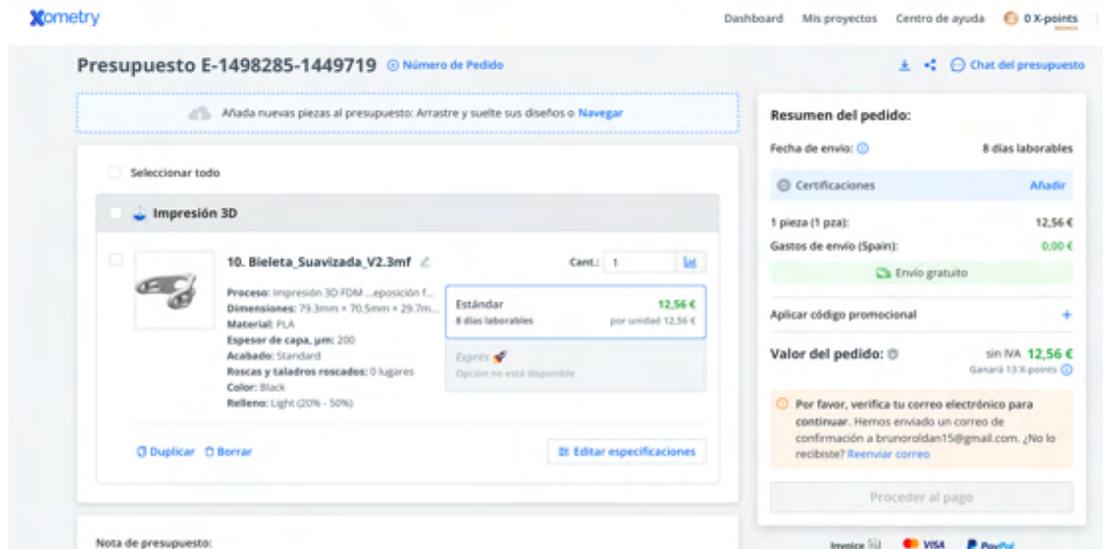


The screenshot displays the Xometry website interface for a 3D printing quote. The main content area shows a list of items under 'Impresión 3D'. The selected item is '10. Bieleta_Bruto.stl' with a quantity of 1 and a price of 12,60 € per unit. The specifications for this item are: Proceso: Impresión 3D FDM...posición T...; Dimensiones: 79.4mm x 70.6mm x 29.7m...; Material: PLA; Espesor de capa, gm: 200; Acabado: Standard; Roscas y taladros roscados: 0 lugares; Color: Black; Relleno: Light (20% - 50%). The 'Estándar' option is selected, priced at 12,60 € for 8 laborable days. A 'Resumen del pedido' (Order Summary) is visible on the right, showing a total value of 12,60 € (including VAT) and a shipping cost of 0,00 € for free shipping. The interface also includes a navigation bar, a promotional banner for a 20% discount, and a 'Proceder al pago' button at the bottom.

Ilustración 142 Presupuesto online de fabricación bieleta bruto, en FDM (Fuente: Xometry).

7.1.1.4.2 Bieleta optimizada en FDM:

Para el caso de la bieleta optimizada, se obtiene un presupuesto de 12,56 € por unidad a través de la web Xometry, fabricado en FDM con PLA.

