



GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO DISEÑO GENERATIVO, SIMULACIÓN E IMPRESIÓN 3D DE TRES VERSIONES DIFERENTES DE UN RACOR DE UNA BICICLETA

Autor: Araceli Ruano Peñalver

Director: Mariano Jiménez Calzado

Madrid

Julio de 2025

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título |
DISEÑO GENERATIVO, SIMULACIÓN E IMPRESIÓN 3D DE TRES
VERSIONES DIFERENTES DE UN RACOR DE 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.: Araceli Ruano Peñalver

Fecha: 07/07/2025

Autorizada la entrega del proyecto
EL DIRECTOR DEL PROYECTO



Fdo.: Mariano Jiménez Calzado

Fecha: 07/07/2025



GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

DISEÑO GENERATIVO, SIMULACIÓN E IMPRESIÓN 3D DE TRES VERSIONES DIFERENTES DE UN RACOR DE UNA BICICLETA

Autor: Araceli Ruano Peñalver

Director: Mariano Jiménez Calzado

Madrid

Julio de 2025

Agradecimientos

Quiero dar las gracias a mis padres y a mi hermana por estar siempre ahí y por empujarme a seguir adelante cuando el camino era cuesta arriba.

También agradecer a mi familia y amigos que han formado parte de este proceso y a mi director del TFG por su guía y por ayudarme a sacar lo mejor del proyecto.

DISEÑO GENERATIVO, SIMULACIÓN E IMPRESIÓN 3D DE TRES VERSIONES DIFERENTES DE UN RACOR DE UNA BICICLETA

Autor: Ruano Peñalver, Araceli.

Director: Jiménez Calzado, Mariano.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO

Este proyecto se centra en el rediseño de una pieza estructural de bicicletas llamada racor, aplicando optimización topológica y fabricación aditiva. Se han desarrollado varias versiones del diseño y se han fabricado mediante diferentes tecnologías de impresión 3D. Los resultados obtenidos confirman que es posible reducir peso y costes sin comprometer la resistencia mecánica. La viabilidad estructural y económica se han validado con simulaciones y prototipos físicos.

Palabras clave: optimización topológica, impresión 3D, diseño generativo, método de elementos finitos.

1. Introducción

En los últimos años, la impresión 3D se ha convertido en una herramienta fundamental para el desarrollo de componentes personalizados en varios sectores como el industrial.

Este proyecto plantea el rediseño y mejora de una pieza de una bicicleta enfocado en la eficiencia estructural. A través de herramientas de simulación y diseño generativo, se ha buscado una solución que no solo cumpla su función mecánica, sino que además sea más ligera y rentable de fabricar. [1]

2. Definición del proyecto

El objetivo principal de este proyecto ha sido diseñar una pieza mecánica funcional como es el racor, aplicando procesos de optimización topológica que permitan reducir el peso sin perder resistencia [2]. Para ello, se han trabajado tres versiones distintas (simple, compuesta sin refuerzo y compuesta con refuerzo), que se han sometido a análisis estructurales y posteriormente se han fabricado mediante distintas tecnologías: FDM para las versiones macizas, SLA para las versiones refinadas y MJF como comparación. Además del diseño, se ha estudiado la viabilidad económica de cada versión.

3. Descripción del proyecto y metodología

El Proyecto ha seguido la siguiente secuencia de trabajo:

1. Diseño inicial de las piezas con SolidEdge 2024.
2. Análisis estructural con simulaciones mediante el método de elementos finitos (FEM) para detectar la tensión máxima que sufre la pieza.
3. Aplicación de optimización topológica usando algoritmos de reducción de masa.

4. Refinado geométrico con PolyNURBS en Altair Inspire 2025, ajustando las formas optimizadas a una versión imprimible.
5. Impresión 3D empleando FDM, SLA y MJF para comparar acabados, tiempos y costes.

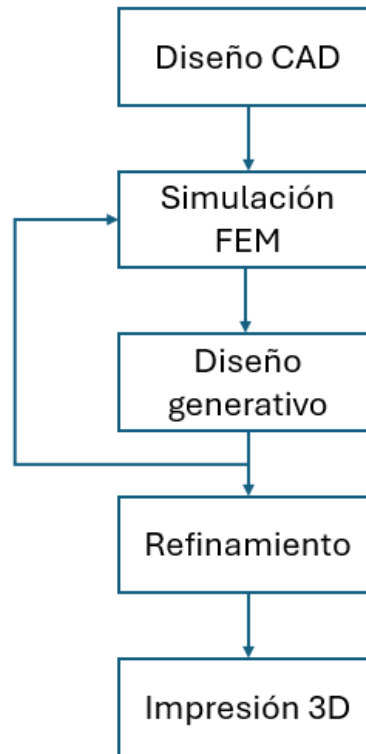


Ilustración 1. Esquema del flujo de trabajo completo

4. Resultados

Las simulaciones FEM demuestran que las piezas optimizadas mantienen una resistencia adecuada a pesar de la reducción de volumen. El ahorro del material fue especialmente significativo en la pieza compuesta con refuerzo, superando el 48% respecto a la versión maciza en todos los casos.

En cuanto al coste, los precios obtenidos para las piezas optimizadas fueron en general más bajos que los de las piezas macizas impresas con FDM, destacando que, a mayor volumen inicial, mayor ahorro tras la optimización.

En cuanto a las diferentes tecnologías de impresión 3D utilizadas, se han observado diferencias entre los acabados superficiales, siendo MJF la que mejor calidad ofrece.



Ilustración 2. Comparativa visual entre la pieza maciza mediante FDM y las piezas refinadas mediante FDM, SLA y MJF.

5. Conclusiones

Este proyecto demuestra que la combinación entre fabricación aditiva y diseño generativo puede ofrecer soluciones eficaces para componentes mecánicos. La optimización permitió aligerar considerablemente las piezas sin penalizar su comportamiento, y además supuso un ahorro real en los costes de producción. Por tanto, aplicar este tipo de procesos resulta especialmente útil en sectores donde el peso y el coste son factores clave.

6. Referencias

- [1] «¡Qué es la fabricación aditiva, tecnologías, ventajas y mucho más!», TOTVS. Accedido: 29 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://es.totvs.com/blog/gestion-industrial/que-es-la-fabricacion-aditiva-tecnologias-ventajas-y-mucho-mas/>
- [2] admin, «Optimización de la topología: ¿qué es?», Goebel Engineering. Accedido: 29 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.goebel-engineering.com/es/optimizacion-de-la-topologia-que-es/>

GENERATIVE DESIGN, SIMULATION AND 3D PRINTING OF THREE DIFFERENT VERSIONS OF A BICYCLE SEAT LUG

Author: Ruano Peñalver, Araceli.

Supervisor: Jiménez Calzado, Mariano.

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

ABSTRACT

This project focuses on the redesign of a structural bicycle component known as a lug, applying topological optimization and additive manufacturing. Several versions of the design have been developed and manufactured using different 3D printing technologies. The results confirm that it is possible to reduce both weight and cost without compromising mechanical strength. Structural and economic feasibility has been validated through simulations and physical prototypes.

Keywords: topological optimization, 3D printing, generative design, finite element method (FEM).

1. Introduction

In recent years, 3D printing has become an essential tool for developing customized components in various industries. This project proposes the redesign and improvement of a bicycle part, with a focus on structural efficiency. Through the use of simulation tools and generative design, the goal was to develop a solution that fulfils its mechanical function while being lighter and more cost-effective to manufacture.

2. Project definition

The main objective of this project was to design a functional mechanical component—specifically a lug—using topological optimization processes to reduce weight without sacrificing strength. Three different versions were developed (simple, composite without reinforcement, and composite with reinforcement), analyzed structurally, and fabricated using different technologies: FDM for solid versions, SLA for refined geometries, and MJF for comparative purposes. Additionally, the economic feasibility of each version was studied.

3. Project description and methodology

The project followed the steps below:

1. Initial design of components using Solid Edge 2024.
2. Structural analysis using Finite Element Method (FEM) simulations to identify stress concentrations.
3. Application of topological optimization using mass-reduction algorithms.
4. Geometrical refinement with PolyNURBS in Altair Inspire 2025, adapting the optimized shapes to printable versions.

5. 3D printing using FDM, SLA, and MJF to compare surface finish, print time, and production cost.

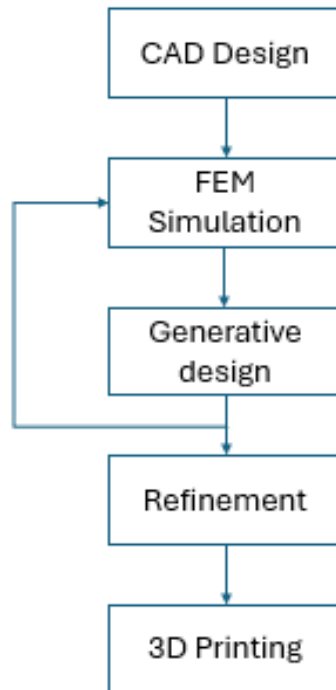


Illustration 3. Workflow diagram of the complete process.

4. Results

The FEM simulations confirmed that the optimized parts maintained adequate mechanical resistance despite a significant reduction in volume. Material savings were particularly notable in the composite piece with reinforcement, achieving a reduction of over 48% compared to the solid version in all cases.

Regarding cost, the optimized parts were generally cheaper to produce than their solid FDM-printed counterparts, with greater initial volume resulting in greater savings after optimization. Surface quality also varied noticeably, with MJF providing the best finish among the technologies tested.



Ilustración 4. Visual comparison between the solid FDM-printed piece and the refined versions manufactured with FDM, SLA and MJF

5. Conclusions

This project demonstrates that the combination of additive manufacturing and generative design can offer efficient solutions for mechanical components. Optimization significantly reduced the weight of the parts without compromising performance and also led to real cost savings. Therefore, the application of these methods proves especially valuable in fields where weight and cost are critical factors.

6. References

- [1] «¡Qué es la fabricación aditiva, tecnologías, ventajas y mucho más!», TOTVS. Accedido: 29 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://es.totvs.com/blog/gestion-industrial/que-es-la-fabricacion-aditiva-tecnologias-ventajas-y-mucho-mas/>

- [2] admin, «Optimización de la topología: ¿qué es?», Goebel Engineering. Accedido: 29 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.goebel-engineering.com/es/optimizacion-de-la-topologia-que-es/>

Índice de la memoria

Contenido

<i>Índice de la memoria</i>	14
<i>Índice de ilustraciones</i>	16
1. Introducción	22
1.1 Optimización topológica y simulación FEM.....	22
1.1.1 ¿Qué es la optimización topológica?	22
1.1.2 Simulación mediante el método de elementos finitos (FEM)	23
1.2 Fabricación aditiva o impresión 3D	24
1.3 Objetivos del proyecto.....	27
1.4 Alineación con los objetivos de desarrollo sostenible (ODS)	28
1.5 Motivación del proyecto.....	29
2. Estado de la Cuestión	30
2.1 Introducción al estado del arte.....	30
2.2 El racor en la bicicleta: definición, función y tipos.....	30
2.2.1 Evolución de las bicicletas y de los racores.....	33
2.3. Diseño generativo en la ingeniería mecánica.....	37
2.3.2. Algoritmos y herramientas de diseño generativo	37
2.3.3. Ventajas del diseño generativo frente al diseño tradicional	38
2.3.4. Aplicaciones actuales en el sector de la bicicleta	38
2.4. Impresión 3D en componentes mecánicos.....	40
2.4.1. Principios de la fabricación aditiva	40
2.4.2. Tecnologías de impresión 3D aplicables a racores	41
3. Definición del Trabajo	44
3.1 Selección de la pieza	45
3.2 Diseño CAD de las piezas	46
3.3 Elección del material: Aluminio 6061-T6.....	46
3.4 Simulación estructural de las piezas macizas	47
3.5. Proceso de optimización topológica	48
3.6 Refinamiento de la versión optimizada	49
3.7 Fabricación de prototipos mediante impresión 3D.....	50

4. Desarrollo del proyecto.....	52
4.1 Metodología para la obtención de la pieza simple	52
4.1.1 Diseño de la geometría de la pieza	52
4.1.2 Análisis FEM de la pieza original.....	54
4.1.3 Diseño generativo. Iteraciones.....	55
4.1.4 Refinamiento de la geometría.....	62
4.2 Metodología para la obtención de la pieza compuesta sin refuerzo	63
4.2.1 Diseño de la geometría de la pieza compuesta	63
4.2.2 Análisis FEM de la pieza original.....	69
4.2.3 Diseño generativo. Iteraciones.....	70
4.2.4 Refinamiento de la geometría.....	78
4.3 Metodología para la obtención de la pieza doble con refuerzo	78
4.3.1 Diseño de la geometría de la pieza	78
4.3.2 Análisis FEM de la pieza original.....	80
4.3.3 Diseño generativo. Iteraciones.....	81
4.3.4 Refinamiento de la geometría.....	88
4.4 Impresión 3D.....	90
5. Análisis de Resultados.....	97
5.1 Coste del proyecto	97
6. Conclusiones y trabajos futuros.....	102
7. Bibliografía.....	104
ANEXO 1. Presupuestos obtenidos de Xometry.....	108

Índice de ilustraciones

Ilustración 1. Esquema del flujo de trabajo completo	9
Ilustración 2. Comparativa visual entre la pieza maciza mediante FDM y las piezas refinadas mediante FDM, SLA y MJF.	10
Illustration 3. Workflow diagram of the complete process.	12
Ilustración 4. Visual comparison between the solid FDM-printed piece and the refined versions manufactured with FDM, SLA and MJF	12
Ilustración 5. Flujo de trabajo de optimización topológica y simulación mediante FEM [4]	24
Ilustración 6. Charles Chuck Hull [10].....	25
Ilustración 7. Distintos materiales utilizados para la impresión 3D [11]	25
Ilustración 8. Racor de dirección [17]	31
Ilustración 9. Racor de pedalier [18]	31
Ilustración 10. Racor del tubo sillín [19].....	31
Ilustración 11. Racor de unión [20]	32
Ilustración 12. Racor interno [21].....	32
Ilustración 13. Racor externo [22]	33
Ilustración 14. Bicicleta en 1861 [23]	33
Ilustración 15. Bicicleta en 1889 [24]	34
Ilustración 16. Bicicleta Specialized Stumpjumper de 1981 [25]	35
Ilustración 17. Cuadro de bicicleta actual de fibra de carbono [26].....	35
Ilustración 18. Cuadro de bicicleta Rivendell actual fabricada con racor metálico [27].....	36
Ilustración 19. Detalle del racor del sillín del cuadro de la imagen superior [27].....	36
Ilustración 20. Bicicleta diseñada por Decathlon usando diseño generativo de Autodesk [33]	39

Ilustración 21. Estudio de Velé [31]	39
Ilustración 22. Bicicleta impresa en 3D [35]	40
Ilustración 23. Flujo de trabajo del proyecto	45
Ilustración 24. Propiedades del aluminio 6061-T6	47
Ilustración 25. Menú de la herramienta PolyNURBS en Altair Inspire	49
Ilustración 26. Piezas impresas mediante FDM	50
Ilustración 27. Piezas impresas mediante SLA	51
Ilustración 28. Pieza impresa mediante MJF	51
Ilustración 29. Operaciones de la geometría de la pieza simple	52
Ilustración 30. Extrusión 2 de la pieza simple	52
Ilustración 31. Extrusión 2 de la pieza simple	53
Ilustración 32. Vaciado 1 de la pieza simple	53
Ilustración 33. Vaciado 2 de la pieza simple	54
Ilustración 34. Simulación FEM de la pieza simple maciza	54
Ilustración 35. Fuerza 1 de la pieza simple	55
Ilustración 36. Fuerza 2 de la pieza simple	56
Ilustración 37. Restricción fija a la pieza simple	56
Ilustración 38. Pieza simple tras la reducción de masa del 30%	57
Ilustración 39. Simulación FEM de la reducción de masa del 30% de la pieza simple	57
Ilustración 40. Pieza simple tras la reducción de masa del 40%	58
Ilustración 41. Simulación FEM de la reducción de masa del 40% de la pieza simple	59
Ilustración 42. Advertencia tras la reducción del 50% de masa	59
Ilustración 43. Pieza simple tras la reducción de masa del 45%	60
Ilustración 44. Simulación FEM de la reducción de masa del 45% de la pieza simple	60
Ilustración 45. Pieza simple tras la reducción de masa del 47%	61
Ilustración 46. Simulación FEM de la reducción de masa del 47% de la pieza simple	62
Ilustración 47. Pieza simple optimizada y refinada	62
Ilustración 48. Operaciones de la geometría de la pieza compuesta	63
Ilustración 49. Extrusión 1 de la pieza compuesta	64

Ilustración 50. Extrusión 2 de la pieza compuesta	64
Ilustración 51. Extrusión 3 de la pieza compuesta	65
Ilustración 52. Vaciado 1 de la pieza compuesta.....	65
Ilustración 53. Vaciado 2 de la pieza compuesta.....	66
Ilustración 54. Extrusión 4 de la pieza compuesta	67
Ilustración 55. Vaciado 3 de la pieza compuesta.....	67
Ilustración 56. Vaciado 4 de la pieza compuesta.....	68
Ilustración 57. Redondeo de la pieza compuesta.....	68
Ilustración 58. Simulación FEM de la pieza compuesta maciza	69
Ilustración 59. Fuerza 1 de la pieza compuesta	70
Ilustración 60. Fuerza 2 de la pieza compuesta	71
Ilustración 61. Fuerza 3 de la pieza compuesta	71
Ilustración 62. Restricción fija a la pieza compuesta	72
Ilustración 63. Pieza compuesta tras la reducción de masa del 50%.....	72
Ilustración 64. Simulación FEM de la reducción de masa del 50% de la pieza compuesta	73
Ilustración 65. Pieza compuesta tras la reducción de masa del 55%.....	74
Ilustración 66. Simulación FEM de la reducción de masa del 55% de la pieza compuesta	74
Ilustración 67. Pieza compuesta tras la reducción de masa del 57%.....	75
Ilustración 68. Simulación FEM de la reducción de masa del 57% de la pieza compuesta	75
Ilustración 69. Advertencia tras la reducción del 60% de masa	76
Ilustración 70. Pieza compuesta tras la reducción de masa del 59%.....	77
Ilustración 71. Simulación FEM de la reducción de masa del 59% de la pieza compuesta	77
Ilustración 72. Pieza compuesta optimizada y refinada	78
Ilustración 73. Pieza compuesta con refuerzo	79
Ilustración 74. Operaciones de la geometría de la pieza compuesta con refuerzo	79
Ilustración 75. Simulación FEM de la pieza compuesta con refuerzo	80
Ilustración 76. Fuerza 1 de la pieza compuesta con refuerzo	81
Ilustración 77. Fuerza 2 de la pieza compuesta con refuerzo	82
Ilustración 78. Fuerza 3 de la pieza compuesta con refuerzo	82

Ilustración 79. Restricción fija a la pieza compuesta con refuerzo	83
Ilustración 80. Pieza compuesta con refuerzo tras la reducción de masa del 50%.....	84
Ilustración 81. Simulación FEM de la reducción de masa del 50% de la pieza compuesta con refuerzo	84
Ilustración 82. Advertencia tras la reducción del 70% de masa	85
Ilustración 83. Pieza compuesta con refuerzo tras la reducción de masa del 65%.....	86
Ilustración 84. Simulación FEM de la reducción de masa del 55% de la pieza compuesta con refuerzo	86
Ilustración 85. Advertencia tras la reducción del 67% de masa	87
Ilustración 86. Pieza compuesta con refuerzo tras la reducción de masa del 66%.....	87
Ilustración 87. Simulación FEM de la reducción de masa del 66% de la pieza compuesta con refuerzo	88
Ilustración 88. Pieza compuesta con refuerzo optimizada y refinada	89
Ilustración 89. Pieza impresa sin postprocesado	91
Ilustración 90. Pieza tras haberle retirado los soportes con unas pinzas	91
Ilustración 91. Piezas macizas impresas mediante FDM	91
Ilustración 92. Piezas impresas sin postprocesado	92
Ilustración 93. Eliminación de los soportes de las piezas refinadas	93
Ilustración 94. Piezas en el horno para la curación	93
Ilustración 95. Piezas macizas impresas mediante SLA.....	93
Ilustración 96. Pieza simple refinada impresa mediante MJF	94
Ilustración 97 Comparativa entre la versión optimizada y la maciza sin optimizar de la pieza simple	95
Ilustración 98. Comparativa entre la versión optimizada y la maciza sin optimizar de la pieza compuesta sin refuerzo	95
Ilustración 99 Comparativa entre la versión optimizada y la maciza sin optimizar de la pieza compuesta con refuerzo	95
Ilustración 100. Comparativa de la pieza simple impresa mediante diferentes tecnologías	96
Ilustración 101. Precios de las impresoras de la universidad	97

Ilustración 102. Presupuesto pieza simple optimizada	98
Ilustración 103. Presupuesto pieza compuesta sin refuerzo optimizada	99
Ilustración 104. Presupuesto pieza compuesta con refuerzo optimizada	100

Índice de acrónimos

- FEM: Método de Elementos Finitos
- FDM: Modelado por Deposición Fundida
- SLA: Estereolitografía
- MJF: Multi Jet Fusion

1. INTRODUCCIÓN

1.1 OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA Y SIMULACIÓN FEM

En el diseño de componentes mecánicos, especialmente en aquellos sometidos a esfuerzos constantes, alcanzar el equilibrio entre resistencia y ligereza es una prioridad. Para lograrlo se ha recurrido a herramientas digitales como son la optimización topológica y la simulación por el método de elementos finitos (FEM), que permiten tomar decisiones de diseño fundamentales desde etapas tempranas de desarrollo. [3]

1.1.1 ¿QUÉ ES LA OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA?

La optimización topológica es una metodología que permite distribuir el material de una pieza dentro de un volumen de diseño, de manera que mejore su comportamiento estructural frente a cargas determinadas. En lugar de diseñar una geometría concreta y luego analizarla, esta técnica parte de un espacio disponible y genera automáticamente una propuesta estructural. El resultado suele ser una forma geométrica compleja que aprovecha la cantidad mínima de material posible para soportar las cargas que sufre el componente.

