COMILLAS
UNIVERSIDAD PONTIFICIA
ICAI

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

DISEÑO, OPTIMIZACIÓN Y FABRICACIÓN MEDIANTE IMPRESIÓN 3D DE UN RACOR DE PEDALIER PARA UN CUADRO DE BICICLETA

Autor: Lucas Teixeira González

Director: Mariano Jiménez Calzado

Co-Director: Silvia Fernández Villamarín

Madrid

Junio de 2026

Declaración de originalidad

Declaro bajo mi responsabilidad que el Proyecto presentado con el título **DISEÑO, OPTIMIZACIÓN Y FABRICACIÓN MEDIANTE IMPRESIÓN 3D DE UN RACOR DE PEDALIER PARA UN CUADRO DE BICICLETA**
e la ETS de Ingeniería – ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el curso académico **2025-2026** es de mi autoría 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.

Uso de Inteligencia Artificial[1]

Declaro bajo mi responsabilidad que (indicar la opción correcta):

☐ No he utilizado Inteligencia Artificial en la elaboración del presente documento.

☒ He utilizado Inteligencia Artificial en la elaboración del presente documento y/o del Anexo B siempre en las condiciones permitidas por la Universidad Pontificia Comillas, es decir, aplicando el Nivel 2 de la Escala de Evaluación de Perkins et al. (2024): "*La IA puede utilizarse para actividades previas a la tarea, como la lluvia de ideas, la descripción y la investigación inicial. Este nivel se centra en el uso de la IA para la planificación, las síntesis y la generación de ideas, pero las evaluaciones deben hacer hincapié en la capacidad de desarrollar y refinar estas ideas de forma independiente*". En concreto, las Inteligencia Artificial ha sido empleada para:

La inteligencia Artificial ha sido empleada para: corrección gramatical y ortográfica de los textos redactados por el autor, la mejora de estilo para cumplir con el registro requerido, lluvia de ideas inicial, orientación para saber dónde buscar información y apoyo para la investigación inicial del estado del arte. En otras palabras, la inteligencia Artificial se ha empleado como herramienta de planificación, síntesis y generación de ideas.



Firmado (alumno): Lucas Teixeira González
Fecha:22/06/2026

[1] Esta declaración se refiere al uso de la Inteligencia Artificial generativa para realizar los documentos del Proyecto (Anexo B y Memoria). No aplica a Proyectos donde, por su naturaleza, deban emplear inteligencia artificial como parte de los mismos (aplicación de técnicas de aprendizaje automático, redes neuronales, análisis de datos…)

Autorización para la entrega del Proyecto

El Director del Proyecto	El co-Director del Proyecto (si aplica)
	
Fdo: Mariano Jiménez Calzado	Fdo: Silvia Fernández Villamarín
Fecha: 26/06/2026	Fecha: 26/06/2026



GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

DISEÑO, OPTIMIZACIÓN Y FABRICACIÓN MEDIANTE IMPRESIÓN 3D DE UN RACOR DE PEDALIER PARA UN CUADRO DE BICICLETA

Autor: Lucas Teixeira González

Director: Mariano Jiménez Calzado

Co-Director: Silvia Fernández Villamarín

Madrid

DISEÑO, OPTIMIZACIÓN Y FABRICACIÓN MEDIANTE IMPRESIÓN 3D DE UN RACOR DE PEDALIER PARA UN CUADRO DE BICICLETA

Autor: Teixeira González, Lucas.
Director: Jiménez Calzado, Mariano.

RESUMEN DEL PROYECTO

Este trabajo diseña, optimiza y fabrica mediante impresión 3D metálica (DMLS) un racor de pedalier para un cuadro de bicicleta de diamante construido con tubos de aluminio reciclados. Empleando diseño generativo y simulación por elementos finitos (FEM), se logra una reducción de masa del 69% respecto al sólido inicial, cumpliendo en todo momento los requisitos estructurales de la norma ISO 4210. El componente final se materializa en AlSi10Mg mediante DMLS, validando la viabilidad técnica y económica del enfoque propuesto.

Palabras clave: Fabricación aditiva, Diseño generativo, Optimización topológica, Aluminio reciclado, Racor de pedalier, FEM, DMLS

1. Introducción

La industria manufacturera afronta una creciente presión regulatoria y medioambiental que hace insostenible el modelo lineal de producción. Los procesos sustractivos convencionales generan entre un 80% y un 95% de material residual y presentan limitaciones geométricas y de flexibilidad que impiden alcanzar el óptimo estructural. En este contexto, la Industria 4.0 pone a disposición del ingeniero herramientas como el diseño generativo, la optimización topológica y la fabricación aditiva, que permiten superar estas limitaciones y abrir la puerta a una fabricación más eficiente, personalizada y sostenible. El presente trabajo nace de la convergencia de estas tendencias aplicadas a un caso concreto y representativo: la unión más solicitada del cuadro de una bicicleta.