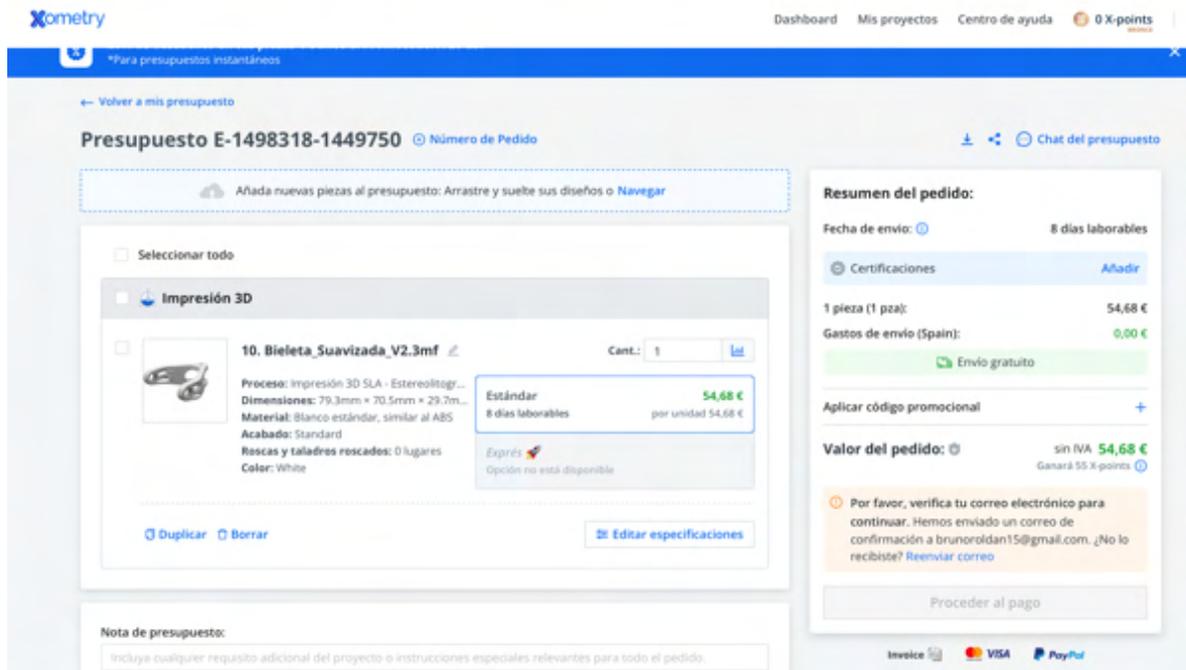


The screenshot shows the Xometry website interface for a quote. The main section displays a 3D model of a part named "10. Bieleta_Suavizada_V2.3mf" with a quantity of 1. The process is "Impresión 3D FDM" and the price is 12.56 € for 8 laborable days. The material is PLA. The right sidebar shows a "Resumen del pedido" (Order Summary) with a total value of 12.56 € and a "Proceder al pago" (Proceed to payment) button.

Ilustración 143 Presupuesto online de fabricación bieleta optimizada en FDM (Fuente: Xometry).

7.1.1.4.3 Bieleta optimizada en SLA:

Para la impresión realizada por estereolitografía, el presupuesto de un prototipo asciende a un valor de 54,68 € según Xometry.