Esta metodología tiene un gran potencial cuando se combina con tecnologías de fabricación aditiva, ya que permite fabricar formas imposibles de mecanizar o moldear con procesos convencionales.

Para este proyecto, esta técnica ha sido esencial a la hora de aligerar el racor manteniendo su integridad estructural. [3] [4]

1.1.2 SIMULACIÓN MEDIANTE EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS (FEM)

La simulación mediante el Método de los Elementos Finitos (FEM, por sus siglas en inglés) es una herramienta computacional muy utilizada en ingeniería para predecir el comportamiento de piezas y estructuras cuando se ven sometidas a diferentes condiciones de carga. Su funcionamiento se basa en dividir la geometría del objeto en una gran cantidad de pequeñas partes llamadas elementos, que en conjunto forman una malla. A partir de ahí, se calculan las tensiones, deformaciones o desplazamientos que experimenta cada uno de estos elementos frente a fuerzas, temperaturas u otros efectos físicos.

Gracias a esta técnica, es posible evaluar el rendimiento de un diseño antes de fabricarlo físicamente, lo que permite detectar posibles fallos, mejorar la geometría o reducir el uso de material sin comprometer la seguridad. En definitiva, el FEM se ha convertido en una herramienta esencial para optimizar productos, reducir tiempos de desarrollo y minimizar costes en procesos de diseño y fabricación. [5] [6].

El proceso completo de optimización topológica y simulación FEM suele seguir una serie de pasos bien definidos:

1. Partiendo del diseño original, se define el espacio de diseño, las condiciones de contorno y las cargas que va a soportar la pieza.
2. Ese dominio se divide en pequeñas unidades mediante una malla de elementos finitos. Esto facilita el tratamiento numérico del problema y permite aplicar métodos computacionales para simular el comportamiento del material.
3. Se inicia una fase iterativa con el problema planteado mediante algoritmos de optimización que van ajustando la distribución del material según los resultados obtenidos en cada iteración.
4. Este proceso continúa hasta que alcanza una solución que cumple con los criterios establecidos, tanto en términos de eficiencia como de cumplimiento de restricciones.

5. Se lleva a cabo una validación final cuando se encuentra la geometría óptima utilizando el método de elementos finitos (FEM), que permite comprobar que el diseño resultante mantiene un comportamiento mecánico adecuado bajo las condiciones reales de uso. [4]

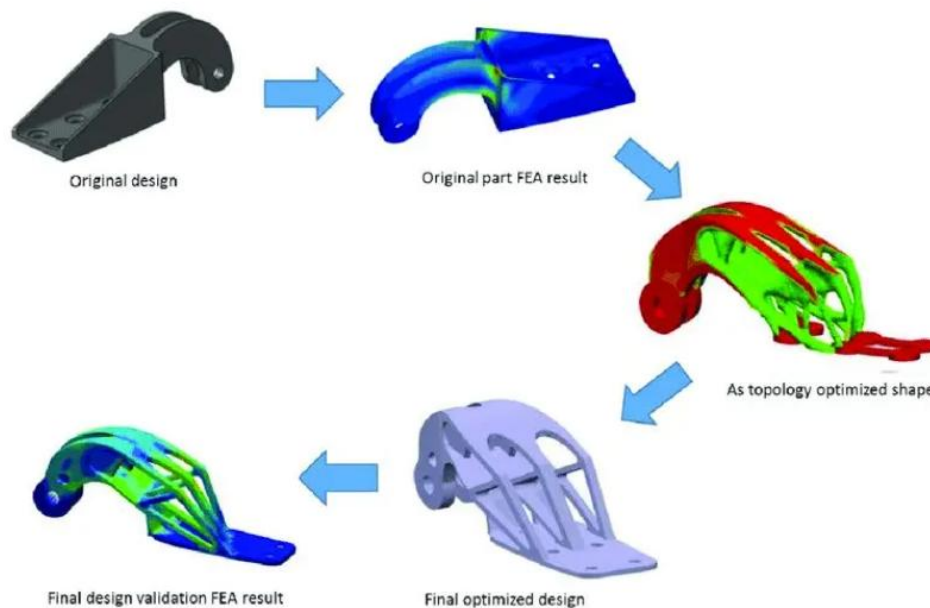


Ilustración 5. Flujo de trabajo de optimización topológica y simulación mediante FEM [4]

1.2 FABRICACIÓN ADITIVA O IMPRESIÓN 3D

La fabricación aditiva, conocida también como impresión 3D, surgió en los años 80 y ahora se ha convertido en una tecnología clave en el desarrollo de productos, prototipos e incluso piezas finales en múltiples sectores industriales. [7]

Los inicios de esta tecnología se remontan a 1984 cuando Charles Chuck Hull, ingeniero físico neoyorquino, desarrolló la estereolitografía, un método pionero que permitía crear piezas sólidas capa a capa a partir de resina líquida fotosensible, solidificada mediante luz ultravioleta [8]. Poco después, en 1986, Hull patentó esta técnica y fundó la empresa 3D Systems, dando así el primer paso hacia la comercialización de la impresión 3D. [9]



Ilustración 6. Charles Chuck Hull [10]

A lo largo de los años 90 y principios de los 2000, el panorama de la fabricación aditiva se amplió con el desarrollo de nuevos procesos como la sinterización selectiva por láser (SLS) y el modelado por deposición fundida (FDM). Estas tecnologías introdujeron nuevas posibilidades para trabajar con distintos tipos de materiales, como plásticos en filamento o polvos sintéticos, y permitieron imprimir formas más complejas de manera más accesible y económica.



Ilustración 7. Distintos materiales utilizados para la impresión 3D [11]

En sus primeras etapas, la impresión 3D se utilizaba principalmente para crear prototipos de validación, ya que su rapidez permitía comprobar formas y encajes antes de fabricar las piezas definitivas. Sin embargo, con el paso del tiempo y la mejora de los equipos, la fabricación aditiva empezó a utilizarse también para producir piezas finales, incluso en sectores tan exigentes como la medicina, la automoción o la industria aeroespacial. Uno de los factores que más ha contribuido a esta evolución ha sido el desarrollo de nuevos materiales. A los polímeros iniciales se han sumado metales, cerámicas, compuestos y elementos biodegradables, ampliando considerablemente el abanico de aplicaciones. A su vez, las impresoras 3D han mejorado notablemente en velocidad, resolución y precisión, lo que permite fabricar geometrías cada vez más complejas con acabados muy próximos a los de las piezas convencionales.

Hoy en día, la fabricación aditiva ya no se limita al ámbito del prototipado. En medicina, por ejemplo, se emplea para fabricar prótesis personalizadas, guías quirúrgicas e incluso implantes a medida. En el sector aeroespacial, se producen componentes ligeros y resistentes que ayudan a reducir el peso de los aviones. En automoción, se utiliza tanto para prototipos funcionales como para piezas de producción en series limitadas. También ha ganado terreno en el ámbito de la joyería y el diseño, gracias a su capacidad para reproducir detalles extremadamente finos. [12]

A medida que esta tecnología ha ganado madurez y fiabilidad, el término "manufactura aditiva" ha empezado a sustituir a "fabricación aditiva" en muchos entornos profesionales. Este cambio refleja su transición desde un recurso de laboratorio hacia una herramienta productiva en entornos industriales reales, con aplicaciones cada vez más cercanas a la producción en serie. [13]

1.3 OBJETIVOS DEL PROYECTO

Los objetivos de este proyecto se centran en la resolución de los principales retos asociados al diseño y fabricación aditiva de un componente industrial utilizando herramientas avanzadas. A continuación, se listan y explican los objetivos específicos:

- Diseñar un componente industrial mediante el uso de herramientas de diseño generativo. Se explorarán y se aprovecharán las capacidades de diseño generativo para crear un componente optimizado en función de restricciones técnicas y objetivos predefinidos como la reducción de peso, el aumento de resistencia o la minimización de costes.
- Simular el comportamiento del diseño durante el proceso de fabricación y su uso implementando herramientas de simulación computacional para reducir posibles problemas que puedan surgir durante la impresión 3D o en la etapa de uso del componente. Esto garantiza la calidad y fiabilidad del producto final.
- Comparar materiales y tecnologías para optimizar el diseño y la producción mediante la investigación y selección de los materiales más adecuados para el componente teniendo en cuenta sus propiedades mecánicas, coste y sostenibilidad. Además, se determinará la tecnología de fabricación aditiva más eficiente para el caso de estudio.
- Contribuir al desarrollo de prácticas sostenibles en la ingeniería industrial promoviendo el uso de tecnologías que reduzcan el desperdicio de materiales y el impacto ambiental destacando los beneficios del diseño generativo y la fabricación aditiva como herramienta clave para una industria más responsable.

1.4 ALINEACIÓN CON LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE (ODS)

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) son una iniciativa global impulsada por las Naciones Unidas como parte de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. Consiste en 17 objetivos diseñados para abordar los desafíos más necesarios del mundo como la pobreza, la desigualdad, el cambio climático, la degradación ambiental, la paz y la justicia. Proporcionan un plan para construir un mundo más equitativo y sostenible involucrando a todos los sectores de la sociedad en un esfuerzo colectivo para transformar el futuro. [14]

Este proyecto se alinea con varios ODS:

- ODS 9: Industria, innovación e infraestructura



Fomenta la innovación tecnológica mediante el uso del diseño generativo y fabricación aditiva, contribuyendo al desarrollo de infraestructura moderna y sostenible.

- ODS 12: Producción y consumo responsable



Promueve el uso eficiente de materiales y recursos, minimizando el desperdicio mediante la optimización de diseños y procesos productivos sostenibles.

- ODS 13: Acción por el clima



Reduce la huella ambiental al disminuir el consumo de materiales y energía en los procesos de producción, contribuyendo a combatir el cambio climático.

Estas contribuciones refuerzan el compromiso del proyecto con la sostenibilidad y el desarrollo responsable.

1.5 MOTIVACIÓN DEL PROYECTO

Este proyecto surge como respuesta a la necesidad de optimizar componentes estructurales, reduciendo peso, material y costes sin comprometer a su resistencia. En un contexto donde la eficiencia y la sostenibilidad son cada vez más importantes, aplicar la optimización topológica junto a la impresión 3D supone una alternativa eficaz.

Se ha elegido el racor de una bicicleta porque es una pieza estructural clave, tradicionalmente limitada por métodos de fabricación convencionales. Rediseñarlo mediante herramientas de diseño generativo permite obtener una geometría más eficiente, ligera y adecuada para tecnologías aditivas.

Comparar su fabricación con FDM, SLA y MJF permite analizar de forma práctica las diferencias entre tres tecnologías ampliamente utilizadas, aportando datos técnicos y económicos útiles. Además, el proyecto integra todas las etapas del desarrollo del producto; diseño, simulación y fabricación, lo que le da tanto valor académico como aplicación real en sectores como el ciclismo.

En resumen, este trabajo propone una solución innovadora a un problema real, demostrando cómo es posible mejorar piezas convencionales usando herramientas de ingeniería actuales.

2. ESTADO DE LA CUESTIÓN

2.1 INTRODUCCIÓN AL ESTADO DEL ARTE

Este capítulo presenta el contexto técnico del proyecto, centrado en el uso del diseño generativo y la impresión 3D para desarrollar racores de bicicleta. En este apartado se estudian los avances que existen sobre estas tecnologías, qué herramientas se utilizan actualmente y que retos siguen presentes en esta técnica.

En este trabajo se combinan tres aspectos clave: el análisis del racor como pieza estructural en distintos tipos de bicicletas, el potencial del diseño generativo como técnica de optimización, y el uso de impresión 3D metálica como método de fabricación. Además, se incluye una revisión de herramientas de simulación que permiten anticipar errores y mejora la calidad del diseño final.

Para elaborar este apartado, se han consultado tanto fuentes científicas como ejemplos prácticos de empresas que ya aplican estas tecnologías en sus procesos. Esta combinación de referencias permite entender y justificar el enfoque adoptado en el proyecto, así como situarlo dentro de una línea de innovación actual en el diseño y fabricación de componentes mecánicos para bicicletas.

2.2 EL RACOR EN LA BICICLETA: DEFINICIÓN, FUNCIÓN Y TIPOS

Como definición general, un racor es una pieza de unión entre tubos o perfiles cilíndricos [15]. Una de las utilidades de este tipo de piezas es la unión de los tubos metálicos que conforman el cuadro de una bicicleta. En una bicicleta, el racor aporta resistencia en las uniones, que son zonas críticas en cuanto a los esfuerzos que sufre la estructura de la bicicleta [16]. Una bicicleta puede tener varios racores, según su funcionalidad y ubicación en la bicicleta:

- Racor de dirección (*head lug*): une el tubo de dirección con el tubo superior y el tubo diagonal, un ejemplo de este objeto se muestra en la Ilustración 8.



Ilustración 8. Racor de dirección [17]

- Racor de pedalier (*bottom bracket lug*): une el tubo del asiento, el tubo diagonal, y las vainas inferiores al eje del pedalier. Puede observarse un ejemplo de este objeto en la Ilustración 9.



Ilustración 9. Racor de pedalier [18]

- Racor del tubo de sillín (*seat lug*): une el tubo del asiento con el tubo y los tirantes superiores. Se presenta un ejemplo representativo de este objeto en la Ilustración 10



Ilustración 10. Racor del tubo sillín [19]

- Racores de unión en vainas y tirantes: conectan los tubos traseros del cuadro (vainas y tirantes) con el racor del pedalier o el de sillín. Este objeto queda ilustrado en la Ilustración 11.



Ilustración 11. Racor de unión [20]

Además, según su morfología, los racores de una bicicleta se pueden clasificar en:

- Racores internos: el racor se inserta en el interior de los tubos metálicos. En la Ilustración 12 se aprecia un ejemplo de este objeto.



Ilustración 12. Racor interno [21]

- Racores externos: los tubos metálicos se insertan dentro del racor. Se puede visualizar una muestra en la Ilustración 13



Ilustración 13. Racor externo [22]

Según estas clasificaciones, este trabajo se ha centrado en un racor externo de tubo de sillín.

2.2.1 EVOLUCIÓN DE LAS BICICLETAS Y DE LOS RACORES

A mediados del siglo XIX, las primeras bicicletas comenzaron a construirse con piezas irregulares y curvas. Estas piezas obligaban a una elaboración prácticamente artesanal como se puede comprobar en la Ilustración 14.



Ilustración 14. Bicicleta en 1861 [23]

Según avanzaba la revolución industrial, los procesos de fabricación se fueron estandarizando, y los tubos metálicos, de dimensiones estándar y de fácil fabricación en serie, se fueron empleando cada vez más para la elaboración de los cuadros de bicicleta. En este contexto, la utilización de los racores para unir estos tubos se fue haciendo más necesaria, ya que permitían la fabricación de un cuadro de bicicleta de forma más simple y económica. El racor, además de reforzar las zonas de unión, permitía lograr una geometría precisa y estandarizada. En la Ilustración 15 se muestra una bicicleta de esta época.



Ilustración 15. Bicicleta en 1889 [24]

A finales del siglo XX, con las mejoras de las técnicas de soldadura, los racores se volvieron prescindibles. Muchos cuadros metálicos se empezaron a fabricar con soldadura directa entre los tubos. Además, se empezaron a utilizar nuevos materiales como la fibra de carbono, en los que no se requiere la utilización de estas piezas de unión. En los cuadros de fibra de carbono, los cuadros se moldean en una sola pieza. Tanto la soldadura directa, como la fibra de carbono permiten construir bicicletas con menos piezas, lo que repercute tanto en la

ligereza de la bicicleta como en el coste de fabricación. Un modelo de este objeto se representa en la Ilustración 16.



Ilustración 16. Bicicleta Specialized Stumpjumper de 1981 [25]

Hoy en día, se siguen empleando racores en algunas bicicletas, principalmente en marcas más artesanales o que buscan una estética “retro”. Sin embargo, ya no se usa en bicicletas modernas comerciales. Las bicicletas de gama alta se suelen fabricar en fibra de carbono monobloque, o en aluminio con soldadura TIG sin racores, mientras que las de gama baja se suelen fabricar en acero, y también se sueldan directamente sin racores empleando soldadura TIG. En la Ilustración 17 y en la Ilustración 18 se muestran dos ejemplos de cuadros que se utilizan actualmente. En la Ilustración 19 se observa un detalle de un racor de sillín del cuadro de la Ilustración 18.



Ilustración 17. Cuadro de bicicleta actual de fibra de carbono [26]



Ilustración 18. Cuadro de bicicleta Rivendell actual fabricada con racor metálico [27]



Ilustración 19. Detalle del racor del sillín del cuadro de la imagen superior [27]

2.3. DISEÑO GENERATIVO EN LA INGENIERÍA MECÁNICA

2.3.1. FUNDAMENTOS DEL DISEÑO GENERATIVO

El diseño generativo es una metodología avanzada que emplea algoritmos para generar soluciones estructurales a partir de unas condiciones de contorno predefinidas, como fuerzas aplicadas, restricciones geométricas, materiales disponibles o áreas que deben preservarse. Inspirado en procesos evolutivos, este enfoque permite explorar iterativamente una gran cantidad de geometrías viables, evaluándolas según criterios como la rigidez, el peso o la eficiencia estructural. [28] [29]

Las formas resultantes suelen ser orgánicas y optimizadas, muchas veces contrarias a la intuición humana, pero estructuralmente eficientes. Esta metodología se ha consolidado en sectores donde la ligereza y la resistencia son factores críticos, como la automoción, la aeronáutica, o el ciclismo, donde los componentes deben soportar cargas variables con el menor peso posible. [30] [31]

2.3.2. ALGORITMOS Y HERRAMIENTAS DE DISEÑO GENERATIVO

Los algoritmos empleados en diseño generativo incluyen técnicas de optimización topológica y simulación por elementos finitos (FEM), que permiten evaluar el rendimiento mecánico de cada iteración geométrica generada. En lugar de partir de una geometría fija, se define un espacio de diseño, y el software genera automáticamente estructuras que cumplen con los objetivos establecidos.

En este proyecto, el flujo de trabajo seguido fue el siguiente:

- 1) Diseño completo inicial de la pieza en Solid Edge 2024, respetando condiciones funcionales y sin aplicar optimización.
- 2) Simulación estructural del modelo base para detectar la exigencia mecánica de las diferentes zonas de la pieza.

- 3) Inicio de las iteraciones de diseño generativo en Solid Edge, ajustando parámetros como porcentaje de masa a reducir y zonas a preservar. Tras cada iteración se realizó una nueva simulación para evaluar el rendimiento estructural.
- 4) Una vez identificada la versión óptima en términos de masa reducida y tensiones aceptables, se exportó a Altair Inspire para el refinamiento mediante PolyNURBS, transformando la geometría generada en una superficie suave, continua y adecuada para impresión 3D [32].

Esta secuencia garantiza una evolución controlada desde un diseño funcional hasta una solución estructuralmente optimizada.

2.3.3. VENTAJAS DEL DISEÑO GENERATIVO FRENTE AL DISEÑO TRADICIONAL

El enfoque adoptado ofrece ventajas claras respecto al diseño convencional. La primera es la facilidad de explorar múltiples soluciones de diseño de manera rápida, algo que sería inviable con métodos tradicionales. Además, el uso de simulaciones iterativas permite validar cada geometría antes de avanzar, asegurando la resistencia estructural en todo momento.

Otra ventaja fundamental es la optimización de masa, reduciendo significativamente el material empleado y, por tanto, el peso de la pieza. Esto no solo mejora el rendimiento, sino que también reduce los costes de fabricación y el impacto ambiental. [29] [33]

2.3.4. APLICACIONES ACTUALES EN EL SECTOR DE LA BICICLETA

El sector de la bicicleta es especialmente sensible al peso y la resistencia de sus componentes, lo que ha convertido al diseño generativo en una herramienta cada vez más utilizada. Empresas y centros de investigación han aplicado esta metodología en cuadros, manillares, tijas, potencias y racores, optimizando su rendimiento mecánico y adaptándolos a normativas de seguridad internacional [31].

Un ejemplo representativo es el caso de Decathlon, que junto a Autodesk desarrolló un cuadro de bicicleta mediante diseño generativo y fabricación aditiva metálica. El resultado fue una estructura más ligera y robusta, alineada con criterios de sostenibilidad y eficiencia estructural [34] [33] como se muestra en la Ilustración 20.



Ilustración 20. Bicicleta diseñada por Decathlon usando diseño generativo de Autodesk [33]

También destaca el estudio de Véle et al. sobre un manillar de bicicleta optimizado con Siemens NX y refinado con Altair Inspire mostrado en la Ilustración 21, que logró una reducción de peso del 7,9 % cumpliendo con la norma ISO 4210-5 [31].

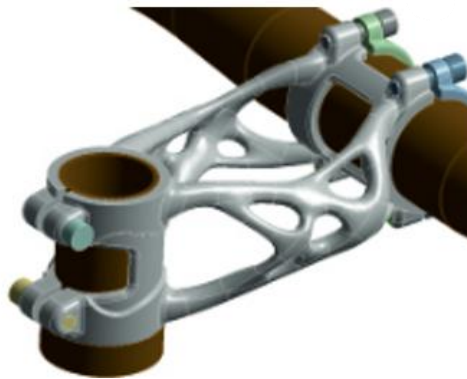


Ilustración 21. Estudio de Velé [31]

Por otro lado, la empresa Urwahn Bikes aplicó Inspire para crear componentes impresos en 3D con geometrías personalizadas que respetan las exigencias de resistencia de las normas DIN-ISO [35]. La Ilustración 22 muestra la bicicleta descrita anteriormente impresa en 3D.



Ilustración 22. Bicicleta impresa en 3D [35]

2.4. IMPRESIÓN 3D EN COMPONENTES MECÁNICOS

2.4.1. PRINCIPIOS DE LA FABRICACIÓN ADITIVA

La impresión 3D o fabricación aditiva consiste en crear piezas capa a capa desde un modelo digital tridimensional, sin necesidad de herramientas específicas, lo que permite formas complejas y estructuras optimizadas [36].

La fabricación aditiva comienza con un modelo digital en 3D de la pieza a fabricar. Este modelo se descompone en capas muy delgadas con un software de ordenador. Con esto, se puede enviar a la máquina de fabricación aditiva, que irá depositando material capa por capa para ir formando la pieza tridimensional.

Existen diferentes tecnologías de fabricación aditiva que se desarrollan en el siguiente apartado.