2. Definición del proyecto

El objetivo es diseñar y fabricar un racor de pedalier para un cuadro de bicicleta construido con tubos reciclados de aluminio 6061-T6, empleando diseño generativo y FEM para que el componente cumpla los requisitos estructurales de la ISO 4210 con máxima eficiencia de material. Se elige la unión del pedalier, nudo donde confluyen el tubo del sillín, el down tube y las dos vainas inferiores, por ser el punto de mayor exigencia mecánica del cuadro, estableciéndose una tensión admisible a fatiga de 55 MPa como criterio de diseño.

3. Descripción del modelo/sistema/herramienta

El flujo de trabajo se estructura en cuatro etapas: modelado CAD del espacio de diseño en Solid Edge (tubos de referencia, tetones de inserción y BlueSurfaces de transición); validación FEM de la geometría base; aplicación del diseño generativo en dos fases (exploración por incrementos del 10% y refinamiento por búsqueda binaria); y refinamiento final con PolyNURBS. La fabricación se realiza en dos fases: prototipo de verificación en PLA por FDM y componente final en AlSi10Mg por DMLS.

4. Resultados

La optimización topológica reduce la masa del racor un 69% sin superar la tensión admisible de 55 MPa. La validación FEM confirma la validez estructural de la geometría refinada. El coste total de fabricación asciende a 1.711,12 €, de los cuales el 98,9% corresponde al componente final en DMLS (1.691,76 €) y el 1,1% al prototipo en PLA (19,36 €).

5. Conclusiones

El trabajo demuestra la viabilidad técnica de diseñar y fabricar un racor de pedalier con tubos reciclados combinando diseño generativo, FEM y DMLS. Esta sinergia permite alcanzar geometrías de alta eficiencia imposibles con procesos convencionales. La metodología es directamente transferible a otras uniones del cuadro y el enfoque de fabricación en dos fases resulta económica y técnicamente eficiente.

6. Referencias

[1] M. Petot, ROCKRIDER BABEL_ // Master Thesis. Behance, 2023. https://www.behance.net/gallery/182419975/ROCKRIDER-BABEL_-Master-Thesis

DESIGN, OPTIMIZATION AND MANUFACTURING THROUGH 3D PRINTING OF A BOTTOM BRACKET SHELL FOR A BICYCLE FRAME

Author: Teixeira González, Lucas.
Supervisor: Jiménez Calzado, Mariano.

ABSTRACT

This work designs, optimizes and manufactures via metal additive manufacturing (DMLS) a bottom bracket junction for a diamond bicycle frame built from recycled aluminium tubes. Using generative design and FEM simulation, a 69% mass reduction is achieved while fully complying with ISO 4210 structural requirements. The final component is produced in AlSi10Mg by DMLS, validating the technical and economic feasibility of the proposed approach.

Keywords: Additive manufacturing, Generative design, Topology optimization, Recycled aluminium, Bottom bracket junction, FEM, DMLS

1. Introduction

Conventional manufacturing faces growing environmental pressure that makes the linear production model unsustainable. Subtractive processes generate up to 95% material waste and impose geometric constraints that prevent reaching the structural optimum. Industry 4.0 tools such as generative design and additive manufacturing overcome these limitations, enabling more efficient and sustainable production.

2. Project definition

The objective is to design and manufacture a bottom bracket junction for a bicycle frame built with recycled 6061-T6 aluminium tubes, using generative design and FEM to meet ISO 4210 structural requirements with maximum material efficiency. The bottom bracket junction, where the seat tube, down tube and two chainstays converge, is chosen as the most mechanically demanding node of the frame, with an allowable fatigue stress of 55 MPa as the design criterion.

3. Project description and methodology

The workflow comprises four stages: CAD modelling of the design space in Solid Edge (reference tubes, insertion lugs and transition BlueSurfaces); FEM validation of the base geometry; generative design in two phases (10% increment exploration and binary-search refinement); and final PolyNURBS refinement. Manufacturing is carried out in two stages: a PLA verification prototype by FDM and the final component in AlSi10Mg by DMLS.

4. Results

Topology optimization reduces the junction mass by 69% without exceeding the 55 MPa allowable stress. FEM validation confirms the structural validity of the refined geometry. Total manufacturing cost amounts to €1,711.12, with 98.9% corresponding to the DMLS final component (€1,691.76) and 1.1% to the PLA prototype (€19.36).