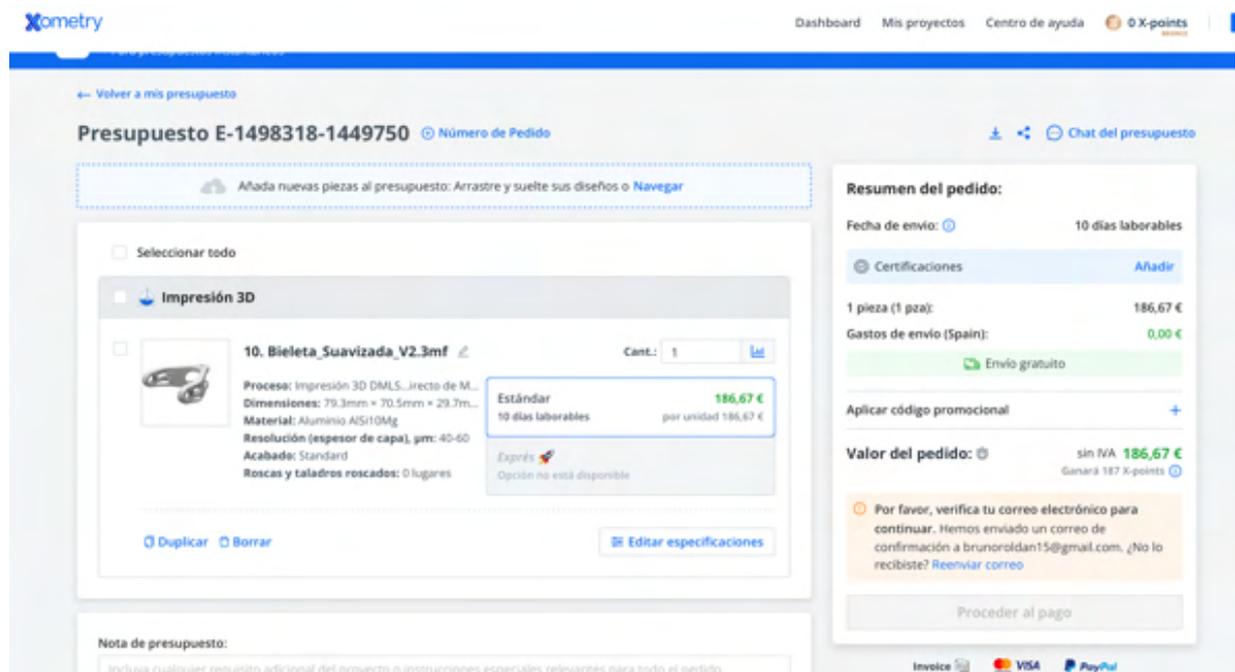


The screenshot shows the Xometry website interface for a quote. The main section displays a 3D model of a part named "10. Bieleta_Suavizada_V2.3mf" with a quantity of 1. The process is "Impresión 3D SLA" and the price is 54.68 € for 8 laborable days. The material is "Blanco estándar, similar al ABS". The right sidebar shows a "Resumen del pedido" (Order Summary) with a total value of 54.68 € and a "Proceder al pago" (Proceed to payment) button.

Ilustración 144 Presupuesto online de fabricación bieleta optimizada en SLA (Fuente: Xometry).

7.1.1.4.4 Bieleta optimizada en aluminio:

Se evalúa lo que sería el coste final de la bieleta optimizada, impresa en 3D por sintetizado láser directo de metales en aluminio. Con el objetivo obtener un coste aproximado de lo que sería un modelo real y plenamente funcional.



The screenshot shows the Xometry website interface for a budgeting tool. The main heading is "Presupuesto E-1498318-1449750". Below this, there's a section for "Impresión 3D" with a list of items. The selected item is "10. Bieleta_Suavizada_V2.3mf" with a quantity of 1. The price is listed as 186,67 € per unit. The specifications include: "Proceso: Impresión 3D DMLS...recto de M...", "Dimensiones: 79.3mm x 70.5mm x 29.7m...", "Material: Aluminio AISi10Mg", "Resolución (espesor de capa): 40-60", "Acabado: Standard", and "Roscas y taladros roscados: 0 lugares". There are buttons for "Duplicar", "Borrar", and "Editar especificaciones". On the right side, there's a "Resumen del pedido:" section showing "Fecha de envío: 10 días laborables", "Certificaciones: Añadir", "1 pieza (1 pza): 186,67 €", "Gastos de envío (Spain): 0,00 €", "Envío gratuito", "Aplicar código promocional", and "Valor del pedido: 186,67 € sin IVA". At the bottom, there's a "Proceder al pago" button and logos for Invoice, VISA, and PayPal.

Ilustración 145 Presupuesto online de fabricación bieleta optimizada en DMLS, Aluminio (Fuente: Xometry).

Cuyo coste final es de 188,67 €/Ud.

8. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En el presente Trabajo de Fin de Grado se ha desarrollado un modelo optimizado de una bieleta para una bicicleta de montaña modelo, perteneciente al sistema de suspensión trasera. El objetivo principal ha sido rediseñar esta pieza aplicando herramientas de ingeniería inversa, simulación por elementos finitos y técnicas avanzadas de diseño generativo, con el fin de obtener una geometría funcional, resistente y ligera.

Durante el proyecto, se ha explorado la viabilidad de diferentes procesos de fabricación mediante impresión 3D, tales como FDM (Modelado por deposición fundida) y SLA (Estereolitografía), evaluando sus características en función del material, coste, resolución y funcionalidad final.

Además de las ventajas que ofrece la impresión 3D en cuanto a libertad geométrica personalización, ha demostrado ser una herramienta clave en el mundo de la fabricación, permitiendo iteraciones rápidas y accesibles en entornos de baja producciones.

A través del análisis de costes, se concluye que la fabricación de prototipos mediante cualquier proceso de fabricación aditiva resulta más económica que los procesos de fabricación tradicionales en proyectos donde se requiere una rápida validación de diseño y o el volumen de piezas es limitado.

En el ámbito de la sostenibilidad, estos diseños complejos dan lugar a un aprovechamiento mucho más eficiente del material, utilizando la cantidad estrictamente necesaria para construir la pieza, reduciendo los residuos. Además, la producción bajo demanda evita el almacenaje excesivo y disminuye el impacto ambiental.

Los modelos obtenidos en este trabajo cumplen funciones de validación geometría y visual, aunque no son completamente funcionales en condiciones reales. De cara a trabajos futuros, se recomienda la realización de ensayos físicos de los prototipos fabricados, especialmente aquel fabricado en Aluminio 7075, en entornos reales. Estos ensayos permitirán validar las propiedades mecánicas y confirmar si la bieleta puede integrarse con total seguridad en bicicletas de montaña reales. Si los resultados fuesen positivos, sería factible plantear una

posible entrada al mercado, considerando la personalización del diseño para otros modelos de suspensión o bicicletas de diferentes gamas.