2.4.2. TECNOLOGÍAS DE IMPRESIÓN 3D APLICABLES A RACORES

A continuación, se describen las principales tecnologías de impresión 3D que pueden aplicarse a racores, diferenciando aquellas que emplean materiales poliméricos como las que trabajan con metales.

FDM (Fused Deposition Modeling)

Es la técnica más extendida y conocida. Funciona extruyendo un filamento de plástico que se funde y deposita capa a capa para construir la pieza. Es muy útil para la fabricación de prototipos ya que es económica, accesible y permite validar rápidamente el diseño inicial. Suele utilizar materiales como PLA o ABS, aunque también existen versiones reforzadas con fibra de carbono. Su principal desventaja está en la precisión limitada y en las propiedades mecánicas inferiores frente a otras técnicas. [37]

SLA y DPL (Estereolitografía y Proyección de Luz Digital)

Ambas tecnologías utilizan luz ultravioleta para curar resinas fotosensibles capa a capa. El resultado son piezas con un nivel de detalle muy alto y superficies lisas. Son ideales para verificar tolerancias o formas complejas. Sin embargo, las resinas suelen ser frágiles. Estas técnicas son muy útiles en la fase de validación geométrica del diseño. [38]

SLS (Sinterizado Selectivo por Láser)

Este proceso utiliza un láser para sinterizar polvo de polímero (normalmente PA12 o PA11) sin necesidad de estructuras de soporte. Permite obtener piezas resistentes con buenas propiedades mecánicas. Su principal ventaja es que puede producir piezas finales completamente funcionales. Sin embargo, la superficie tiende a ser rugosa y puede requerir postprocesado. [39]

MJF (Multi Jet Fusion)

Esta tecnología desarrollada por HP utiliza polvo de polímero, pero en lugar de láser, emplea agentes químicos y calor para consolidar el material. Ofrece una excelente combinación de precisión, resistencia y acabado superficial. [40]

Es una de las mejores opciones para fabricar el racor ya que las piezas resultantes presentan buena rigidez, homogeneidad y tolerancias ajustadas.

CFF (Continuous Filament Fabrication-Markforged)

A diferencia del método FDM, esta tecnología incorpora refuerzo de fibra continua (como carbono o kevlar) en el interior de la pieza. El resultado es una pieza con una relación resistencia-peso muy alta. [41]

También existen tecnologías de impresión 3D en metal para cuando las piezas necesitan soportar grandes esfuerzos o cuando se necesita una larga durabilidad. Son más caras, pero permiten fabricar piezas funcionales con un rendimiento estructural muy alto.

DMLS/ SLM (Sinterizado Láser Directo de Metal)

Ambas técnicas consisten en fundir polvo metálico capa a capa utilizando un láser de alta potencia. Se pueden utilizar materiales como el aluminio, acero inoxidable o titanio y se consiguen piezas con muy buenas propiedades mecánicas. [42]

Binder Jetting (inyección de aglutinante y sinterizado)

Esta tecnología emplea un agente aglutinante que se deposita sobre el polvo metálico para formar las piezas, que posteriormente se sinterizan en el horno. [43]

WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing)

Este proceso funde hilo metálico utilizando un arco eléctrico, como ocurre en soldadura por arco, permitiendo fabricar grandes volúmenes de forma rápida. [44]

En este trabajo se ha optado por considerar materiales como filamento PLA, resina rígida y polvo PA12 para que sirvan como base comparativa.

3. DEFINICIÓN DEL TRABAJO

Para el desarrollo de este proyecto se ha seguido una metodología basada en distintas fases de diseño, simulación y análisis, con el objetivo de rediseñar una pieza del cuadro de una bicicleta: el *seat lug* o racor del tubo del sillín mediante técnicas de optimización topológica.

En primer lugar, se ha seleccionado la pieza objeto de estudio. Se ha elegido esta pieza de la bicicleta ya que desempeña un papel importante como unión entre el tubo vertical del cuadro y el tubo horizontal, y está sometida a esfuerzos relevantes. Se han estudiado 3 versiones diferentes de esta pieza siguiendo una misma metodología, que consta de 5 etapas:

- Diseño CAD 3D mediante el Software SolidEdge 2024.
- Fase de simulación de la pieza maciza mediante el método de elementos finitos (FEM).
- Diseño generativo de la pieza mediante diferentes iteraciones.
- Refinamiento de las versiones finales mediante el Software Altair Inspire 2025.
- Impresión 3D de la pieza.

Las fases 2, 3 y 4 siguen un proceso iterativo hasta que se encuentra la mejor solución, es decir, aquella con la máxima reducción de material de la pieza cumpliendo las necesidades mecánicas.

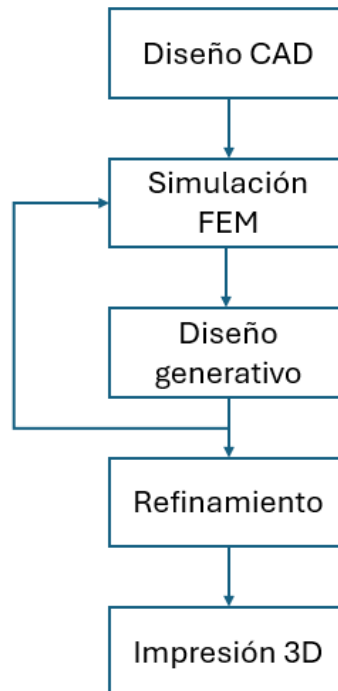


Ilustración 23, Flujo de trabajo del proyecto

En los siguientes apartados se describen con más detalle cada uno de los pasos anteriores:

3.1 SELECCIÓN DE LA PIEZA

En primer lugar, se seleccionó el *seat lug* como pieza de estudio por tratarse de un componente estructural que tiene un papel clave en la distribución de esfuerzos dentro del cuadro. Este componente está sometido a esfuerzos de tracción, compresión y flexión, especialmente durante el pedaleo y los cambios de terreno, además de soportar parte del peso del ciclista.

Se definieron las condiciones de contorno que permitirían simular su funcionamiento habitual. Se consideraron cargas verticales asociadas al peso del ciclista (800N) y esfuerzos laterales (800N) vinculados a los movimientos de la bicicleta, así como las restricciones necesarias para que la pieza permanezca en equilibrio y unida al cuadro de la bicicleta.

3.2 DISEÑO CAD DE LAS PIEZAS

Con el problema bien definido, se procedió a diseñar tres versiones distintas de la pieza utilizando el software Solid Edge 2024. Estas versiones tienen diferentes formas y configuraciones geométricas, aunque todas ellas respetan los requisitos funcionales del racor, como la unión con los tubos del cuadro y el espacio necesario para su ensamblaje.

El propósito de esta fase era disponer de varias propuestas sobre las que poder trabajar posteriormente en términos de rendimiento estructural y reducción de masa. Ninguna de estas versiones incluía aún la optimización topológica; se trata de diseños base con los que iniciar el análisis.

3.3 ELECCIÓN DEL MATERIAL: ALUMINIO 6061-T6

Antes de iniciar las simulaciones estructurales, fue necesario seleccionar un material que sirviera como referencia para todas las versiones. Se eligió el aluminio 6061-T6, una aleación ligera y resistente muy utilizada en la fabricación de cuadros de bicicleta y otros componentes sometidos a esfuerzo. Las propiedades de este material se muestran en la Ilustración 24.

Esta elección se debe principalmente a su excelente equilibrio entre resistencia mecánica y peso, lo que permite mantener una estructura robusta sin añadir masa innecesaria. Además, el aluminio 6061-T6 es resistente a la corrosión, fácil de mecanizar y compatible con técnicas de fabricación convencionales y aditivas. [45]

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

Estilo de cara: Aluminio  Administrar estilos...

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

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

Descripción
Definición de material = Aluminio, 6061-T6, Estilo de cara = Aluminio, Estilo de relleno = ANSI38(Aluminio)

Material aplicado actualmente al modelo: Aluminio, 6061-T6 (Materials\Metales\Aleaciones de aluminio)

Ilustración 24. Propiedades del aluminio 6061-T6

En las simulaciones FEM que se realizaron a continuación, se tuvo en cuenta las propiedades mecánicas del aluminio 6061-T6.

3.4 SIMULACIÓN ESTRUCTURAL DE LAS PIEZAS MACIZAS

Con los tres modelos CAD y el material definido, se llevó a cabo una primera serie de análisis estructurales mediante el método de los elementos finitos (FEM) antes de aplicar la optimización topológica. El objetivo de esta fase es evaluar el comportamiento de cada versión original del *seat lug*.

Las simulaciones permitieron observar la distribución de tensiones, los desplazamientos máximos y la respuesta general de cada pieza ante las condiciones de carga establecidas.

El objetivo principal de esta etapa es verificar que la pieza no sobrepasa la tensión máxima admisible del material, garantizando así que no se producirá una fractura durante su uso previsto.

3.5. PROCESO DE OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA

Una vez validadas estructuralmente las tres versiones iniciales, se inició el proceso de optimización topológica. El objetivo es reducir al máximo la masa de cada pieza sin comprometer su integridad mecánica. Para ello se utilizó el entorno de diseño generativo de Solid Edge, que permite definir las zonas funcionales de la pieza, las cargas aplicadas y las regiones que no pueden ser modificadas (por ejemplo, las zonas de unión con otros tubos del cuadro donde se ha dejado un desplazamiento de 10 mm).

Una vez establecidos todos los parámetros anteriores, se inicia el proceso del diseño generativo. Este estudio se lleva a cabo con una calidad de malla predeterminada (calidad 5), que corresponde al tamaño de los elementos utilizados en la malla.

Cada versión fue sometida a distintas iteraciones, en las que se ajustaba el porcentaje de masa a eliminar, con el fin de seleccionar la configuración óptima, es decir, aquella que presentara una tensión cercana al valor máximo admisible sin sobrepasarlo. Se utilizó un factor de seguridad de 2, es decir, se ha utilizado como tensión máxima admisible la mitad del límite elástico del material. Tras cada iteración, se realizaban simulaciones por elementos finitos para comprobar que las tensiones se mantenían dentro de los límites elásticos del material y que la pieza seguía cumpliendo su función estructural.

Este proceso permitió determinar, para cada diseño, una versión optimizada que ofrecía una buena relación entre masa reducida y comportamiento mecánico adecuado.

3.6 REFINAMIENTO DE LA VERSIÓN OPTIMIZADA

Solo las versiones más eficientes de cada diseño pasaron a una última fase de refinamiento geométrico. Esta etapa tuvo como objetivo suavizar la forma resultante de la optimización topológica, transformando la geometría rugosa generada automáticamente en un modelo continuo, limpio y adecuado para su posterior fabricación.

El refinamiento se llevó a cabo en el software Altair Inspire, utilizando su módulo de modelado PolyNURBS, que permite reconstruir la pieza a partir de superficies ajustadas al contorno optimizado, respetando tanto las restricciones geométricas como funcionales definidas previamente. En la Ilustración 25 se muestra el menú donde localizar esta herramienta.



Ilustración 25. Menú de la herramienta PolyNURBS en Altair Inspire

El resultado es un modelo final que mantiene las ventajas estructurales obtenidas durante la optimización, pero con una forma refinada y más adecuada para procesos como la impresión 3D que se realizó a continuación.

3.7 FABRICACIÓN DE PROTOTIPOS MEDIANTE IMPRESIÓN 3D

Una vez finalizada la fase de refinamiento de la pieza, se procedió a la fabricación de las piezas mediante impresión 3D utilizando 3 tecnologías diferentes: FDM, SLA y MJF. El objetivo era comparar el resultado de cada una de las tecnologías de impresión 3D en las diferentes piezas.

1. Impresión FDM (Fused Deposition Modeling)

Este primer método, basado en la deposición de filamento fundido capa a capa, se lleva a cabo utilizando una impresora Prusa MK3 y el software de laminado Ultimaker Cura. Para esta impresión se selecciona el material PLA (ácido poliláctico), debido a su facilidad de uso, bajo coste y adecuada rigidez para prototipos visuales y funcionales simples. Aunque se trata de un método accesible, su precisión dimensional es inferior respecto a otras tecnologías, así como la resistencia mecánica de las piezas obtenidas. [46]



Ilustración 26. Piezas impresas mediante FDM

2. Impresión SLA (Stereolithography)

Como segunda versión de impresión 3D se opta por la tecnología SLA, que permite obtener piezas con mayor resolución y acabado superficial mediante la fotopolimerización de resina líquida. La impresión se realizó en una Form 3 utilizando el software PreForm, y el material

seleccionado fue la resina rígida, adecuada para piezas con exigencias dimensionales más estrictas y mayor rigidez estructural. Esta técnica ofreció un acabado mucho más fino. [47]



Ilustración 27, Piezas impresas mediante SLA

3. Impresión MJF (Multi Jet Fusion)

Por último, se empleó la tecnología Multi Jet Fusion (MJF) de HP, una variante avanzada de las técnicas basadas en polvo, como el SLS. El material utilizado fue PA12 (poliamida 12), ampliamente utilizado en aplicaciones funcionales por su elevada resistencia mecánica y estabilidad térmica. Esta impresión se llevó a cabo en un equipo HP 580C, lo que permitió obtener una pieza final con excelente definición y propiedades mecánicas superiores, siendo la opción más recomendable para una futura producción real de la pieza. [48]



Ilustración 28. Pieza impresa mediante MJF

4. DESARROLLO DEL PROYECTO

4.1 METODOLOGÍA PARA LA OBTENCIÓN DE LA PIEZA SIMPLE

4.1.1 DISEÑO DE LA GEOMETRÍA DE LA PIEZA

El proceso de modelado de la primera pieza se ha estructurado en cuatro operaciones:

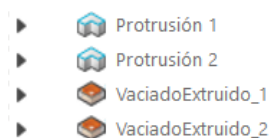


Ilustración 29. Operaciones de la geometría de la pieza simple

A continuación, se describen con detalle cada una de estas operaciones:

En primer lugar, se efectúa una extrusión inicial para conformar el cilindro principal como se observa en la Ilustración 30. Sobre la parte superior de este cilindro se insertará la tija del sillín y el extremo inferior se unirá a una barra vertical del cuadro de la bicicleta.

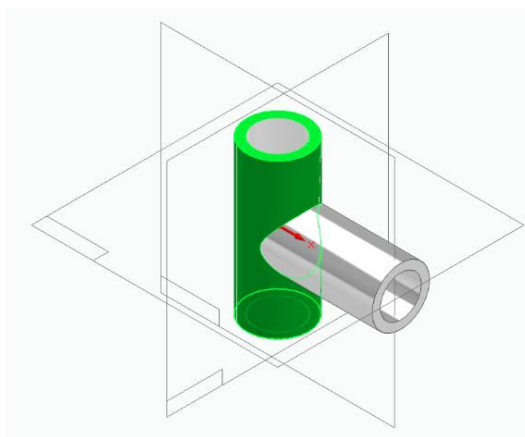


Ilustración 30. Extrusión 2 de la pieza simple

Posteriormente, se añade un segundo cilindro mediante otra operación de extrusión como se muestra en la Ilustración 31 permitiendo obtener una estructura secundaria adjunta al cilindro principal. Este cilindro se une a la barra horizontal del cuadro de la bicicleta.

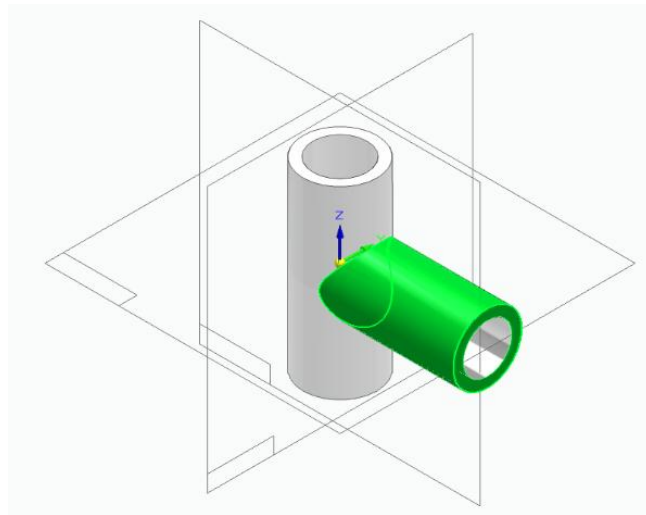


Ilustración 31. Extrusión 2 de la pieza simple

A continuación, se procede a realizar el primer vaciado sobre el cilindro principal como se observa en la Ilustración 32, creando un agujero pasante con un diámetro de 22 milímetros siendo el espesor del tubo de 4 mm.

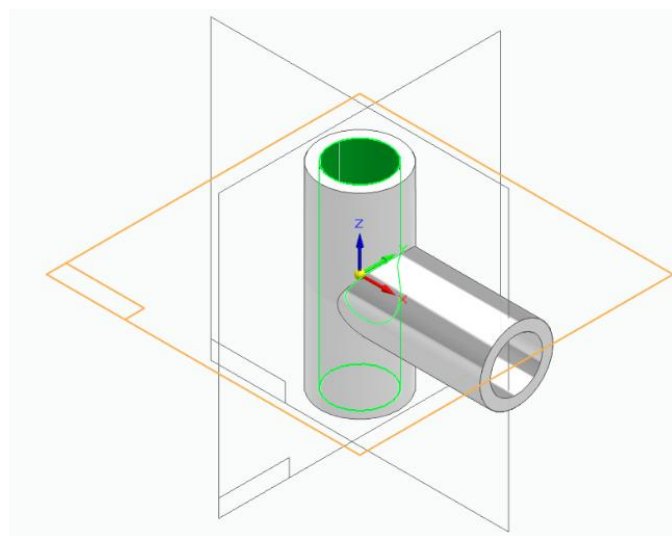


Ilustración 32. Vaciado 1 de la pieza simple

Finalmente, se ejecuta otro vaciado sobre el cilindro secundario como se muestra en la Ilustración 33, obteniendo otro agujero con un diámetro de 20 milímetros, completando así el proceso de modelado tridimensional de la pieza.

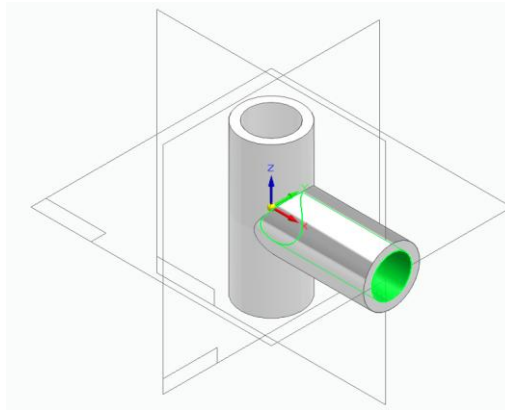


Ilustración 33. Vaciado 2 de la pieza simple

4.1.2 ANÁLISIS FEM DE LA PIEZA ORIGINAL

Se selecciona el material Aluminio 6061-T6 y se lleva a cabo la simulación del comportamiento estructural de la pieza sin haber aplicado aún la reducción de masa. En la Ilustración 34 se representa la primera simulación llevada a cabo.

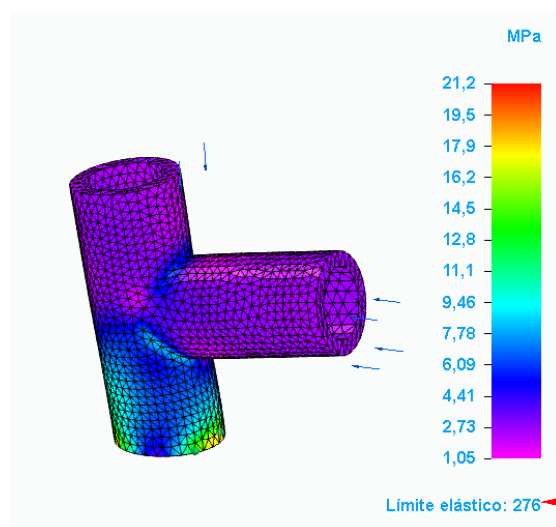


Ilustración 34. Simulación FEM de la pieza simple maciza

Según los resultados obtenidos, se confirma que la pieza no alcanza el punto de rotura, ya que la tensión máxima registrada es de 21,2 MPa, valor que está por debajo de la tensión máxima admisible del material, que es de 138 MPa (obtenido a partir del límite elástico del material, 276 MPa, utilizando un factor de seguridad de 2).

4.1.3 DISEÑO GENERATIVO. ITERACIONES.

Se establece un estudio generativo de la pieza considerando las fuerzas a las que se encuentra sometida durante su uso. En este caso específico, se aplican cargas de 800 N tanto en el extremo superior como en el extremo del cilindro secundario donde además se define una región preservada de 10 mm como se muestra en la Ilustración 35 y en la Ilustración 36:

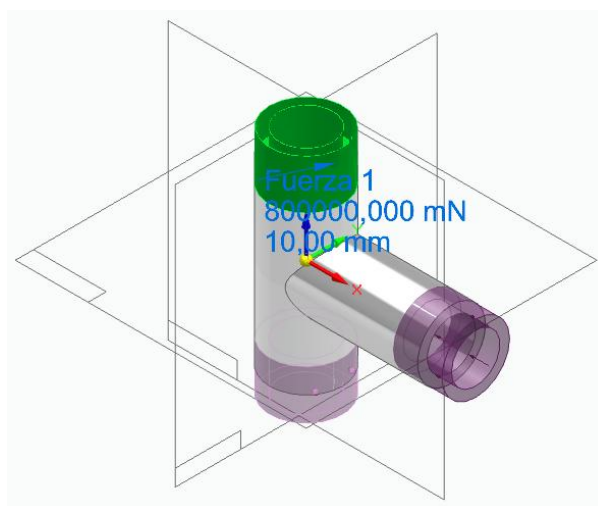


Ilustración 35. Fuerza 1 de la pieza simple

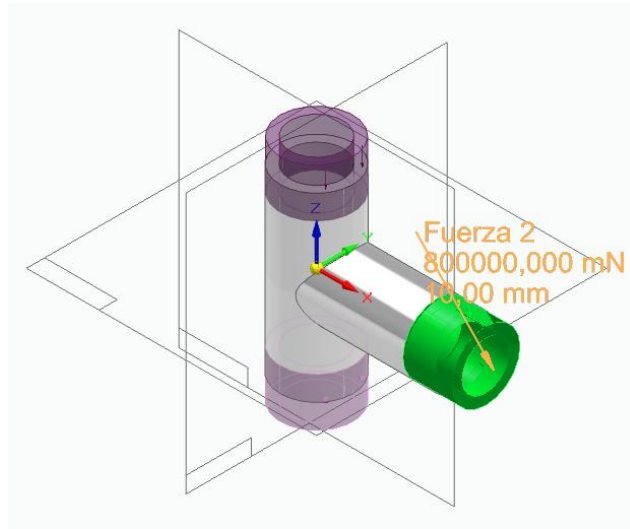


Ilustración 36. Fuerza 2 de la pieza simple

En cuanto a las restricciones aplicadas, se establece una restricción fija en el extremo inferior del cilindro principal, al cual también se le asigna un desplazamiento de 10 mm. Esta restricción se muestra en la Ilustración 37.