5. Conclusiones

The work demonstrates the technical feasibility of designing and manufacturing a bottom bracket junction from recycled tubes by combining generative design, FEM and DMLS. This synergy achieves structurally efficient geometries unattainable with conventional processes. The methodology is directly transferable to other frame joints, and the two-stage manufacturing strategy proves both technically and economically efficient.

6. References

[1] M. Petot, ROCKRIDER BABEL_ // Master Thesis. Behance, 2023.

https://www.behance.net/gallery/182419975/ROCKRIDER-BABEL_-Master-Thes

Índice de la memoria

Capitulo 1 Introducción..... 9

1.1. Contexto: industria, sostenibilidad y fabricación aditiva..... 9
1.2. Motivación del proyecto..... 10
1.3. Objetivos del proyecto..... 11
1.4. Alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)..... 12
1.5. Estructura de la memoria..... 13

Capitulo 2 Estado del arte..... 14

2.1 La bicicleta como sistema estructural..... 14
2.1.1 Breve historia de la bicicleta y evolución del cuadro..... 14
2.1.2 Tipos de marcos: geometrías y usos..... 16
2.1.3 El cuadro de diamante: justificación de la elección..... 18
2.1.4 Tubos que componen el cuadro de diamante..... 19
2.1.5 La unión del pedalier: función y exigencias mecánicas..... 20
2.2 Materiales del cuadro..... 21
2.2.1 Acero..... 21
2.2.2 Aluminio..... 22
2.2.3 Titanio..... 23
2.2.4 Fibra de carbono..... 23
2.2.5 Comparativa y justificación de la elección del aluminio reciclado..... 24
2.3 Sostenibilidad y huella ecológica..... 25
2.3.1 Contexto general: economía circular en la industria..... 25
2.3.2 El aluminio reciclado como apuesta sostenible..... 26
2.3.3 Criterios de selección e inspección de tubos reciclados..... 27
2.4 Optimización topológica y diseño generativo..... 27
2.4.1 Concepto e historia..... 27
2.4.2 Método de cálculo y software utilizado..... 28
2.4.3 Ventajas frente a los métodos de diseño convencionales..... 28
2.5 Fabricación aditiva..... 29
2.5.1 Concepto e historia..... 29
2.5.2 Tecnologías disponibles: FDM, SLA, SLS, MJF, DMLS..... 31

2.5.3 Materiales fabricación aditiva 32
2.5.4 Ventajas frente a los métodos de fabricación convencionales 33
2.6 Sinergia entre diseño generativo y fabricación aditiva 34
2.6.1 Por qué se complementan: lo que una no puede sin la otra 34
2.6.2 Aplicaciones reales en ingeniería y en el sector de la bicicleta 35
2.6.3 Aplicación a la unión del pedalier con tubos reciclados de aluminio 36
2.7 Selección justificada de materiales y tecnología 36

Capitulo 3 Definición y planteamiento del problema 38
3.1 Normativa aplicable: ISO 4210 38
3.2 Definición geométrica del cuadro de referencia 39
3.2.1 Geometría del cuadro de diamante 39
3.2.2 Dimensiones de los tubos 40
3.2.3 Geometría del racor: tetones de inserción y zonas de conexión 40
3.3 Propuesta de estado de cargas 41
3.3.1 Consideraciones previas y modelo estructural 41
3.3.2 Cargas estáticas: peso, pedaleo y reacciones de las ruedas 42
3.3.3 Ponderación dinámica de las cargas 45
3.3.4 Análisis de fatiga según ISO 4210 45
3.4 Unión tubo-racor: adhesivo epoxi estructural 47
3.4.1 Justificación de la solución adoptada 47
1.5.1. Resistencia de la junta adhesiva y protocolo de montaje 47
3.5 Especificaciones de diseño del racor 49
3.5.1 Material y propiedades mecánicas de referencia 49
3.5.2 Tensión admisible y factor de seguridad 50
3.5.3 Definición del espacio de diseño y zonas preservadas 50

Capitulo 4 Implantación 52
4.1 Modelado CAD del espacio de diseño 52
4.1.1 Definición de planos y tubos de referencia 53
4.1.2 Obtención de los tetones por sección de los tubos 57
4.1.3 BlueSurfaces conexión tetones–pedalier 59
4.1.4 BlueSurfaces de refuerzo 70
4.1.5 74