Este trabajo pone de manifiesto cómo el uso combinado de herramientas digitales y la fabricación aditiva puede no solo mejorar el rendimiento de un componente, sino también hacerlo más accesible, sostenible y adaptado a las exigencias actuales del diseño industrial.

9. BIBLIOGRAFÍA

- [1] «ONU. Objetivos del desarrollo sostenible». Disponible en: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
- [2] «FormLabs», Nociones básicas de optimización topológica. Disponible en: <https://formlabs.com/es/blog/optimizacion-topologica/#>
- [3] «Airbus' Newest Design Is Based on Bones and Slime Mold», diciembre de 2015. Disponible en: <https://www.wired.com/2015/12/airbuss-newest-design-is-based-on-slime-mold-and-bones/>
- [4] «GM's 3-D-Printed Seat Bracket Heralds a Future of Cheaper, Better Cars», *WIRED*, 22 de agosto de 2018. Disponible en: <https://www.wired.com/story/general-motors-auto-industry-3d-printing-additive-manufacturing/>
- [5] «General Motors Driving a lighter, more efficient future of automotive part design. The future of making things.», Autodesk. Disponible en: <https://www.autodesk.com/customer-stories/general-motors-generative-design>
- [6] Peter D. Dunning, Bret K. Stanford, y H. Alicia Kim, «Aerostructural Level Set Topology Optimization for a Common Research Model Wing». Disponible en: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20140011903/downloads/20140011903.pdf>
- [7] Prof. James Guest, Elizabeth Congdon, Kevin Hemker, y Steven Storck, «Topology Optimization of Lightweight, Additively Manufactured Lattice Systems for Space Applications». Disponible en: https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2018/01/guest_quad.pdf
- [8] Michael, «Design Innovative Mountain Bikes Using 3D Printing», Bigrep. [En línea]. Disponible en: <https://bigrep.com/posts/design-innovative-mountain-bikes-using-3d-printing/>
- [9] «Formlabs». Disponible en: <https://formlabs.com/es/>
- [10] Alicia Marchante, «Stellantis acelera el desarrollo de la fabricación aditiva de automóviles en Europa». Disponible en: <https://www.3dnatives.com/es/stellantis-desarrollo-fabricacion-aditiva-europa-300420252/#!>
- [11] «Del jersey de punto 3D al sillón con vida propia: los objetos que nos adelantan el futuro del diseño», *El País*, 21 de mayo de 2025. Disponible en: https://elpais.com/icon-design/2025-05-21/del-jersey-de-punto-3d-al-sillon-con-vida-propia-los-objetos-que-nos-adelantan-el-futuro-del-diseno.html?utm_source=chatgpt.com
- [12] Raquel González, «Implantes mamarios en 3D combaten la regeneración del tejido en supervivientes de cáncer de mama», *SER*, 8 de enero de 2025. Disponible en: https://cadenaser.com/murcia/2025/01/08/implantes-mamarios-en-3d-combaten-la-regeneracion-del-tejido-en-supervivientes-de-cancer-de-mama-radio-lorca/?utm_source=chatgpt.com
- [13] Radio Huesca, «Podoactiva lanza Nextep, sandalia con todos los beneficios de una plantilla personalizada de Podoactiva», *SER*, 21 de mayo de 2025. Disponible en: https://cadenaser.com/aragon/2025/05/20/podoactiva-lanza-nextep-sandalia-con-todos-los-beneficios-de-una-plantilla-personalizada-de-podoactiva-radio-huesca/?utm_source=chatgpt.com
- [14] «Prótesis dentales e impresión 3D». Disponible en: https://dental3dmarket.com/2023/06/01/aplicaciones-de-la-impresion-3d-en-el-sector-dental/?srsltid=AfmBOoq8eVgXQBBS6fIUboWQ5qepVZgvk6u0PSQj6ohHk5wsgXiDr0j&utm_source=chatgpt.com