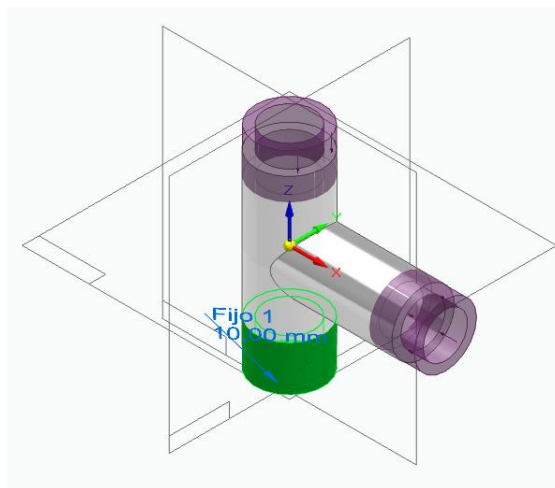


Ilustración 37. Restricción fija a la pieza simple

A partir de aquí se realizan diversas iteraciones con el fin de seleccionar el diseño óptimo. Las iteraciones realizadas son las siguientes:

4.1.3.1 Iteración 1

Para esta primera iteración se establece una reducción de masa del 30%.

El modelo, tras la optimización topológica, presenta la siguiente geometría:

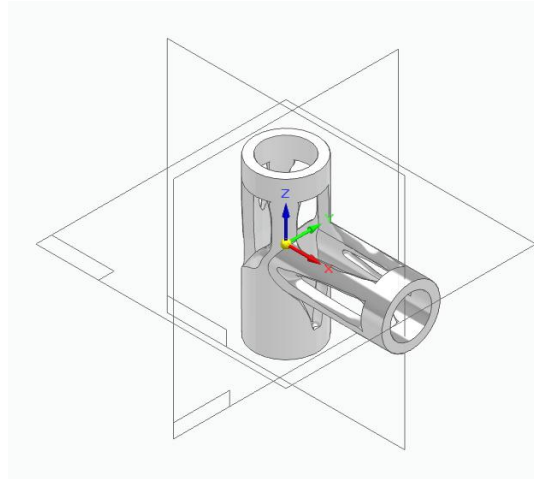


Ilustración 38. Pieza simple tras la reducción de masa del 30%

Se verifica mediante una simulación por FEM si la pieza alcanza su tensión máxima admisible:

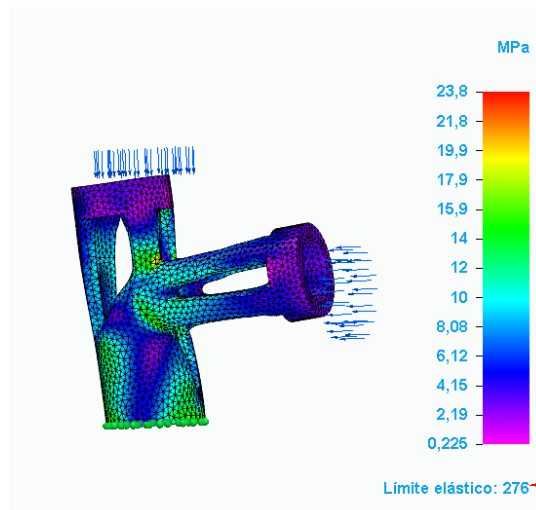


Ilustración 39. Simulación FEM de la reducción de masa del 30% de la pieza simple

En la figura anterior se observa que la tensión máxima que sufre la pieza (23,8 MPa) es menor que la tensión máxima admisible (138 MPa), por lo tanto, se puede aumentar el porcentaje de masa a eliminar.

4.1.3.2 Iteración 2

Para esta segunda iteración se establece una reducción de masa del 40%.

El modelo, tras la optimización topológica, presenta la siguiente geometría:

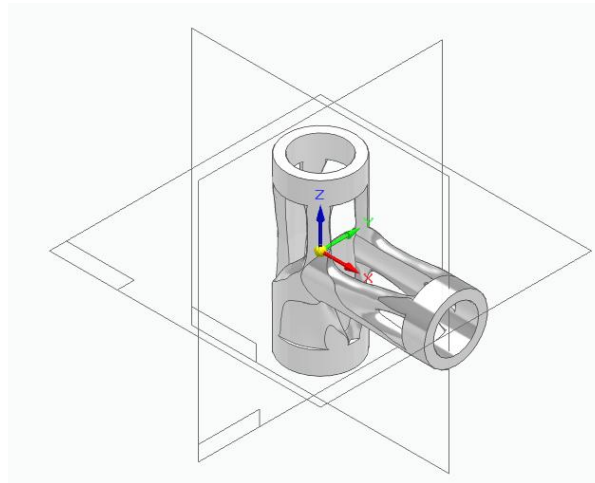


Ilustración 40. Pieza simple tras la reducción de masa del 40%

Se verifica mediante una simulación por FEM si la pieza alcanza su tensión máxima admisible:

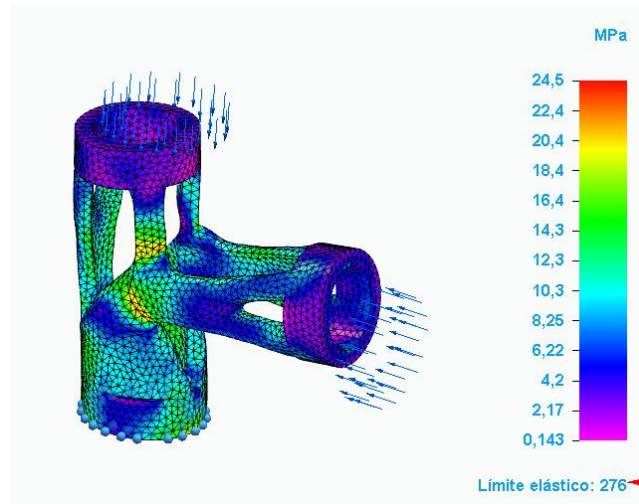


Ilustración 41. Simulación FEM de la reducción de masa del 40% de la pieza simple

Como se muestra en la Ilustración 41, la tensión máxima que sufre la pieza (24,5 MPa) sigue siendo menor que la tensión máxima admisible (138 MPa), por lo tanto, se puede aumentar el porcentaje de masa a eliminar.

4.1.3.3 Iteración 3

Para esta tercera iteración se establece una reducción de masa del 50%.

Al generar el diseño generativo con esta reducción de masa, nos aparece la siguiente advertencia:

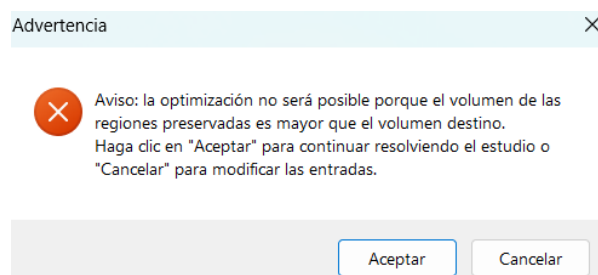


Ilustración 42. Advertencia tras la reducción del 50% de masa

Como la pieza no cumple con los desplazamientos que se han asignado previamente, se sigue iterando con una reducción de masa menor para evitar este problema.

4.1.3.4 Iteración 4

Para esta cuarta iteración se establece una reducción de masa del 45%.

El modelo, tras la optimización topológica, presenta la siguiente geometría:

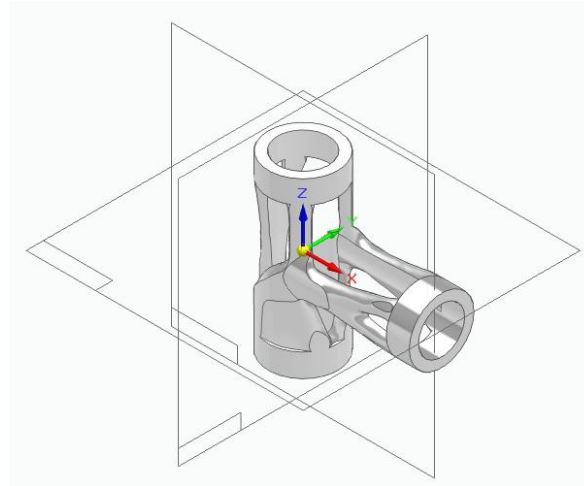


Ilustración 43. Pieza simple tras la reducción de masa del 45%

Se verifica mediante una simulación por FEM si la pieza alcanza su tensión máxima admisible:

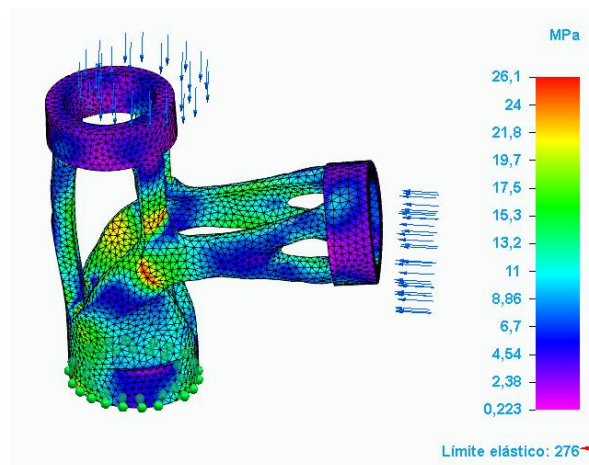


Ilustración 44. Simulación FEM de la reducción de masa del 45% de la pieza simple

Como se observa en la Ilustración 44, la tensión máxima que sufre la pieza (26,1 MPa) sigue siendo menor que la tensión máxima admisible (138 MPa), por lo tanto, se puede aumentar el porcentaje de masa a eliminar.

4.1.3.5 Iteración 5

Para esta quinta iteración se establece una reducción de masa del 47%.

El modelo, tras la optimización topológica, presenta la siguiente geometría:

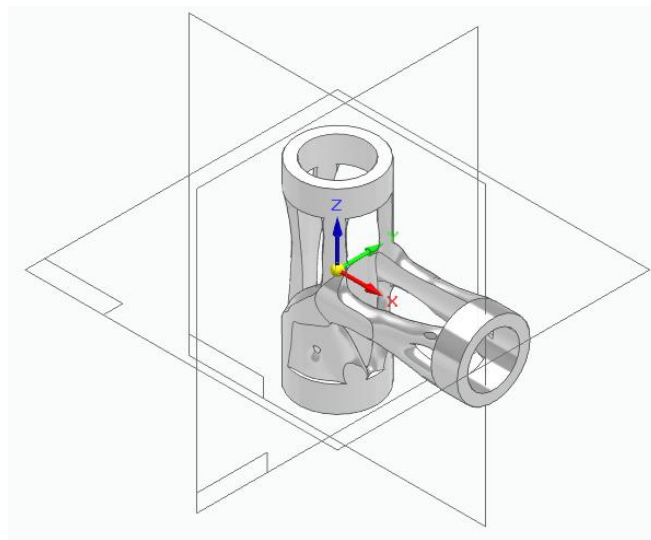


Ilustración 45. Pieza simple tras la reducción de masa del 47%

Se verifica mediante una simulación por FEM si la pieza alcanza su tensión máxima admisible.

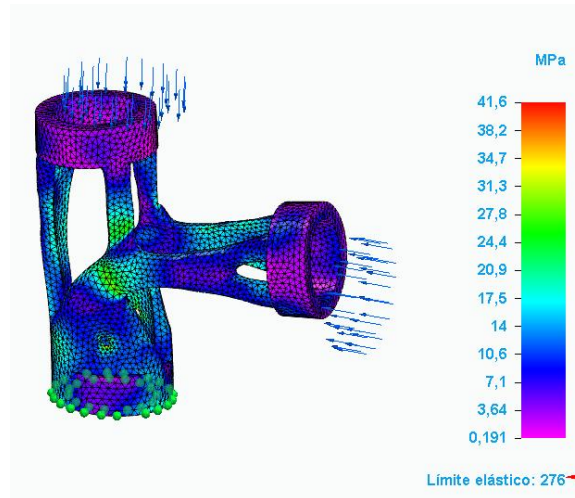


Ilustración 46. Simulación FEM de la reducción de masa del 47% de la pieza simple

Aunque la tensión máxima admisible (138 MPa) es considerablemente superior a la tensión máxima que alcanza la pieza (41,6 MPa), esta configuración representa la mayor reducción de masa posible que permite cumplir con todas las restricciones de desplazamiento establecidas.

4.1.4 REFINAMIENTO DE LA GEOMETRÍA

Finalmente, se lleva a cabo el refinamiento de la pieza con el objetivo de suavizar y refinar la geometría resultante. Se obtiene el resultado mostrado en la Ilustración 47.

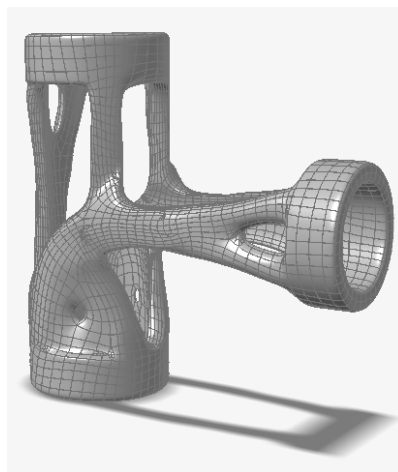


Ilustración 47. Pieza simple optimizada y refinada

4.2 METODOLOGÍA PARA LA OBTENCIÓN DE LA PIEZA COMPUESTA SIN REFUERZO

4.2.1 DISEÑO DE LA GEOMETRÍA DE LA PIEZA COMPUESTA

En esta segunda variante de la pieza, la geometría presenta una modificación significativa: se ha incluido una horquilla en el racor para la sujeción de la rueda trasera de la bicicleta. El eje de la rueda trasera se apoya en dos tubos, que van unidos a estos nuevos elementos del racor.

El proceso de modelado de la segunda pieza se ha estructurado en varias operaciones:

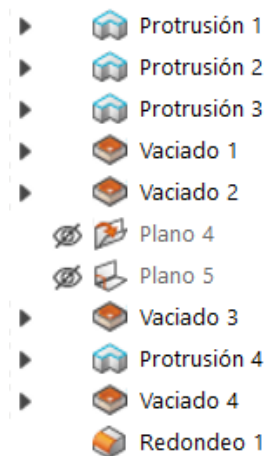


Ilustración 48. Operaciones de la geometría de la pieza compuesta

A continuación, se describen con detalle las operaciones mencionadas anteriormente:

En primer lugar, y como en el caso anterior, se efectúa una extrusión inicial para conformar el cilindro principal, definiendo así la geometría base vertical de la pieza. Esta primera operación se muestra en la Ilustración 49.

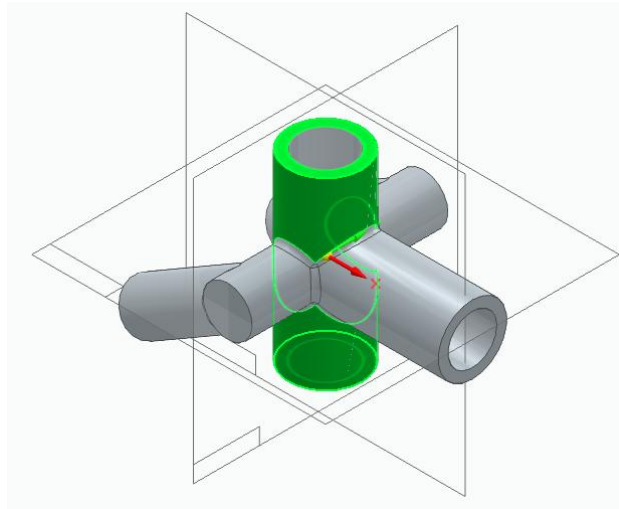


Ilustración 49. Extrusión 1 de la pieza compuesta

Después, se realiza una extrusión en la mitad del cilindro principal para generar una base desde la cual nacen los dos cilindros inclinados. Esta operación permite unirlos de forma sólida y alineada al cuerpo principal. Esta operación se representa en la Ilustración 50.

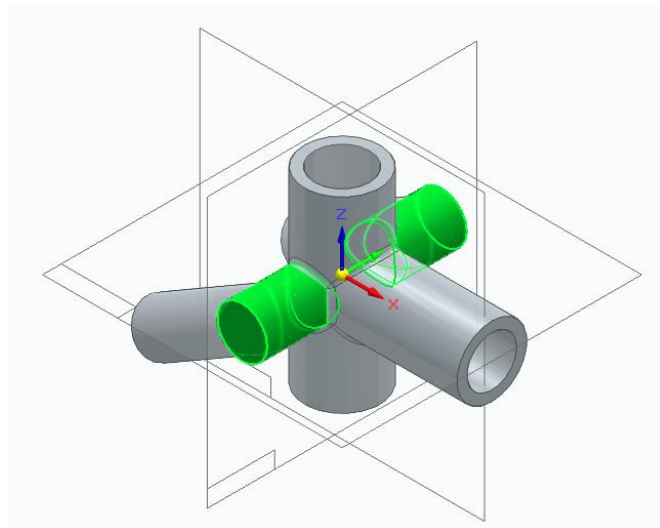


Ilustración 50. Extrusión 2 de la pieza compuesta

Posteriormente, se añade un tercer cilindro perpendicular a los anteriores mediante otra operación de extrusión como se muestra en la Ilustración 51, lo cual permite obtener otra estructura adjunta al cilindro principal, la cual sujetará la barra horizontal del cuadro de la bicicleta.

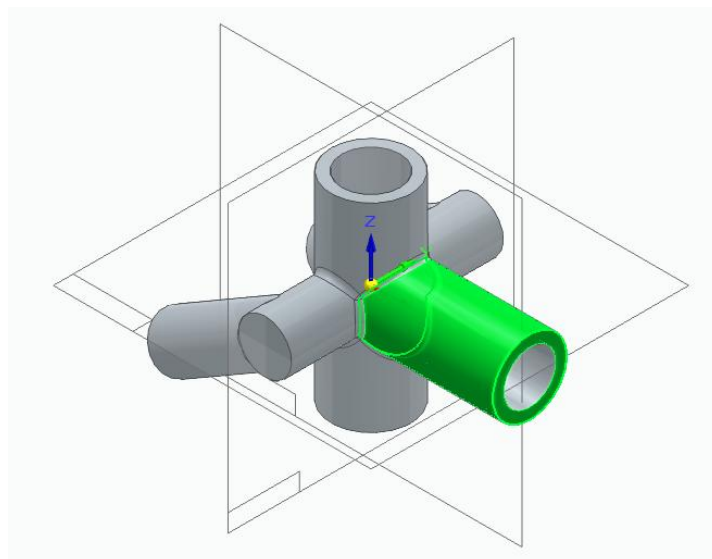


Ilustración 51. Extrusión 3 de la pieza compuesta

Se realiza un primer vaciado en el cilindro vertical principal mediante una operación de extrusión con corte. El diámetro del agujero es de 10 mm al igual que en la pieza anterior. Esta operación se representa en la Ilustración 52.

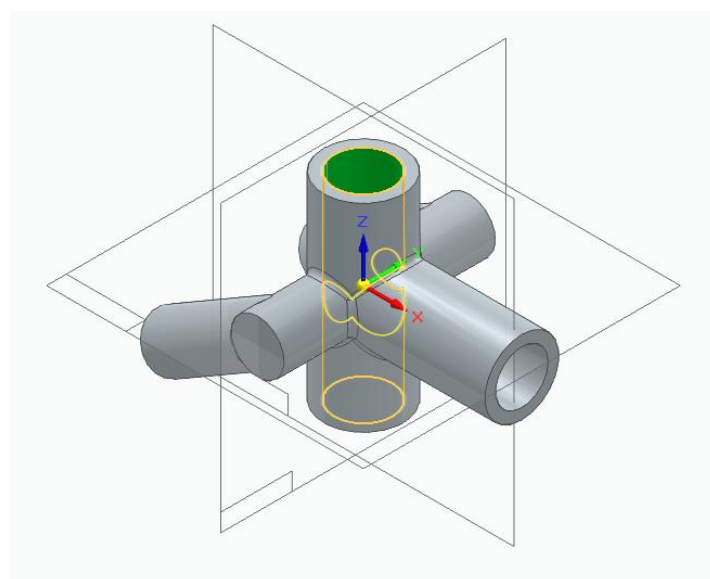


Ilustración 52. Vaciado 1 de la pieza compuesta

A continuación, se realiza un segundo vaciado en el cilindro horizontal secundario, replicando el mismo diámetro utilizado en la pieza anterior (8mm).

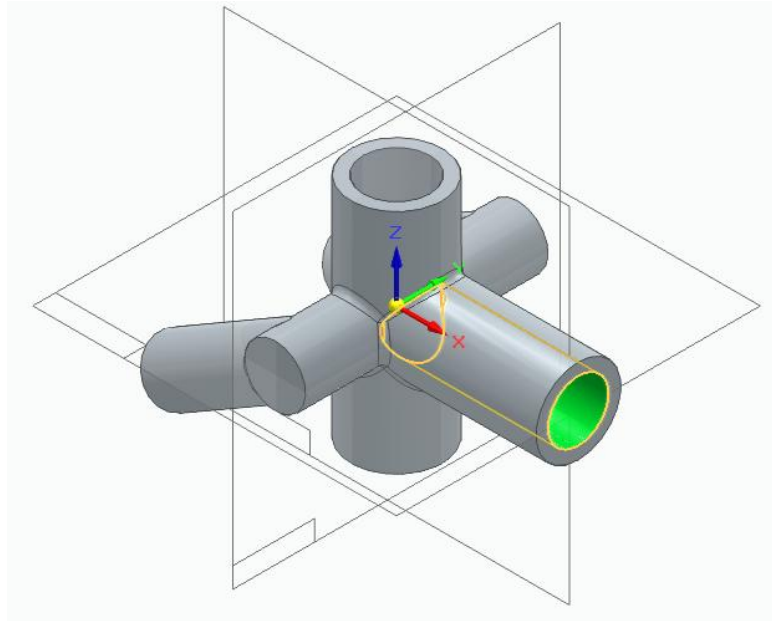


Ilustración 53. Vaciado 2 de la pieza compuesta

Seguidamente, se generan dos cilindros adicionales mediante extrusiones sobre planos inclinados a 30 grados respecto al plano XY, simétricos respecto al plano XZ. Esta operación se visualiza en la Ilustración 54.

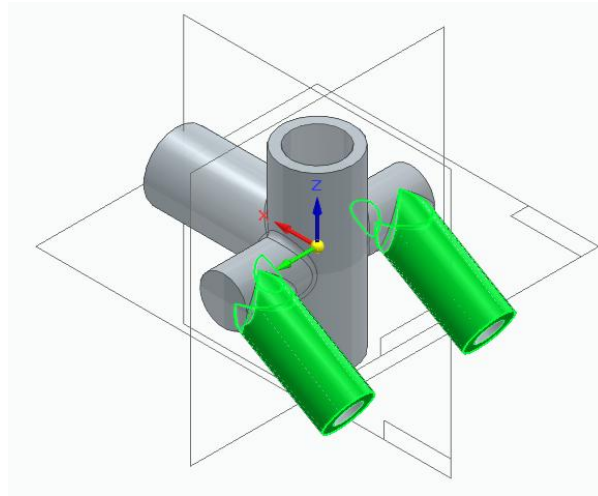


Ilustración 54. Extrusión 4 de la pieza compuesta

También, se realizan tres vaciados en los cilindros restantes mediante operaciones de corte por extrusión, aplicando un diámetro de 6 mm cada uno. Los dos primeros vaciados se muestran en la Ilustración 55 donde se realiza un vaciado a cada uno de los tubos inclinados. El tercer y último vaciado de esta pieza se observa en la Ilustración 56.

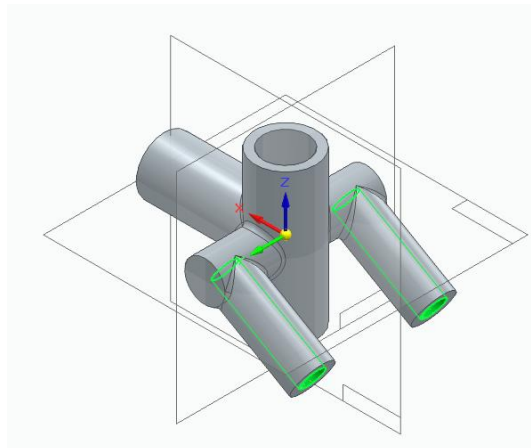


Ilustración 55. Vaciado 3 de la pieza compuesta

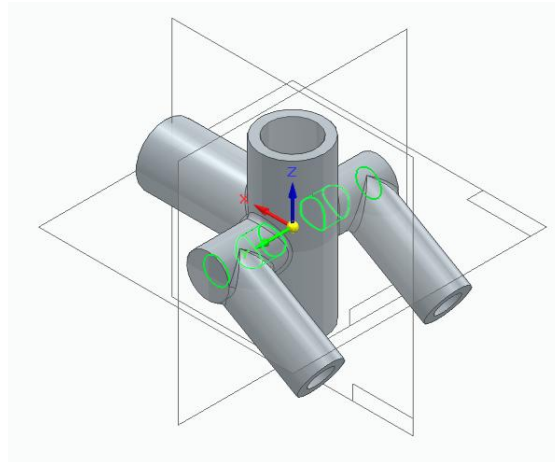


Ilustración 56. Vaciado 4 de la pieza compuesta

Finalmente, se redondean con diámetro de 2 mm todas las intersecciones de los cilindros en la pieza.

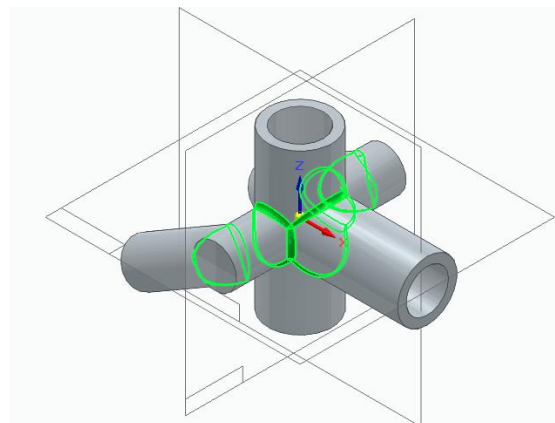


Ilustración 57. Redondeo de la pieza compuesta

4.2.2 ANÁLISIS FEM DE LA PIEZA ORIGINAL

Para la segunda pieza, se procede a realizar un análisis por el FEM antes de aplicar la optimización topológica.

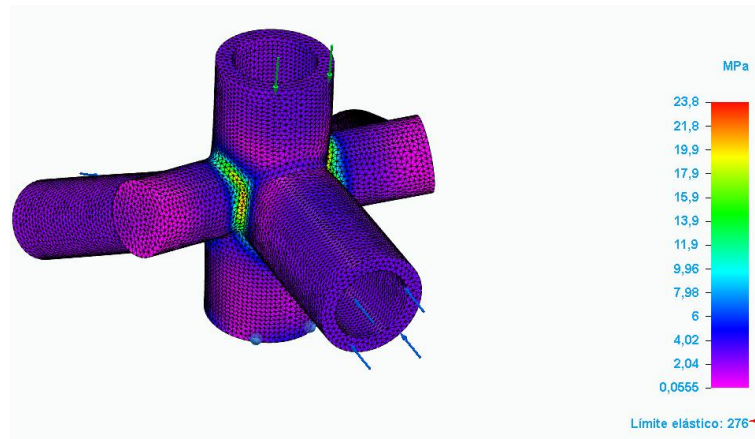


Ilustración 58. Simulación FEM de la pieza compuesta maciza

Los resultados confirman que la pieza no alcanza el punto de rotura, ya que la tensión máxima registrada es de 23,8 MPa, quedando por debajo de la tensión máxima admisible, que es de 138 MPa.

4.2.3 DISEÑO GENERATIVO. ITERACIONES.

En el caso de esta segunda pieza, también se recurre al diseño generativo como punto de partida para su optimización topológica

Durante el uso previsto, la pieza está sometida a una carga de 800 N tanto en el extremo superior, mostrado en la Ilustración 59, como en el extremo del cilindro secundario como se observa en la Ilustración 60. Además, en los extremos de los dos tubos adicionales se aplican cargas de 400N en cada uno. La Ilustración 61 muestra los puntos donde se aplica esta carga mencionada previamente. Para garantizar su funcionalidad, se establece una región preservada de 10 mm en cada uno de los extremos, reproduciendo así las condiciones reales de uso y ensamblaje.

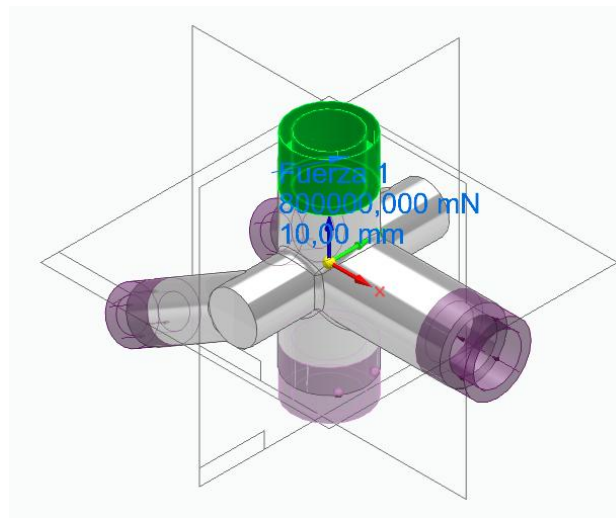


Ilustración 59. Fuerza 1 de la pieza compuesta

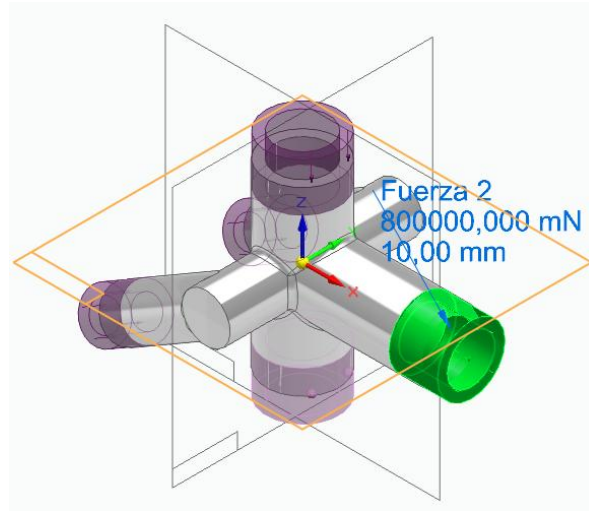


Ilustración 60. Fuerza 2 de la pieza compuesta

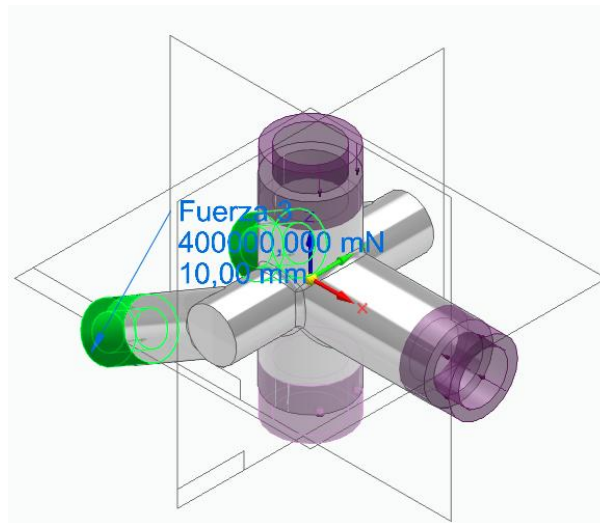


Ilustración 61. Fuerza 3 de la pieza compuesta

Como restricción en esta pieza se aplica la misma que en la pieza interior, un apoyo fijo en el extremo de la pieza inferior.

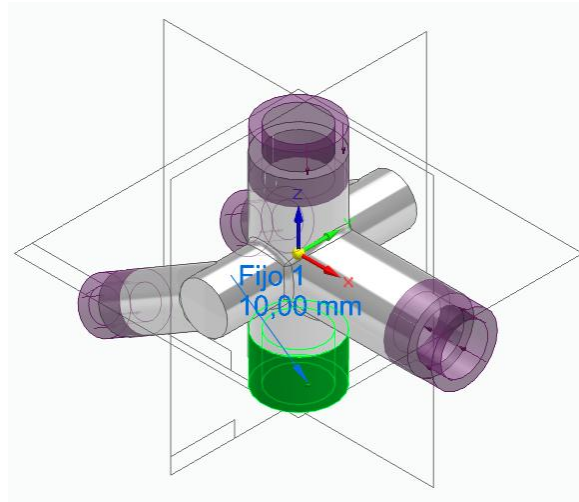


Ilustración 62. Restricción fija a la pieza compuesta

Con estos parámetros definidos, se lanza el estudio de diseño generativo. A continuación, se detallan las distintas iteraciones llevadas a cabo hasta alcanzar el diseño más eficiente posible.

4.2.3.1.1 Iteración 1

En esta primera iteración se busca una reducción de masa del 50%.

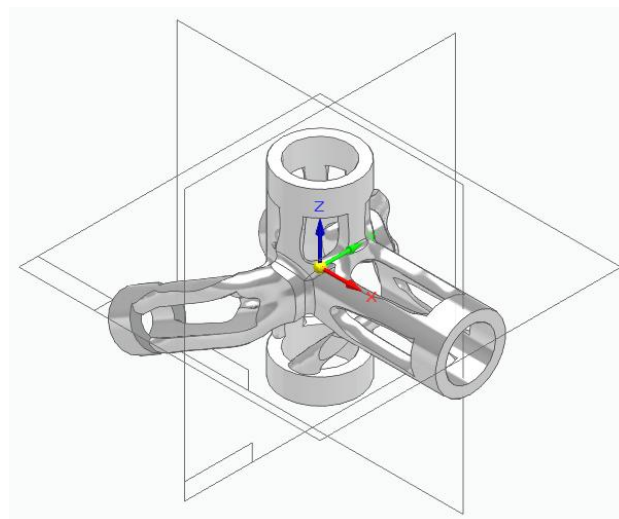


Ilustración 63. Pieza compuesta tras la reducción de masa del 50%

En la Ilustración 63 se muestra cómo queda la pieza compuesta tras retirar el 50% de masa.

Se realiza un análisis mediante el método de elementos finitos (FEM) para evaluar el comportamiento estructural bajo las condiciones definidas.

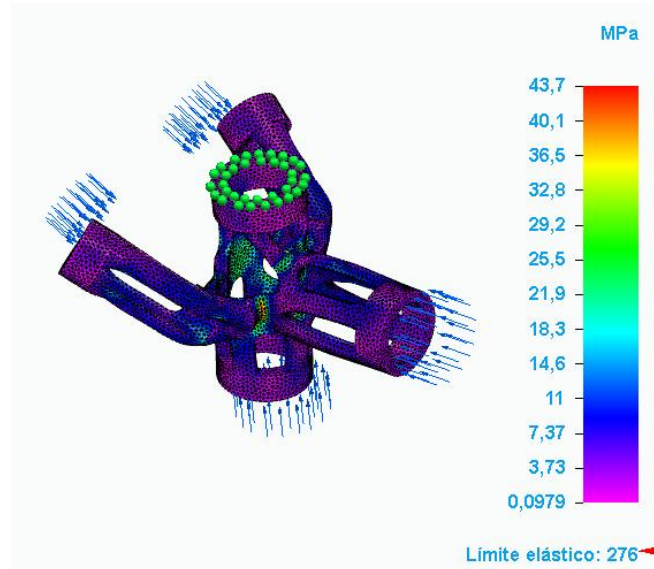


Ilustración 64. Simulación FEM de la reducción de masa del 50% de la pieza compuesta

La Ilustración 64 muestra que la tensión máxima (43,7 MPa) se mantiene por debajo de la tensión máxima admisible (138 MPa), por lo que es viable seguir reduciendo material en iteraciones posteriores.

Además, se observa una deformación significativa en los dos cilindros inclinados mostrando una apertura al sufrir la carga.

4.2.3.2 Iteración 2

Se incrementa el objetivo de reducción de masa al 55%.

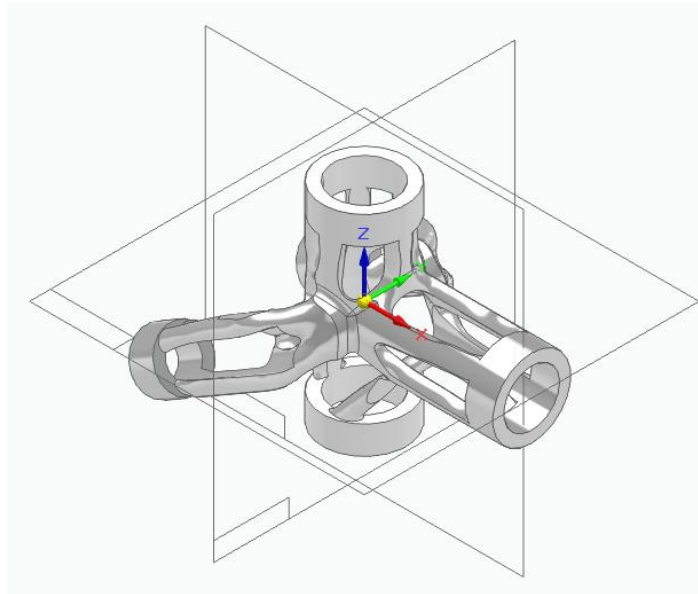


Ilustración 65. Pieza compuesta tras la reducción de masa del 55%

En la Ilustración 65 se ilustra la pieza final tras reducir el 55% de la masa de la pieza original.

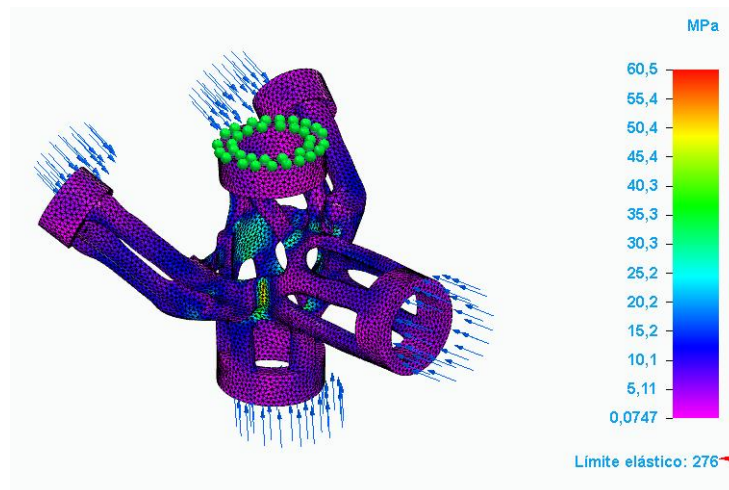


Ilustración 66. Simulación FEM de la reducción de masa del 55% de la pieza compuesta

El análisis FEM mostrado en la Ilustración 66 indica un leve aumento de las tensiones, aunque todavía dentro del rango seguro. Se mantiene la rigidez estructural sin que se produzcan concentraciones críticas de esfuerzo, por lo que se decide avanzar a la siguiente iteración con una reducción aún mayor.

4.2.3.3 Iteración 3

En esta iteración se alcanza una reducción del 57%.

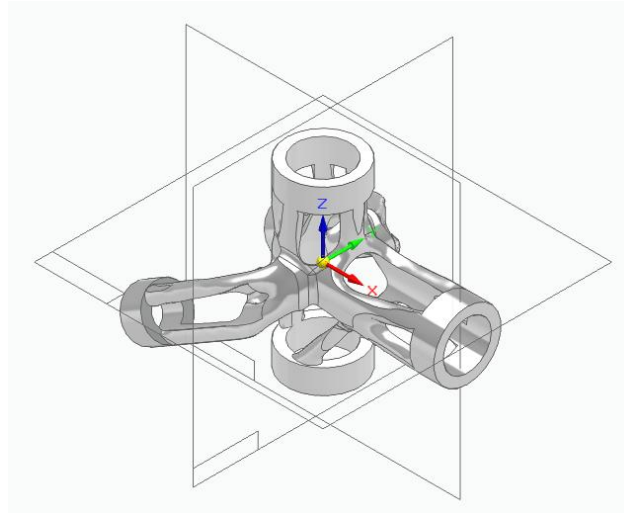


Ilustración 67. Pieza compuesta tras la reducción de masa del 57%

El modelo resultante comienza a mostrar una estructura más comprometida, con elementos más delgados y mayor exposición a la flexión.



Ilustración 68. Simulación FEM de la reducción de masa del 57% de la pieza compuesta

Como puede verse en la Ilustración 68, el análisis FEM muestra que la tensión máxima es mayor (68,7 MPa), aunque aún se puede reducir la masa de la pieza de estudio.

4.2.3.4 Iteración 4

Durante esta iteración se prueba con una reducción del 60% pero aparece la siguiente advertencia:

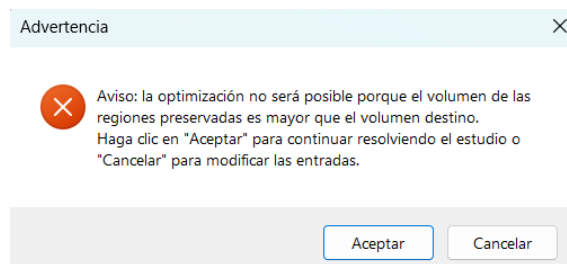


Ilustración 69. Advertencia tras la reducción del 60% de masa

Al no cumplirse con la condición de mantener el volumen de las regiones preservadas hay que disminuir la restricción de reducción de masa, es decir, hay que aumentar la masa de la pieza.

4.2.3.5 Iteración 5

En esta última iteración se opta por reducir ligeramente el porcentaje de masa eliminada, situándolo en el 59%, con el objetivo de recuperar una mayor seguridad estructural sin renunciar a la condición de desplazamiento de 10 mm. En la Ilustración 70 se representa la pieza con las condiciones anteriores.

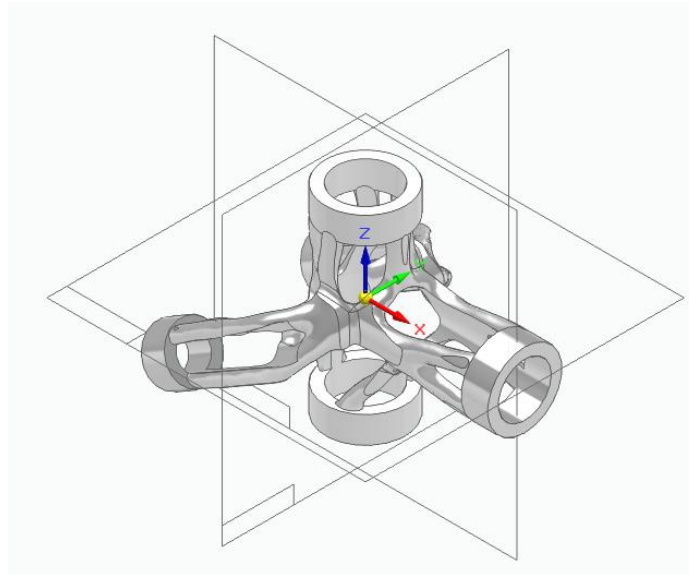


Ilustración 70. Pieza compuesta tras la reducción de masa del 59%

El modelo resultante ofrece un equilibrio entre masa reducida y resistencia.