- [15] «Ejemplos Famosos De éxitos De La Ingeniería Inversa». Disponible en: https://fastercapital.com/es/tema/ejemplos-famosos-de-éxitos-de-la-ingenieria-inversa.html?utm_source=chatgpt.com
- [16] NUÑEZ-MARTÍNEZ Uriel, SORIANO-VARGAS Orlando, COUTIÑO-MORENO Elvi, ASTREJON-SANCHEZ Víctor Hugo, MALDONADO-ONOFRE Daniel, y SANTIAGO-GONZALEZ Felipe, «Innovación del componente potencia de una bicicleta de montaña aplicando la ingeniería inversa.» Disponible en: https://www.uaeh.edu.mx/campus/icbi/seminario-regional-materiales-avanzados/sexta/topicos/pm/pm-8.pdf?utm_source=chatgpt.com
- [17] «La invención de la bicicleta». Disponible en: <https://artsandculture.google.com/story/mwXRBYATtgPOLg?hl=es-419#>
- [18] David Plaza, «Tipos de bicicletas de montaña: guía completa de XC, Trail, Enduro, Down Country, All Mountain, etc», motor.es. [En línea]. Disponible en: <https://www.motor.es/movilidad/tipos-mountain-bikes-caracteristicas-202395460.html>
- [19] KDNS, «La evolución de los frenos de disco en las bicicletas: un análisis profundo». [En línea]. Disponible en: <https://kdnsbikes.com/la-evolucion-de-los-frenos-de-disco-en-las-bicicletas/>
- [20] «Suspensión trasera para mtb: amortiguador de aire vs muelle», Pedalia.
- [21] «Anti-Squat en MTB», 32 Dientes. Disponible en: <https://www.32dientes.com/anti-squat-en-mtb/>
- [22] «Anti-Squat_Metodo Cossalter», Linkage Desing. Disponible en: <https://linkagedesign.blogspot.com/2009/04/anti-squat.html>
- [23] «Leverage Ratio», Linkage Design. Disponible en: <https://linkagedesign.blogspot.com/2009/10/leverage-ratio.html>
- [24] ESMTB, *Entendiendo los sistemas de suspensión para XC*. Disponible en: https://www.youtube.com/watch?v=gUsF_2kcnQ
- [25] «NORMATIVAS TÉCNICAS Y REGLAMENTOS SOBRE BICICLETAS EN LA UNIÓN EUROPEA». [En línea]. Disponible en: https://tuvalum.com/pages/normativa-union-europea-bicicletas?srsLtd=AfmBOopbl0fNgkUElpr3F_JehklM7N8IIH0bkMbcrlIwJwNHgVvh0bI&utm_source=chatgpt.com
- [26] «UNE Normalización Española (UNE ISO-4210)». Disponible en: <https://www.une.org>
- [27] «Specialized S-Works Stumpjumper», Specialized. [En línea]. Disponible en: <https://www.specialized.com/es/es/s-works-stumpjumper-15-ltd/p/4278252?color=5444076-4278252&searchText=93325-0205>
- [28] «NORMA UNE 4210». Disponible en: <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/70701/fichero/ANEXO+I.pdf>
- [29] «Bielela Aliexpress», Epic especializado para bicicleta, adaptador de amortiguador trasero, accesorios para bicicleta. Disponible en: <https://es.aliexpress.com/?spm=a2g0o.detail.logo.1.32f03daa3acw3E>
- [30] «Bielela Decathlon», Bielela Rockrider XC. Disponible en: <https://www.decathlon.es/es>
- [31] Mosi Shahrmiyan, «Comparación de los costos entre impresión 3D y fabricación tradicional.», Layers. Disponible en: <https://layers.app/es/blog/comparacion-de-costos-entre-impresion-3d-y-fabricacion-tradicional/>
- [32] «Servicio de impresión 3D online», BitFAB. Disponible en: <https://bitfab.io/es/>
- [33] «Proveedor materiales Impresión», Filament2print. [En línea]. Disponible en: https://filament2print.com/es/abs/2418-11778-fiberlogy-abs-5902560993820.html#/217-diametro-175_mm/942-color-onyx/943-formato-bobina_850_g
- [34] «Xometry, Presupuestos», Xometry. Disponible en: https://xometry.eu/es/?utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=2003992988&utm_content=656465279681&utm_term=xometry&utm_gad_source=1&utm_gad_campaignid=200

- 39929888&gbraid=0AAAAADBwt4ubSTHPrRAXjWKsmhnJvqf5w&gclid=CjwKCAjwme
nCBhA4EiwAtVjzmktEuQZ8arxy8PjC_ituohrzB1cQSLBo_VpIBbFvv5Fm-
8vDfXziFxoC4TsQAvD_BwE
- [35] «I.materialise, Presupuestos», I.materialise. Disponible en: <https://i.materialise.com/en>