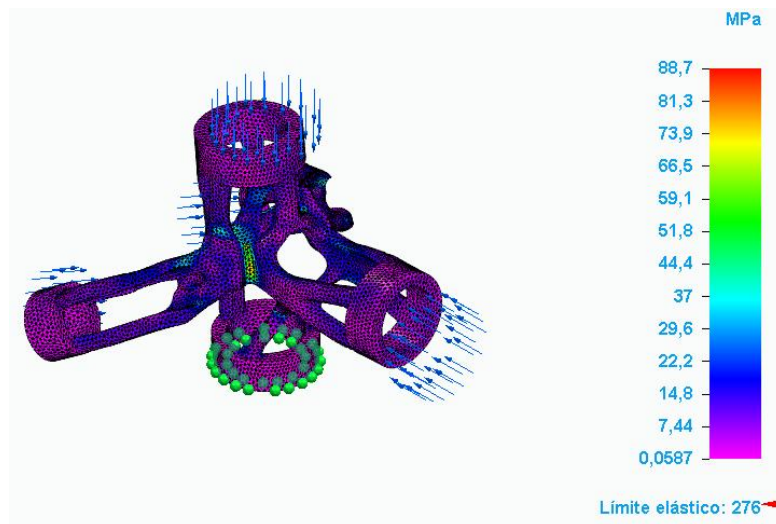


Ilustración 71. Simulación FEM de la reducción de masa del 59% de la pieza compuesta

La simulación FEM que se muestra en Ilustración 71 confirma que las tensiones están dentro de un margen aceptable y que se cumplen todas las restricciones de desplazamiento y esfuerzo impuestas.

4.2.4 REFINAMIENTO DE LA GEOMETRÍA

Al igual que en la primera pieza, se realiza el proceso de refinamiento sobre el resultado de la última iteración y se obtiene versión final de la segunda pieza en la Ilustración 72:



Ilustración 72. Pieza compuesta optimizada y refinada

4.3 METODOLOGÍA PARA LA OBTENCIÓN DE LA PIEZA DOBLE CON REFUERZO

4.3.1 DISEÑO DE LA GEOMETRÍA DE LA PIEZA

A continuación, se desarrolla una tercera versión de la pieza, basada en una ampliación del segundo modelo. En esta nueva iteración, se incorpora un refuerzo adicional entre los dos tubos que conectan el tubo del sillín con la rueda trasera, tal como se muestra en la Ilustración 73. El objetivo de este refuerzo es tratar de evitar la apertura de los tubos inclinados que se observaba en la versión anterior de la pieza.

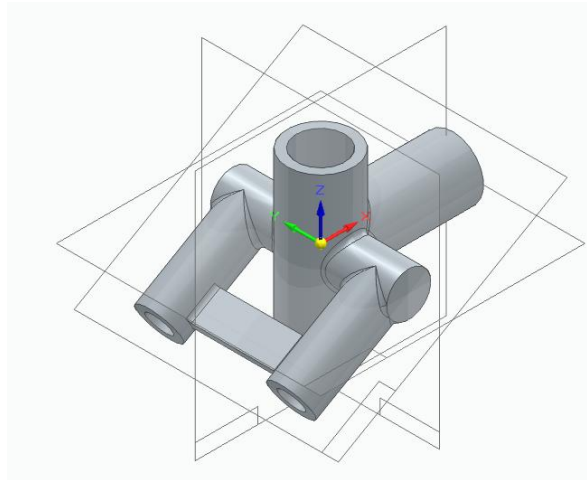


Ilustración 73. Pieza compuesta con refuerzo

Las operaciones que se llevan a cabo para el desarrollo de esta pieza son las llevadas en la versión dos de la pieza con el refuerzo adicional como se muestran a continuación:

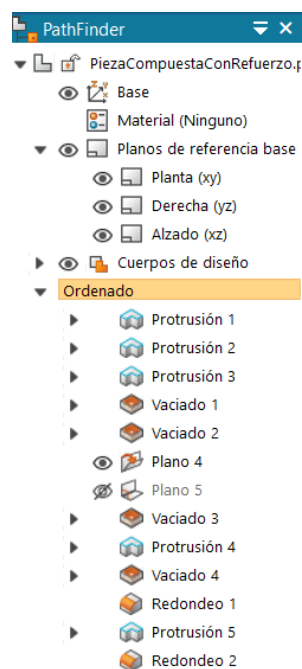


Ilustración 74. Operaciones de la geometría de la pieza compuesta con refuerzo

4.3.2 ANÁLISIS FEM DE LA PIEZA ORIGINAL

En esta tercera versión de la pieza, también se ha realizado una simulación estructural bajo condiciones normales de uso antes de aplicar la optimización topológica para asegurar que la pieza cumple con los requisitos de resistencia.

Para ello, se ha utilizado nuevamente un análisis mediante el método de elementos finitos (FEM) como se muestra en la Ilustración 75 .

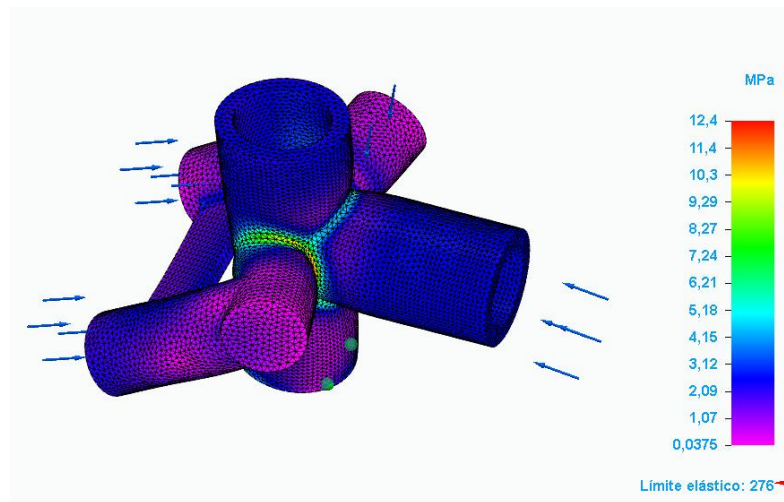


Ilustración 75. Simulación FEM de la pieza compuesta con refuerzo

Los resultados que se han obtenido son que la tensión máxima alcanzada ha sido de 12,4 MPa, muy por debajo de la tensión máxima (138 MPa), lo que indica que la pieza resiste correctamente sin riesgo de fallo.

4.3.3 DISEÑO GENERATIVO. ITERACIONES

Al igual que en la versión anterior, la pieza se somete a una carga de 800 N tanto en el extremo superior, representada en la Ilustración 76, como en el extremo del cilindro secundario, mostrada en la Ilustración 77. Además, se mantienen las cargas de 400 N aplicadas en los extremos de los dos tubos que se conectan a la rueda trasera como se observa en la Ilustración 78. Para respetar las condiciones reales de uso y montaje, se definen regiones preservadas de 10 mm en todos los puntos de fijación como se aprecia en la Ilustración 79.

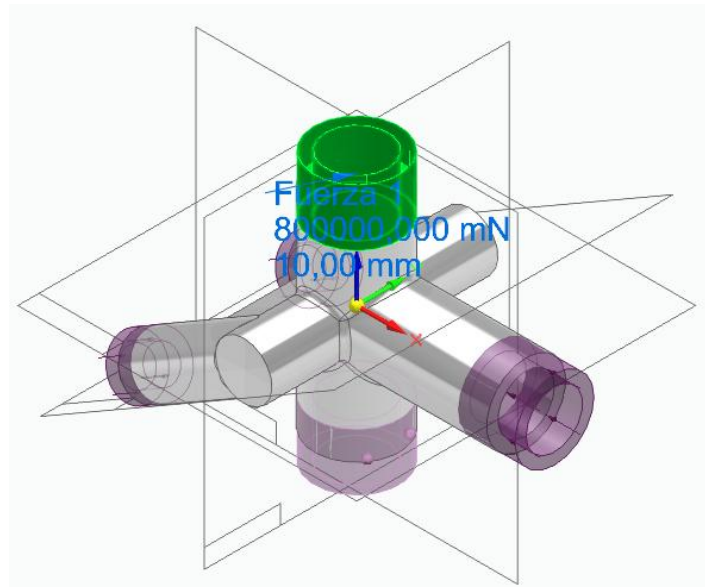


Ilustración 76. Fuerza 1 de la pieza compuesta con refuerzo

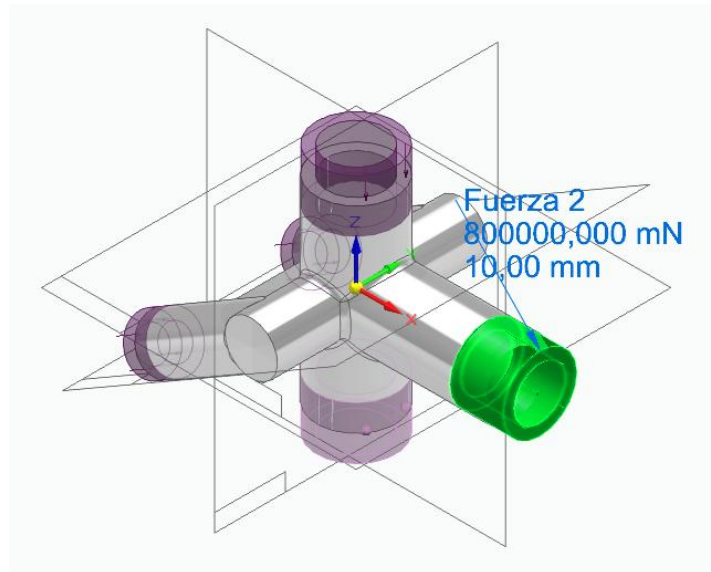


Ilustración 77. Fuerza 2 de la pieza compuesta con refuerzo

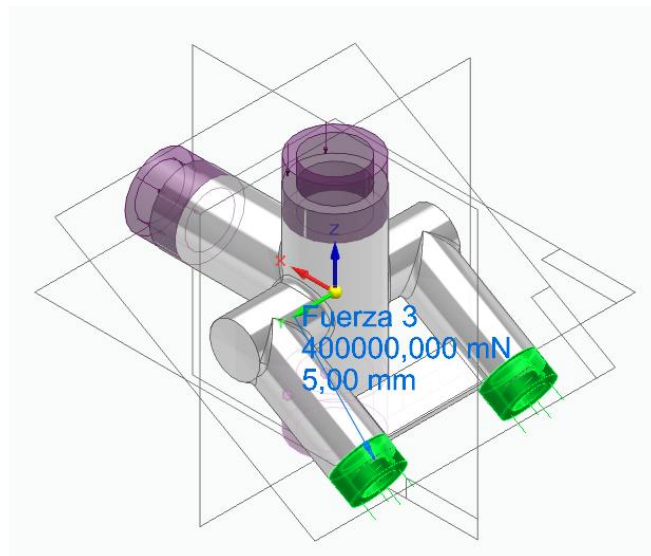


Ilustración 78. Fuerza 3 de la pieza compuesta con refuerzo

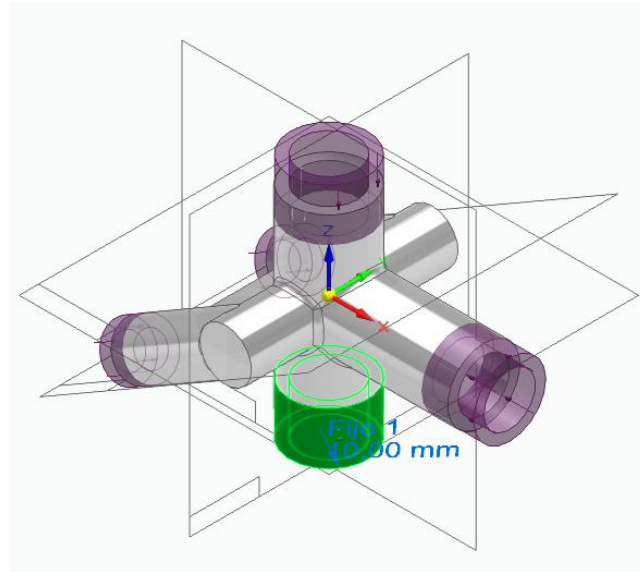


Ilustración 79. Restricción fija a la pieza compuesta con refuerzo

Con esta configuración, se analiza el impacto del nuevo refuerzo sobre el comportamiento mecánico de la pieza, prestando especial atención a la distribución de tensiones y a las posibles mejoras en términos de resistencia y estabilidad.

A continuación, se presentan las iteraciones realizadas en este nuevo modelo reforzado, con el fin de identificar la configuración más eficiente desde el punto de vista estructural y funcional.

4.3.3.1 Iteración 1

En esta primera iteración, se plantea una reducción de masa del 50 % como punto de partida para evaluar el comportamiento estructural del modelo y se realiza la generación del proceso.

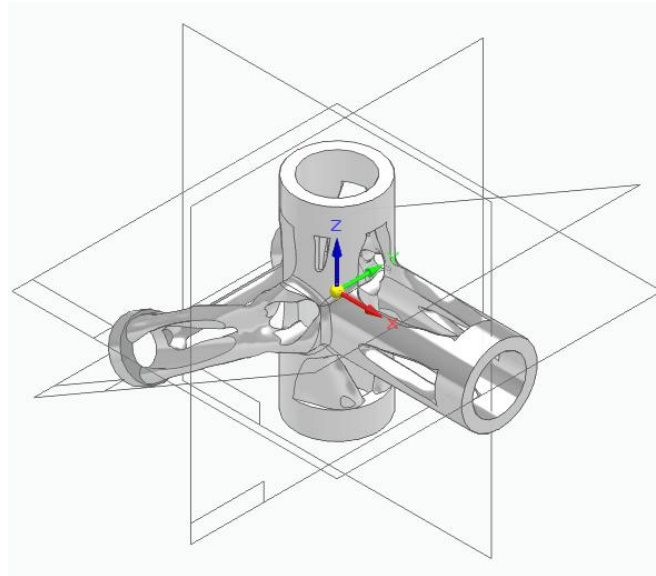


Ilustración 80. Pieza compuesta con refuerzo tras la reducción de masa del 50%

Posteriormente, se simula por FEM la pieza optimizada para ver su comportamiento estructural.

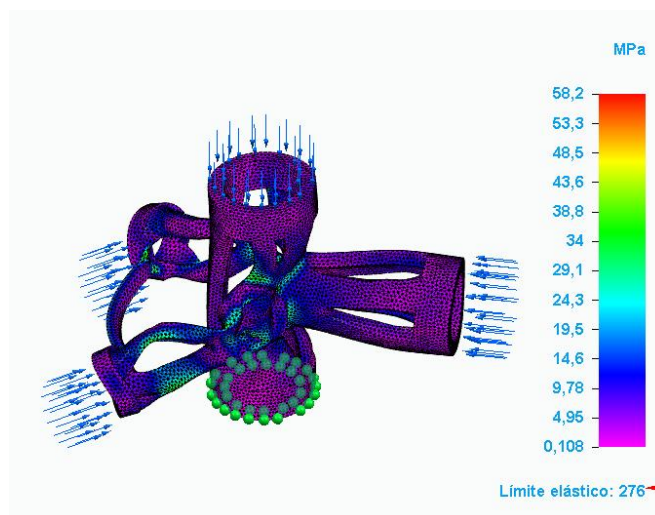


Ilustración 81. Simulación FEM de la reducción de masa del 50% de la pieza compuesta con refuerzo

Una vez realizada la simulación FEM sobre la pieza optimizada, se obtiene una tensión máxima de 58,2 MPa, un valor considerablemente inferior a la tensión máxima admisible, que se sitúa en 138 MPa como puede observarse en la Ilustración 81. Esto confirma que la pieza cumple con los requisitos de resistencia estructural sin comprometer su integridad.

Dado que existe un amplio margen de seguridad, se decide llevar a cabo una nueva iteración con una reducción de masa mayor, con el objetivo de seguir optimizando el diseño sin superar los límites admisibles de tensión.

4.3.3.2 Iteración 2

En la segunda iteración, se aumenta el porcentaje de reducción de masa hasta el 70% pero el software no puede generar una solución viable porque no hay suficiente material libre para cumplir con las condiciones del diseño dentro del volumen objetivo como puede verse en la Ilustración 82.

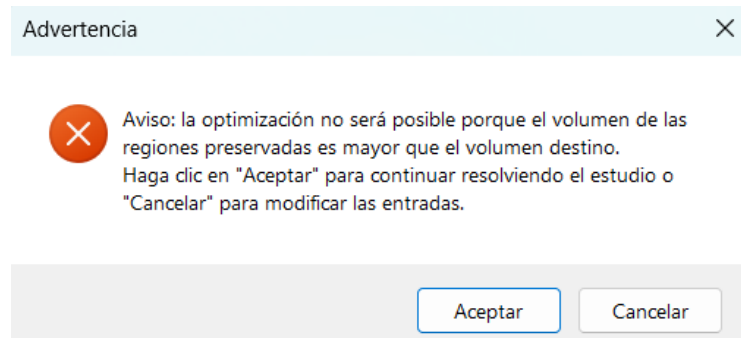


Ilustración 82. Advertencia tras la reducción del 70% de masa

Ante esta situación, se opta por reducir el porcentaje de masa a eliminar y se procede con la siguiente iteración del diseño.

4.3.3.3 Iteración 3

Tras ajustar los parámetros de entrada para solventar el problema de volumen detectado en la iteración anterior, se lleva a cabo una tercera iteración con una reducción de masa del 65 %.

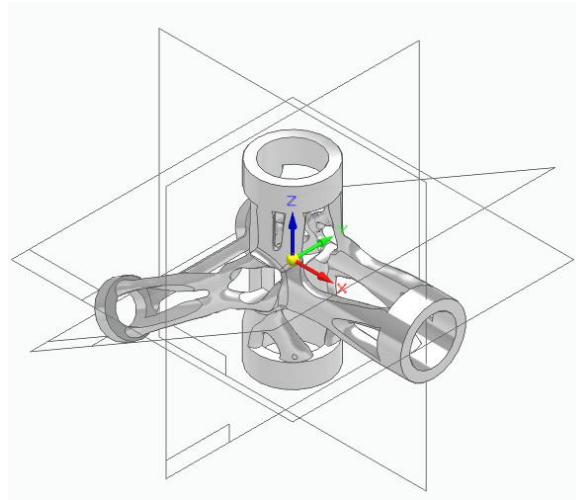


Ilustración 83. Pieza compuesta con refuerzo tras la reducción de masa del 65%

En este nuevo escenario, el diseño generativo se completa correctamente y se procede a realizar la correspondiente simulación FEM para evaluar el comportamiento estructural de la pieza optimizada.

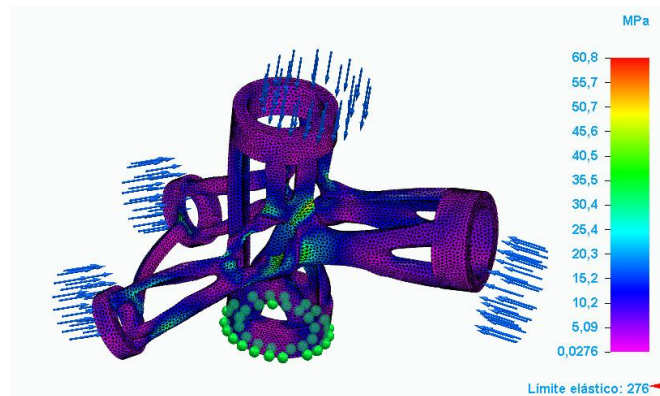


Ilustración 84. Simulación FEM de la reducción de masa del 55% de la pieza compuesta con refuerzo

Los resultados que se muestran en la Ilustración 84 muestran que la pieza sufre una tensión máxima de 60,8 MPa, valor que sigue estando muy por debajo de la tensión máxima admisible (138 MPa). Por tanto, la pieza continúa cumpliendo con los criterios de seguridad establecidos, permitiendo una reducción significativa de masa sin comprometer la integridad estructural.

Visto el buen comportamiento del modelo con esta configuración, se decide continuar con nuevas iteraciones para buscar un diseño aún más eficiente.

4.3.3.4 Iteración 4

En la cuarta iteración, se intenta llevar a cabo una reducción de masa del 67 %. Sin embargo, al iniciar el estudio de diseño generativo, aparece nuevamente la advertencia indicando que el volumen de las regiones preservadas es mayor que el volumen destino como se muestra en la Ilustración 85, por lo que hay que disminuir la reducción de masa de la pieza.

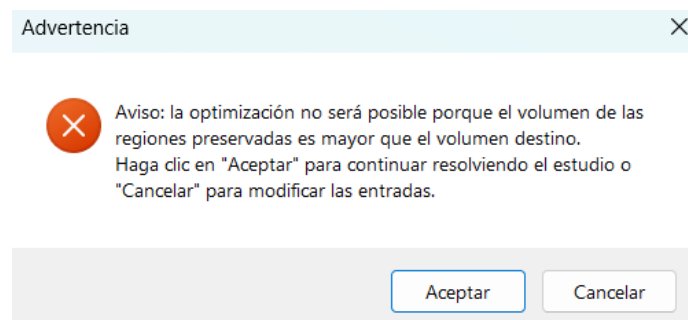


Ilustración 85. Advertencia tras la reducción del 67% de masa

4.3.3.5 Iteración 5

En la quinta iteración, se opta por una reducción de masa del 66%.

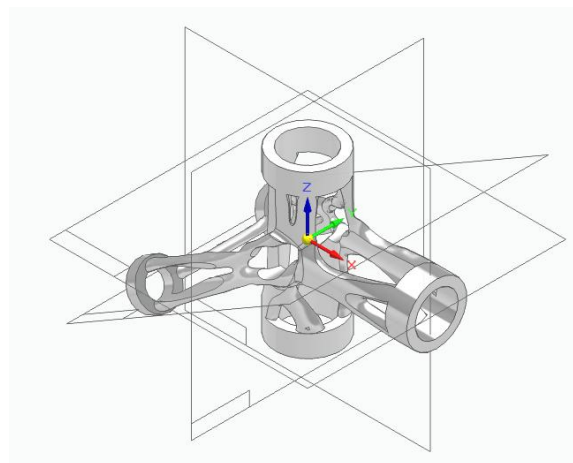


Ilustración 86. Pieza compuesta con refuerzo tras la reducción de masa del 66%

En la Ilustración 86 se observa la reducción de masa de la pieza tras la optimización topológica.

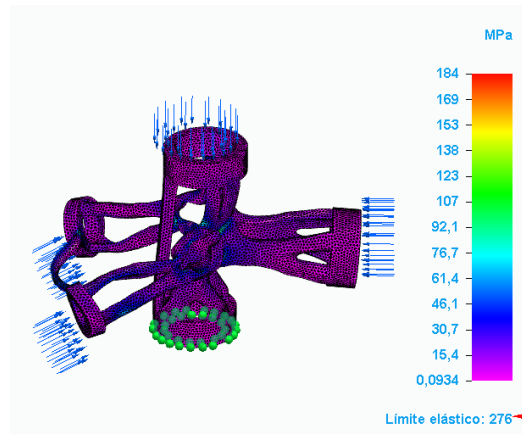


Ilustración 87. Simulación FEM de la reducción de masa del 66% de la pieza compuesta con refuerzo

Tras realizar la simulación FEM, en la Ilustración 87 se observa que la tensión máxima alcanzada en la pieza es de 184 MPa, lo que supone una superación del límite admisible previamente establecido (138 MPa). Este resultado indica que la resistencia estructural de la pieza se ve comprometida, superando el umbral de seguridad del material. Por tanto, esta configuración se descarta y se considera necesario reducir ligeramente el porcentaje de optimización.

Como se analizó en la iteración 4, la pieza con una reducción del 65 % resultó completamente válida, ya que cumplía con todos los requisitos establecidos: mantenía las regiones preservadas, no superaba el límite admisible de tensión ($60,8 \text{ MPa} < 138 \text{ MPa}$) y garantizaba la integridad mecánica del diseño. Por tanto, se adopta como versión final la pieza optimizada con una reducción de masa del 65 %, al considerarse la opción más eficiente y segura dentro del margen permitida.

4.3.4 REFINAMIENTO DE LA GEOMETRÍA

Por último, y siguiendo el mismo procedimiento que en las versiones anteriores, se procede al refinamiento de la geometría final mediante la herramienta PolyNURBS. El resultado

mostrado en la Ilustración 88 es un modelo final para la impresión 3D que se realizará a continuación.



Ilustración 88. Pieza compuesta con refuerzo optimizada y refinada

4.4 IMPRESIÓN 3D

Una vez finalizado el proceso de optimización y refinamiento de las geometrías, se procedió a la impresión de las distintas versiones de la pieza: la versión simple, la versión compuesta sin refuerzo y la versión compuesta con refuerzo tanto en su versión maciza como en su versión optimizada.

Para las versiones macizas se utilizó la impresión mediante FDM, mientras que para las piezas refinadas se realizó mediante el proceso SLA con resina rígida ya que se obtiene un mejor acabado superficial. Finalmente, para poder comparar estas técnicas con la impresión MJF, se imprimió la pieza refinada simple utilizando este último método, que no requiere de postratamientos y ofrece muy buenos resultados mecánicos. A continuación, se explica cada uno de los diferentes procesos llevados a cabo.

- Impresión mediante FDM (Fused Deposition Modeling)

Esta tecnología se basa en la extrusión de un filamento termoplástico, que se funde y se deposita capa a capa sobre una base, siguiendo una geometría definida por el modelo 3D. [49]

Las principales ventajas de este método de impresión son, entre muchas otras, la velocidad de producción, la disponibilidad de materiales y su precio. No obstante, también presenta ciertas limitaciones como una calidad superficial moderada especialmente en piezas con geometrías complejas [50] y el proceso de postprocesado que se necesita realizar tras finalizar la impresión. En este proceso las piezas impresas requieren la retirada manual de los soportes con unas pinzas como se observa en la Ilustración 89, así como un proceso de lijado en las zonas con imperfecciones para mejorar el acabado superficial (Ilustración 90).

Como se ha mencionado anteriormente, las tres versiones macizas de la pieza se fabricaron mediante este proceso de impresión 3D como se muestra en la Ilustración 91.

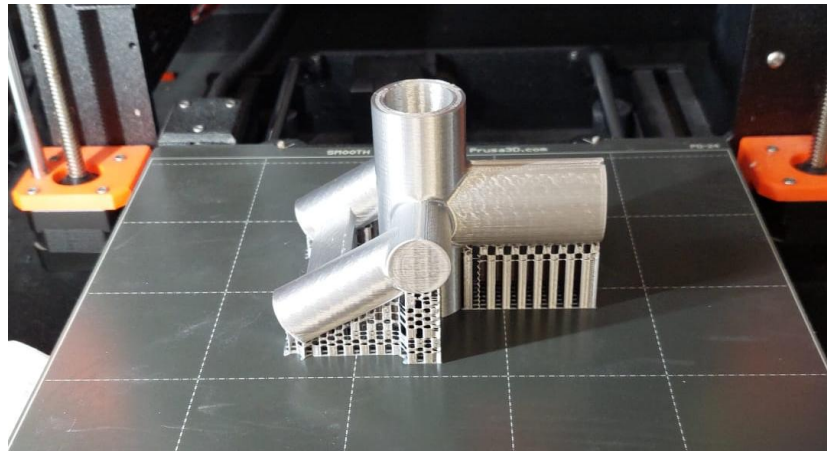


Ilustración 89. Pieza impresa sin postprocesado



Ilustración 90. Pieza tras haberle retirado los soportes con unas pinzas



Ilustración 91. Piezas macizas impresas mediante FDM

- Impresión mediante SLA (estereolitografía)

Como la impresión mediante FDM no ofrece la calidad superficial necesaria, se optó por imprimir las piezas refinadas por el método de impresión 3D SLA. Esta tecnología permite obtener un mayor nivel de detalle y una calidad superficial superior. Este proceso se basa en la solidificación de una resina fotosensible mediante un láser ultravioleta, que va trazando capa a capa la geometría de la pieza con gran precisión. [51]

La impresión SLA ofrece resultados superficiales excelentes. En cambio, necesita un postprocesado más complejo. Tras la impresión (Ilustración 92), las piezas se lavaron con alcohol para eliminar restos de resina, se retiraron manualmente los soportes (Ilustración 93) y posteriormente se sometieron a un curado térmico a unos 70 °C durante 1 hora para asegurar sus propiedades mecánicas definitivas (Ilustración 94).

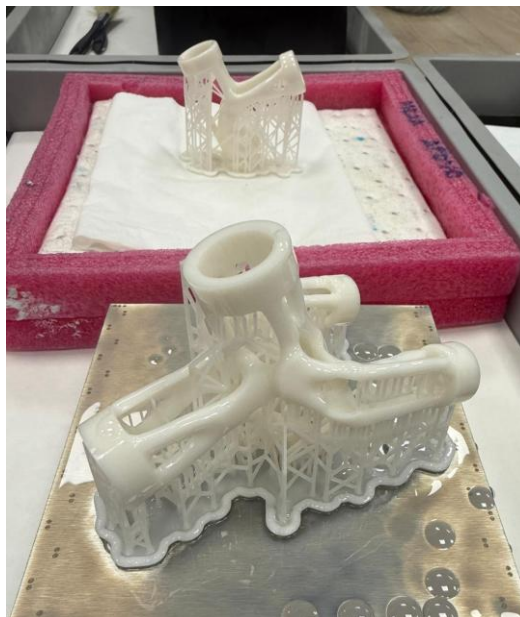


Ilustración 92. Piezas impresas sin postprocesado

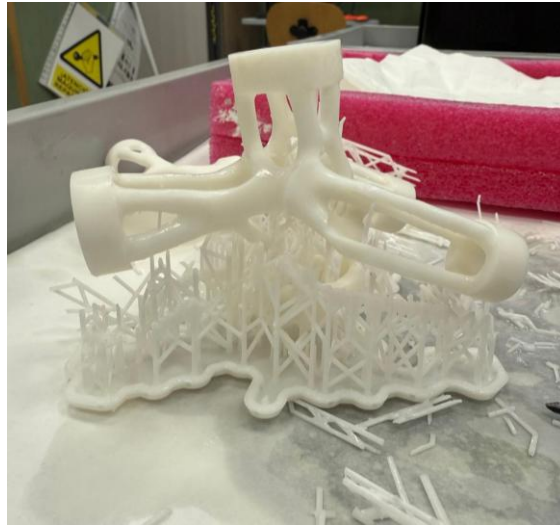


Ilustración 93. Eliminación de los soportes de las piezas refinadas

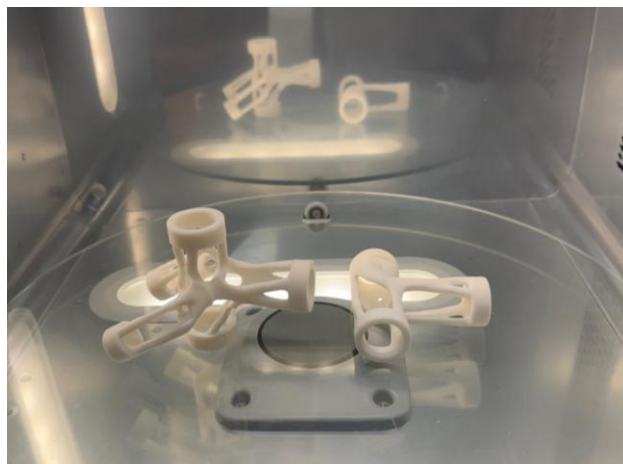


Ilustración 94. Piezas en el horno para la curación

Las piezas refinadas impresas mediante este último método se observan en la Ilustración 95.



Ilustración 95. Piezas macizas impresas mediante SLA

- Impresión mediante MJF (Multi Jet Fusion)

Con el objetivo de comparar resultados obtenidos mediante otras tecnologías de impresión, también se fabricó la pieza simple refinada utilizando el método MJF. Esta tecnología, desarrollada por HP, se basa en la fusión selectiva de polvo termoplástico depositados capa a capa por cabezales de inyección sobre una base de polvo previamente extendido. Posteriormente, se aplica calor en las zonas activadas y se genera la forma que se desea. [52]

La impresión MJF ofrece una alta calidad superficial, precisión y resistencia mecánica. Este método se emplea para piezas funcionales que no requieren de postprocesado complejo.



Ilustración 96. Pieza simple refinada impresa mediante MJF

A continuación, se muestran una serie de imágenes que recogen las distintas versiones impresas de las piezas desarrolladas a lo largo del proyecto. Para cada una de ellas, se muestra de forma comparativa la versión maciza fabricada con tecnología FDM junto a su versión refinada obtenida mediante la impresión SLA, lo que permite apreciar con claridad los efectos del proceso de optimización. En el caso concreto de la pieza simple, se ha incluido además una comparativa entre tres versiones refinadas impresas con tecnologías FDM, SLA y MJF, con el objetivo de observar las diferencias en el acabado superficial y la calidad final que ofrece cada método.



Ilustración 97 Comparativa entre la versión optimizada y la maciza sin optimizar de la pieza simple



Ilustración 98. Comparativa entre la versión optimizada y la maciza sin optimizar de la pieza compuesta sin refuerzo



Ilustración 99 Comparativa entre la versión optimizada y la maciza sin optimizar de la pieza compuesta con refuerzo

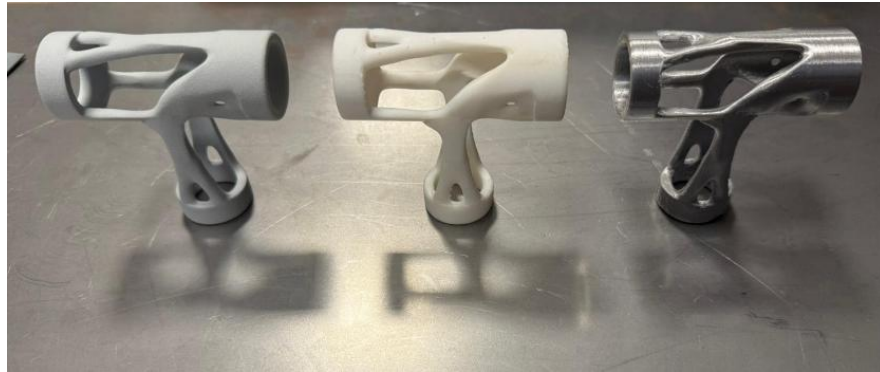


Ilustración 100. Comparativa de la pieza simple impresa mediante diferentes tecnologías

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 COSTE DEL PROYECTO

Para analizar el coste de fabricación de las diferentes versiones de las piezas se ha tenido en cuenta tanto la geometría (maciza u optimizada) ya que afecta al peso de la pieza como el tipo de tecnología de impresión empleada (FDM, SLA o MJF). El objetivo ha sido, además de evaluar el comportamiento estructural de las piezas, entender su viabilidad económica en un contexto real de producción.

Las piezas optimizadas fabricadas con resina *rigid* mediante la tecnología SLA han sido presupuestadas utilizando un modelo de cálculo basado en datos reales como el consumo de material y tiempo de impresión. También se han incluido tanto el uso de las impresoras como el salario del técnico encargado de la impresión y el postprocesado. Los precios de las impresoras, así como los costes de mantenimiento y amortización han sido extraídos de un dossier técnico que ha facilitado la universidad. Estos precios se muestran en la siguiente imagen:

COSTES		
Orden	Impresora 3D	Coste € (sin IVA)
1	DYNAMICAL TOOLS DT600+	36785
2	PRUSA I3KS – MK3S+	825 (impresora) + 500 (carenado)
3	HP 580C	110600
4	FORMLABS – FORM 3	5500 (paquete completo)
5	FORMLABS – FORM 3L	17300 (paquete completo)
6	MARKFORGED X7	66500
7	CORREADORA CONIEX	22000
Observaciones: Ver otros costes y modelos en: https://filament2print.com/es/191-impresoras-3d		

Ilustración 101. Precios de las impresoras de la universidad

En cuanto al precio de la resina utilizada, se ha tomado como referencia el valor de mercado [53]. Los precios para estas piezas optimizadas han sido:

- Pieza simple optimizada: 21,48 €
- Pieza compuesta sin refuerzo optimizada: 29,18 €
- Pieza compuesta con refuerzo optimizada: 23,56 €

A continuación, se adjuntan las tablas realizadas para calcular estos costes.

ANÁLISIS DE COSTES PARA PROTOTIPADO DE PIEZAS EN IMPRESORA 3D -FDM		
DATOS AMORTIZACIÓN MÁQUINA		
Precio máquina (€)	5.500	
Coste mantenimiento anual (€)	550	
Años de amortización	5	
Amortización (h/año) - 223 días-año / 8 horas-día	1784	
Precio Hora máquina-amortización (€/h)	0,80	
Precio Hora venta-público (€/h)	0,88	
DATOS COSTE MATERIAL		
Coste material modelo: resina rigid (€/cc) (150€-950 cc)	0,16	
Coste material soporte: resina rigid	0,16	
DATOS COSTE TÉCNICO ANALISTA		
Coste técnico analista del modelo - inc. desmoldeo (€/h)	25	

PIEZA SIMPLE OPTIMIZADA		
CONCEPTOS PRESUPUESTADOS	Opción Solido	Costes parciales
Material modelo (cc)	31,74	5,01 €/ud
Soporte modelo (cc)	0,00	0,00 €/ud
Tiempo modelo (h)	4,50	3,97 €/ud
Piezas por bandeja (ud)	1,00	0,00 €/ud
Tiempo técnico-analista (h)	0,50	12,50 €
Cantidad de piezas	1,00	
Coste unitario (€) en ICAI + IVA	21,48 €/Ud	
Coste total (€) en ICAI + IVA	21,48 €	

Ilustración 102. Presupuesto pieza simple optimizada

ANÁLISIS DE COSTES PARA PROTOTIPADO DE PIEZAS EN IMPRESORA 3D -FDM	
DATOS AMORTIZACIÓN MÁQUINA	
Precio máquina (€)	5.500
Coste mantenimiento anual (€)	550
Años de amortización	5
Amortización (h/año) - 223 días-año / 8 horas-día	1784
Precio Hora máquina-amortización (€/h)	0,80
Precio Hora venta-público (€/h)	0,88
DATOS COSTE MATERIAL	
Coste material modelo: resina rigid (€/cc) (150€-950 cc)	0,16
Coste material soporte: resina rigid	0,16
DATOS COSTE TÉCNICO ANALISTA	
Coste técnico analista del modelo - inc. desmoldeo (€/h)	25

PIEZA COMPUESTA SIN REFUERZO OPTIMIZADA		
CONCEPTOS PRESUPUESTADOS	Opción Solido	Costes parciales
Material modelo (cc)	78,82	12,45 €/ud
Soporte modelo (cc)	0,00	0,00 €/ud
Tiempo modelo (h)	4,80	4,23 €/ud
Piezas por bandeja (ud)	1,00	0,00 €/ud
Tiempo técnico-analista (h)	0,50	12,50 €
Cantidad de piezas	1,00	
Coste unitario (€) en ICAI + IVA	29,18 €/Ud	
Coste total (€) en ICAI + IVA	29,18 €	

Ilustración 103. Presupuesto pieza compuesta sin refuerzo optimizada

ANÁLISIS DE COSTES PARA PROTOTIPADO DE PIEZAS EN IMPRESORA 3D -FDM	
DATOS AMORTIZACIÓN MÁQUINA	
Precio máquina (€)	5.500
Coste mantenimiento anual (€)	550
Años de amortización	5
Amortización (h/año) - 223 días-año / 8 horas-día	1784
Precio Hora máquina-amortización (€/h)	0,80
Precio Hora venta-público (€/h)	0,88
DATOS COSTE MATERIAL	
Coste material modelo: resina rigid (€/cc) (150€-950 cc)	0,16
Coste material soporte: resina rigid	0,16
DATOS COSTE TÉCNICO ANALISTA	
Coste técnico analista del modelo - inc. desmoldeo (€/h)	25

PIEZA COMPUESTA CON REFUERZO OPTIMIZADA		
CONCEPTOS PRESUPUESTADOS	Opción Solido	Costes parciales
Material modelo (cc)	44,92	7,09 €/ud
Soporte modelo (cc)	0,00	0,00 €/ud
Tiempo modelo (h)	4,50	3,97 €/ud
Piezas por bandeja (ud)	1,00	0,00 €/ud
Tiempo técnico-analista (h)	0,50	12,50 €
Cantidad de piezas	1,00	
Coste unitario (€) en ICAI + IVA	23,56 €/Ud	
Coste total (€) en ICAI + IVA	23,56 €	

Ilustración 104. Presupuesto pieza compuesta con refuerzo optimizada

Por otro lado, para calcular el precio de las versiones macizas impresas en FDM, se ha recurrido a la plataforma *Xometry*, que permite obtener presupuestos automáticos a partir de los archivos 3D. Esta herramienta considera el volumen de impresión, el material empleado, el porcentaje de relleno interno y las condiciones de fabricación elegidas. Los precios resultantes han sido:

- Pieza simple maciza: 20,68 €
- Pieza compuesta sin refuerzo maciza: 41,51 €
- Pieza compuesta con refuerzo maciza: 36,46 €

Estos presupuestos están adjuntos en el *ANEXO 1. Presupuestos obtenidos de Xometry*

La comparación entre ambos tipos de geometría muestra que el proceso de optimización, además de ventajas técnicas, implica un ahorro económico gracias a la reducción de material. Esta diferencia de costes es especialmente notable en las piezas compuestas, donde el volumen inicial es considerable.

6. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Este Trabajo Fin de Grado ha abordado el rediseño de un racor de una bicicleta mediante herramientas de diseño generativo y técnicas de optimización topológica con el objetivo de reducir masa sin comprometer su resistencia estructural. A través de simulaciones FEM y de fabricación aditiva mediante tecnologías (FDM, SLA y MJF) se ha podido validar la viabilidad del enfoque tanto desde el punto de vista técnico como funcional.

Los resultados han demostrado que la combinación de estas tecnologías permite generar geometrías más eficientes, adaptadas a cargas reales y con un uso de material menor. Además, la fabricación aditiva ha facilitado la producción de estas geometrías optimizadas sin necesidad de moldes lo que representa una ventaja de personalización de componentes.

Sin embargo, también se han identificado ciertas limitaciones como la calidad y las propiedades mecánicas ofrecidas por cada tecnología de impresión 3D. FDM resulta útil para validar el diseño en fases iniciales; SLA ofrece gran precisión y calidad superficial, aunque no es adecuada para piezas que deban soportar grandes cargas estructurales y MJF se presenta como la opción más equilibrada en términos de resistencia y funcionalidad.

Desde el punto de vista económico, el análisis comparativo entre piezas macizas y optimizadas ha demostrado que las versiones con reducción de masa no solo mantienen un buen comportamiento estructural, sino que además resultan más económicas en términos de consumo de material y tiempo de fabricación. A pesar de que la impresión 3D no es la opción más rentable para grandes volúmenes, la optimización topológica permite reducir costes frente a diseños convencionales, además de aportar ventajas en peso y sostenibilidad.

Desde una perspectiva de sostenibilidad, el uso de impresión 3D conlleva ventajas claras: menor desperdicio de material, posibilidad de producción bajo demanda y eliminación de procesos contaminantes asociados a la fabricación convencional.

De cara a trabajos futuros, sería interesante explorar la viabilidad de imprimir este mismo componente con tecnologías metálicas como DMLS con el objetivo de analizar el comportamiento estructural del racor bajo solicitaciones reales. También se podrían estudiar racores optimizados para otros tipos de bicicletas, así como el análisis dinámico en condiciones de uso.

En definitiva, este proyecto ha demostrado el potencial del diseño generativo y la fabricación aditiva como herramientas reales para el desarrollo de componentes mecánicos más eficientes, adaptados y sostenibles, marcando un camino claro hacia nuevas formas de diseñar y fabricar en el ámbito de la nueva ingeniería.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] «¡Qué es la fabricación aditiva, tecnologías, ventajas y mucho más!», TOTVS. Accedido: 29 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://es.totvs.com/blog/gestion-industrial/que-es-la-fabricacion-aditiva-tecnologias-ventajas-y-mucho-mas/>
- [2] admin, «Optimización de la topología: ¿qué es?», Goebel Engineering. Accedido: 29 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.goebel-engineering.com/es/optimizacion-de-la-topologia-que-es/>
- [3] C. S.L, «¿Cómo funciona la herramienta de optimización topológica en SOLIDWORKS Simulation?», SOLIDWORKS LATAM y España. Accedido: 29 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://blogs.solidworks.com/solidworkslatamyesp/solidworks-blog/simulacion/solidworks_simulation/como-funciona-la-herramienta-de-optimizacion-topologica-en-solidworks-simulation/
- [4] E. minutes read, «Topology Optimization 101: How to Use Algorithmic Models to Create Lightweight Design», Formlabs. Accedido: 29 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://formlabs.com/blog/topology-optimization/>
- [5] «Cómo simular el comportamiento de materiales con FEM. - Kernova | Conversión de maquinaria hidráulica en electromecánica». Accedido: 29 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://kernova.es/como-simular-el-comportamiento-de-materiales-con-fem/>
- [6] «Análisis FEM - Método de elementos finitos - Debem». Accedido: 29 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.debem.com/es/analisis-fem/>
- [7] «Additive manufacturing, explained | MIT Sloan». Accedido: 29 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://mitsloan.mit.edu/ideas-made-to-matter/additive-manufacturing-explained>
- [8] «Fabricación aditiva», Proyecto Rural 3D. Accedido: 29 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://rural3d.csic.es/proyecto-rural-3d/fabricacion-aditiva/>
- [9] «fabricacionaditiva.online/5.htm#:~:text=Generalmente se fecha su origen,además la empresa 3D Systems.» Accedido: 29 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <http://www.fabricacionaditiva.online/5.htm>
- [10] S. Hickey, «Chuck Hull: the father of 3D printing who shaped technology», *The Guardian*, 22 de junio de 2014. Accedido: 29 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.theguardian.com/business/2014/jun/22/chuck-hull-father-3d-printing-shaped-technology>
- [11] «¿Cuáles son los materiales para impresión 3d más utilizados?» Accedido: 29 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://tecnobro3d.com/materiales-para-impresion-3d/>
- [12] «Fabricacion aditiva: Definición, procesos y beneficios – Electrónica Edimar». Accedido: 29 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.edimar.com/fabricacion-aditiva-que-es/>

- [13] D. G. Stratasys Staff de, «La evolución de la manufactura aditiva», <http://intelligy.com/>. Accedido: 29 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <http://intelligy.com/blog/2024/08/06/la-evolucion-de-la-manufactura-aditiva/>
- [14] «Objetivos de Desarrollo Sostenible», UNDP. Accedido: 29 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.undp.org/es/sustainable-development-goals>
- [15] RAE, «racor | Diccionario del estudiante», «Diccionario del estudiante». Accedido: 22 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.rae.es/diccionario-estudiante/racor>
- [16] «seat lug Que significa - Traducción | Goong.com - Diccionario de Nueva Generación». Accedido: 22 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://goong.com/es/word/seat-lug-que-significa--traduccion/>
- [17] «Botton Head Lug(F270/F280/F282) - Allotec Co., Ltd.» Accedido: 22 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: http://www.allotec.com.tw/BOTTON-HEAD-LUG2.html?CID=1_8
- [18] «bottom bracket lug», Bing. Accedido: 22 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.bing.com/images/search?q=bottom+bracket+lug&FORM=HDRSC4>
- [19] «Tubo Sillin ** Zoom ** Azul * Sp-215 27.2 X 400Mm», Full Bike Sports. Accedido: 22 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.fullbike.cl/tubo-sillin-zoom-azul-sp-215-272-x-400mm>
- [20] «Restauracion pintura cuadro fileteado racores juego direccion bicicleta carretera antigua clasica carreras», bicicletasclasicasleo.com. Accedido: 22 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://bicicletasclasicasleo.com/project/restauracion-pintura-cuadro-fileteado-racores-juego-direccion-bicicleta-carretera-antigua-clasica-carreras/>
- [21] «Staubabsaugung Staubrotor für Kernbohrgerät 1 1/4" Bohrkronen», eBay. Accedido: 22 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.ebay.es/itm/163942744245>
- [22] «Bricolaje, Decoración, Jardín y Construcción - Leroy Merlin». Accedido: 22 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.leroymerlin.es/productos/racor-multicapa-a-engastar-multi-perfil-16-hembra-curvo-1-2-bolsa-de-5-racores-noyon-thiebault-87925164.html>
- [23] J. E. Caballero, «CICLISMO HISTORIA: La bicicleta, inicios e historia.», CICLISMO HISTORIA. Accedido: 22 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://ciclismohistoria.blogspot.com/2014/06/la-bicicleta-inicios-e-historia.html>
- [24] J. E. Caballero, «CICLISMO HISTORIA: La bicicleta, inicios e historia.», CICLISMO HISTORIA. Accedido: 22 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://ciclismohistoria.blogspot.com/2014/06/la-bicicleta-inicios-e-historia.html>
- [25] «Bicis Míticas: Specialized Stumpjumper (1981) | MTB Pro». Accedido: 22 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.mtbpro.es/afondo/bicis-miticas-specialized-stumpjumper-1981>
- [26] «Cuadro de bicicleta de carretera con disco de carbono Triaero, cuadro con freno A9 Dsic, pintura», ICAN Cycling. Accedido: 22 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://es.icancycling.com/products/a9-painted-frame>
- [27] «Frame - A. Homer Hilsen 2025», Rivendell Bicycle Works. Accedido: 22 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.rivbike.com/products/homer>

- [28] «What's new in Solid Edge 2024», 2024.
- [29] «Generative design», *Wikipedia*. 2 de junio de 2025. Accedido: 14 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Generative_design&oldid=1293521594
- [30] «Transform Design and Manufacturing with Simulation-Driven Insights», Default. Accedido: 14 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://altair.com/inspire>
- [31] F. Véle, M. Ackermann, J. Macháček, y J. Šafka, «Case Study of Additively Manufactured Mountain Bike Stem», *Materials*, vol. 16, n.º 13, Art. n.º 13, ene. 2023, doi: 10.3390/ma16134717.
- [32] A. Deacon, «PolyNURBS». Accedido: 14 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://2021.help.altair.com/2021/inspire/en_us/topics/shared/geometry/polynurbs_st_c.htm
- [33] «Decathlon reimagina una bicicleta más liviana, fuerte y sostenible usando el diseño generativo de Autodesk – Autodesk LATAM». Accedido: 14 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://blogs.autodesk.com/latam/2020/11/18/decathlon-reimagina-una-bicicleta-mas-liviana-fuerte-y-sostenible-usando-el-diseno-generativo-de-autodesk/>
- [34] «Using Generative Design to Build the Performance Bike of the Future | Autodesk University». Accedido: 14 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.autodesk.com/autodesk-university/article/Using-Generative-Design-to-Build-the-Performance-Bike-of-the-Future?msckid=0ac2784a1d846f603992773d1c2c6ed1>
- [35] M. J. R, «Una bicicleta eléctrica impresa en 3D que combina la innovación y la artesanía», 3Dnatives. Accedido: 14 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.3dnatives.com/es/urwahn-bicicleta-electrica-impresa-en-3d-200920222/>
- [36] «Comparación de tecnologías de impresión 3D: FDM, SLA o SLS | Formlabs». Accedido: 15 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://formlabs.com/es/blog/fdm-sla-sls-como-elegir-tecnologia-impresion-3d-adeuada/>
- [37] S. User, «Ineo - Impresión 3D FDM», Ineo. Accedido: 5 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.ineo.es/es/landing-impresion-3d-fdm?msckid=a3978580eb071a1b2d05ede81201d206>
- [38] A. M, «SLA vs DLP: ¿Qué tecnología 3D de resina escoger?», 3Dnatives. Accedido: 5 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.3dnatives.com/es/sla-vs-dlp-resina-080420212/>
- [39] S. User, «Ineo - Sinterizado Láser SLS», Ineo. Accedido: 5 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.ineo.es/es/landing-sinterizado-laser-sls?msckid=f074c842e5d21315723ba02a1c77e369>
- [40] «Qué es la Impresión 3D Multi Jet Fusion (MJF): Tecnología y Ventajas». Accedido: 5 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.weerg.com/es/guias/multi-jet-fusion-mjf-3d-que-es-y-como-functiona>
- [41] «CFF | CreaFab3D». Accedido: 5 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://creafab3d.com/cff/>
- [42] «¿Cuál es la diferencia fundamental entre la impresión 3D DMLS y SLM? - LS Tech», <https://www.longshengmfg.com/es/>. Accedido: 5 de julio de 2025. [En línea].

- Disponible en: <https://www.longshengmfg.com/es/%C2%BFCu%C3%A1-es-la-diferencia-fundamental-entre-la-impresi%C3%B3n-3D-DML-y-SLM/>
- [43] «Proveedor mundial de productos fabricados y piezas de mecanizado | Stanford Advanced Materials». Accedido: 5 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.samaterials.es/>
- [44] A. M, «Guía completa: La impresión 3D de metal por WAAM, ¡te explicamos todo!», 3Dnatives. Accedido: 5 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.3dnatives.com/es/guia-completa-impresion-3d-metal-waam-050920232/>
- [45] «Aluminio 6061-T6 usos y aplicaciones | Serviacero Especiales». Accedido: 22 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.serviacero.com/blog/aluminio-6061-t6-alta-resistencia/>
- [46] nexovirtual, «Domina la Impresión 3D FDM: Parámetros Clave para una Impresión Perfecta», CADEMS. Accedido: 30 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.cadems.es/domina-la-impresion-3d-fdm-parametros-clave-para-una-impresion-perfecta/>
- [47] I. 3DGuías32 minutos de lectura, «Guía sobre impresión 3D por estereolitografía (SLA)», Formlabs. Accedido: 30 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://formlabs.com/es/blog/guia-definitiva-estereolitografia-sla-impresion-3d/>
- [48] «Fusión Multi Jet, Una Guía Completa», Layers Blog. Accedido: 30 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://layers.app/blog/es/fusion-multi-jet-una-guia-completa/>
- [49] S. User, «Ineo - Impresión 3D FDM», Ineo. Accedido: 28 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.ineo.es/es/landing-impresion-3d-fdm?msclkid=06ea49d073831eaa878d218fd09159d8>
- [50] «¿Qué es FDM? Tecnología de Fused Deposition Modeling para impresión 3D». Accedido: 28 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.stratasys.com/es/guide-to-3d-printing/technologies-and-materials/fdm-technology/>
- [51] I. 3DGuías32 minutos de lectura, «Guía sobre impresión 3D por estereolitografía (SLA)», Formlabs. Accedido: 28 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://formlabs.com/es/blog/guia-definitiva-estereolitografia-sla-impresion-3d/?srsltid=AfmBOopH-uG5Ae6FrRzyphC1O4tFVKt-JtQR9RsDC9Rpr-7sHKpzUzL1>
- [52] «Nylon PA12 Servicio de impresión 3D Online». Accedido: 28 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.weerg.com/es/impresion-3d-materiales/nylon/pa12>
- [53] «PLA Extrafill», Filament2Print. Accedido: 28 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://filament2print.com/es/pla/2659-15723-pla-premium-extrafill.html>

ANEXO 1. PRESUPUESTOS OBTENIDOS DE XOMETRY



Xometry Europe GmbH
Ado-Lovelace-Str. 9
85521, Ottobrunn
T: +49 89 3 803 4818
F: +49 89 3 860 142
E: info@xometry.eu
www.xometry.de

UST-Id.Nr.: DE318027176
Steuer-Nr.: 143/194/00231
Handelsregister: Amtsgericht München
/ HRB 256172
Bank: J.P. Morgan AG
IBAN: DE38 5011 0800 6161 5322 02
BIC: CHASDEFX

Director / Geschäftsführer: Dmitry Kojidov

PRESUPUESTO E-1518442-1469683

Para: **ARACELI RUANO PEÑALVER**

Dirección de facturación: - not assigned -
Dirección de envío: - not assigned -
Dirección de facturación: - not assigned -

Teléfono: +34 676 283 237
Correo electrónico: araceli.ruano00@gmail.com

Número de presupuesto: **E-1518442-1469683**

Fecha del presupuesto: **28.06.2025**

Fecha de envío estimada: **8 días laborables**

*(calculado a partir de la fecha de pedido del cliente)

Precio válido hasta: **28.07.2025**

Pos.	Descripción	Cantidad	Precio unitario	Total
10.	 Nombre de la pieza: PiezaSimple.stl Caja contenedora: 75.0mm x 75.0mm x 30.0mm Proceso: 3D Printing FDM - Fused Deposition Modeling Material: PLA, Gray, Light Infill Layer thickness, µm: 200 Infill: Light (20% - 50%) Acabado: Standard Insertos: - Roscas y agujeros roscados: -	1	€17.38	€17.38
	Gastos de envío a: , Spain. (Delivery terms: DAP)			€0.00
	VAT (19.0%)			€3.30
	Valor total del pedido, neto:			€17.38
	Valor total del pedido, bruto:			€20.68

Estado del presupuesto: **Auto presupuestado**

[Abrir el presupuesto](#)

Queremos trabajar con usted. Si obtiene un presupuesto más bajo, envíenoslo e intentaremos superarlo.

Por favor, revise este presupuesto para comprobar su exactitud antes de realizar el pedido

- Hemos calculado el precio y estimado una ventana de entrega para su trabajo en función de la geometría del modelo 3D que ha proporcionado, junto con las tolerancias, características y operaciones secundarias que seleccionó durante el proceso de envío y que confirmamos específicamente en esta cotización. No extraemos automáticamente características, tolerancias u otra información no geométrica de su modelo 3D enviado, incluso si están representadas allí (por ejemplo, roscas, agujeros roscados, etc.). Aunque nuestros precios se generan dinámicamente en tiempo real, respetaremos el precio en esta cotización hasta 28.07.2025 (aunque la ventana de entrega estimada se recalculará en el momento de realizar el pedido real).

- Aunque podemos proporcionarle asistencia en el diseño para la fabricación, usted es el responsable último de la idoneidad de su diseño y de la selección de los materiales asociados, para cualquier fin previsto. Puede enviarnos uno o más dibujos de ingeniería y/o hojas de especificaciones. Aunque haremos todo lo posible para identificar cualquier incoherencia o conflicto en sus materiales antes de fabricar su pieza, usted es el único responsable de cualquier incoherencia entre los materiales que nos proporciona y lo que se refleja en este presupuesto.

- A menos que se especifique lo contrario, se aplican los [Términos y condiciones](#) de Xometry Europe GmbH

- Las piezas fabricadas con materiales propensos a la oxidación pueden ser recubiertas con un agente anticorrosivo a base de aceite a nuestra discreción. Por favor, infórmenos si acepta el riesgo de una posible corrosión durante el transporte y desea recibir sus piezas sin aceite

Unless specified otherwise, [Terms and Conditions](#) of Xometry Europe GmbH apply

Web: [get.xometry.eu](https://www.get.xometry.eu)
Servicio de atención al cliente: enquiry@xometry.eu
Teléfono: +49 893 803 4818



Xometry Europe GmbH
Ady-Lovelace-Str. 9
85521, Ottobrunn
T: +49 89 803 4818
F: +49 89 93 960 142
E: info@xometry.eu
www.xometry.de

USt-Id.Nr.: DE318027176
Steuer-Nr.: 143/194/00231
Handelsregister: Amtsgericht München
/ HRB 256172
Bank: J.P. Morgan AG
IBAN: DE38 5011 0800 6161 5322 02
BIC: CHASDEF33

Director / Geschäftsführer: Dmitry Kojidov

PRESUPUESTO E-1518443-1469684

Para: **ARACELI RUANO PEÑALVER**

Dirección de facturación: - not assigned -
- not assigned -
- not assigned -

Teléfono: +34 676 283 237

Correo electrónico: araceli.ruano00@gmail.com

Número de presupuesto: **E-1518443-1469684**

Fecha del presupuesto: **28.06.2025**

Fecha de envío estimada: **8 días laborables**

*(calculado a partir de la fecha de pedido del cliente)

Precio válido hasta: **28.07.2025**

Pos.	Descripción	Cantidad	Precio unitario	Total
10.	 Nombre de la pieza: PiezaCompuesta.stl Caja contenedora: 108.3mm x 80.0mm x 75.0mm Proceso: 3D Printing FDM - Fused Deposition Modeling Material: PLA, Gray, Light Infill Layer thickness, µm: 200 Infill: Light (20% - 50%) Acabado: Standard Insertos: - Roscas y agujeros roscados: -	1	€34.88	€34.88
	Gastos de envío a: , Spain. (Delivery terms: DAP)			€0.00
	VAT (19.0%)			€6.63
	Valor total del pedido, neto:			€34.88
	Valor total del pedido, bruto:			€41.51

Estado del presupuesto: **Auto presupuestado**

[Abrir el presupuesto](#)

Queremos trabajar con usted. Si obtiene un presupuesto más bajo, envíenoslo e intentaremos superarlo.

Por favor, revise este presupuesto para comprobar su exactitud antes de realizar el pedido

- Hemos calculado el precio y estimado una ventana de entrega para su trabajo en función de la geometría del modelo 3D que ha proporcionado, junto con las tolerancias, características y operaciones secundarias que seleccionó durante el proceso de envío y que confirmamos específicamente en esta cotización. No extraemos automáticamente características, tolerancias u otra información no geométrica de su modelo 3D enviado, incluso si están representadas allí (por ejemplo, roscas, agujeros roscados, etc.). Aunque nuestros precios se generan dinámicamente en tiempo real, respetaremos el precio en esta cotización hasta 28.07.2025 (aunque la ventana de entrega estimada se recalculará en el momento de realizar el pedido real).

- Aunque podemos proporcionarle asistencia en el diseño para la fabricación, usted es el responsable último de la idoneidad de su diseño y de la selección de los materiales asociados, para cualquier fin previsto. Puede enviarnos uno o más dibujos de ingeniería y/o hojas de especificaciones. Aunque haremos todo lo posible para identificar cualquier incoherencia o conflicto en sus materiales antes de fabricar su pieza, usted es el único responsable de cualquier incoherencia entre los materiales que nos proporciona y lo que se refleja en este presupuesto.

- A menos que se especifique lo contrario, se aplican los [Términos y condiciones](#) de Xometry Europe GmbH

- Las piezas fabricadas con materiales propensos a la oxidación pueden ser recubiertas con un agente anticorrosivo a base de aceite a nuestra discreción. Por favor, infórmenos si acepta el riesgo de una posible corrosión durante el transporte y desea recibir sus piezas sin aceite

Unless specified otherwise, [Terms and Conditions](#) of Xometry Europe GmbH apply

Web:
Servicio de atención al cliente:
Teléfono:

get.xometry.eu
enquiry@xometry.eu
+49 893 803 4818



Xometry Europe GmbH
Ada-Lovelace-Str. 9
85521, Ottobrunn
T: +49 893 803 4818
F: +49 89 93 960 142
E: info@xometry.eu
www.xometry.de

USt-Id.Nr.: DE318027176
Steuer-Nr.: 143/194/00231
Handelsregister: Amtsgericht München
/ HRB 256172
Bank: J.P. Morgan AG
IBAN: DE38 5011 0800 6161 5322 02
BIC: CHASDEFX

Director / Geschäftsführer: Dmitry Kojidov

PRESUPUESTO E-1518445-1469686

Para: **ARACELI RUANO PEÑALVER**

Dirección de facturación: - not assigned -
- not assigned - - not assigned -
- not assigned -

Teléfono: +34 676 283 237

Correo electrónico: araceli.ruano00@gmail.com

Número de presupuesto: **E-1518445-1469686**

Fecha del presupuesto: **28.06.2025**

Fecha de envío estimada: **8 días laborables**

*(calculado a partir de la fecha de pedido del cliente)

Precio válido hasta: **28.07.2025**

Pos.	Descripción	Cantidad	Precio unitario	Total
10.	Nombre de la pieza: PiezaCompuestaConRefuerzo.stl Caja contenedora: 108.3mm x 80.0mm x 75.0mm Proceso: 3D Printing FDM - Fused Deposition Modeling Material: ABS Standard, White, UltraLight Infill Layer thickness, µm: 200 Infill: Ultralight (up to 20%) Acabado: Standard Insertos: - Roscas y agujeros roscados: - 	1	€30.64	€30.64
	Gastos de envío a: , Spain. (Delivery terms: DAP)			€0.00
	VAT (19.0%)			€5.82
	Valor total del pedido, neto:			€30.64
	Valor total del pedido, bruto:			€36.46

Estado del presupuesto: **Auto presupuestado**

[Abrir el presupuesto](#)

Queremos trabajar con usted. Si obtiene un presupuesto más bajo, envíenoslo e intentaremos superarlo.

Por favor, revise este presupuesto para comprobar su exactitud antes de realizar el pedido

- Hemos calculado el precio y estimado una ventana de entrega para su trabajo en función de la geometría del modelo 3D que ha proporcionado, junto con las tolerancias, características y operaciones secundarias que seleccionó durante el proceso de envío y que confirmamos específicamente en esta cotización. No extraeremos automáticamente características, tolerancias u otra información no geométrica de su modelo 3D enviado, incluso si están representadas allí (por ejemplo, roscas, agujeros roscados, etc.). Aunque nuestros precios se generan dinámicamente en tiempo real, respetaremos el precio en esta cotización hasta 28.07.2025 (aunque la ventana de entrega estimada se recalculará en el momento de realizar el pedido real).

- Aunque podemos proporcionarle asistencia en el diseño para la fabricación, usted es el responsable último de la idoneidad de su diseño y de la selección de los materiales asociados, para cualquier fin previsto. Puede enviarnos uno o más dibujos de ingeniería y/o hojas de especificaciones. Aunque haremos todo lo posible para identificar cualquier incoherencia o conflicto en sus materiales antes de fabricar su pieza, usted es el único responsable de cualquier incoherencia entre los materiales que nos proporciona y lo que se refleja en este presupuesto.

- A menos que se especifique lo contrario, se aplican los [Términos y condiciones](#) de Xometry Europe GmbH

- Las piezas fabricadas con materiales propensos a la oxidación pueden ser recubiertas con un agente anticorrosivo a base de aceite a nuestra discreción. Por favor, infórmenos si acepta el riesgo de una posible corrosión durante el transporte y desea recibir sus piezas sin aceite

Unless specified otherwise, [Terms and Conditions](#) of Xometry Europe GmbH apply

Web:
Servicio de atención al cliente:
Teléfono:

get.xometry.eu
enquiry@xometry.eu
+49 893 803 4818