4.1.6 Redondeos y geometría final del espacio de diseño 77
4.2 Simulación FEM de la geometría base 79
4.2.1 Configuración del análisis 80
4.2.2 Resultados: mapa de tensiones de Von Mises 80
4.2.3 Síntesis de resultados 81
4.3 Diseño generativo: iteraciones de optimización topológica 81
4.3.1 Configuración del estudio generativo 82
4.3.2 Fase 1: exploración por incrementos del 10% 82
4.3.3 Fase 2: refinamiento por búsqueda 90
4.3.4 Resumen de iteraciones y selección de la geometría óptima 91
4.4 Refinamiento geométrico con PolyNURBS 91

Capitulo 5 Fabricación del prototipo 95
5.1 Necesidad del prototipo de verificación dimensional 95
5.2 Selección de tecnología para el prototipo 95
5.3 Fabricación del prototipo en PLA 99
5.4 Postprocesado del prototipo 101
5.5 Componente final en AlSi10Mg por DMLS 101
5.6 Resumen de costes de fabricación 103

Capitulo 6 Conclusiones y líneas futuras de trabajo 104
6.1 Conclusiones 104
6.2 Líneas futuras de trabajo 105

Capitulo 7 Bibliografía 106

Capitulo 8 Anexos 110

8.1 Presupuesto Protolabs 110
8.2 Plano pieza 110

Índice de Figuras

Figura 1 Laufmaschine 14
Figura 2 Velocípedo 15
Figura 3 Biciclo (Penny Farthing) 15
Figura 4 Safety bicycle 16
Figura 5 Cuadro de diamante 17
Figura 6 Cuadro paso bajo 17
Figura 7 Cuadro de montaña 18
Figura 8 Cuadro TT 18
Figura 9 Tubos principales del cuadro Diamante 20
Figura 10 Unión del pedalier 21
Figura 11 Propiedades de la aleación acero CrMo 22
Figura 12 Propiedades del Aluminio 6061-T6 22
Figura 13 Propiedades del Titanio 23
Figura 14 Propiedades de la fibra de carbono 24
Figura 15 Esquema Economía circular 25
Figura 16 Cuadro de bicicleta para reciclar alguno de sus tubos 26
Figura 17 Optimización topológica y diseño generativo 28
Figura 18 Proceso de torneado (desperdicio de materia prima) 29
Figura 19 Fabricación aditiva (capa a capa) 30
Figura 20 Pieza con geometría orgánica impresa con fabricación aditiva 31
Figura 21 Fabricación aditiva metálica 33
Figura 22 Sinergia entre la optimización topológica y la fabricación aditiva 34
Figura 23 Cuadro de bicicleta desarrollado por Mathieu Petot 35
Figura 24 Flujo de trabajo 37
Figura 25 Fuerzas que actúan en el cuadro 42
Figura 26 Curva S-N del Aluminio 6061-T6 46
Figura 27 Espacio de diseño 50
Figura 28 Planos de referencia definidos según la Tabla 2. 53
Figura 29 Cilindro del pedalier modelado como referencia central del conjunto. 54

Figura 30 Tubo del sillín extruido. 54
Figura 31 Down tube con las dimensiones de la Tabla 3. 55
Figura 32 Vaina inferior extruida. 56
Figura 33 Conjunto de los cuatro tubos de referencia tras la operación Mirror. 56
Figura 34 Vista lateral del conjunto de los tubos de referencia 57
Figura 35 Vista cenital del conjunto de los tubos de referencia 57
Figura 36 Tetón del tubo del sillín obtenido por sección del tubo de referencia. 58
Figura 37 Tetón del down tube obtenido por sección del tubo de referencia. 58
Figura 38 Tetones de las vainas inferiores. 59
Figura 39 Vista general de los cuatro tetones de inserción del racor. 59
Figura 40 Boceto de las superficies de la BlueSurf Down Tube - Pedalier 60
Figura 41 Superficies de la BlueSurf Down Tube - Pedalier 61
Figura 42 BlueSurf Down Tube – Pedalier 61
Figura 43 Sitch Down Tube - Pedalier 62
Figura 44 Conjunto Tubos – Conexión Down Tube/Pedalier 62
Figura 45 Boceto de las superficies de la BlueSurf Sillín - Pedalier 63
Figura 46 Superficies de la Sillín - Pedalier 63
Figura 47 BlueSurf Sillín – Pedalier 64
Figura 48 Sitch Síllín – Pedalier 64
Figura 49 Conjunto Tubos – Conexión Sillín/Pedalier 65
Figura 50 Boceto de las superficies de las BlueSurfs Vainas – Pedalier 65
Figura 51 Superficies de la Vaina 1 - Pedalier 66
Figura 52 Superficies de la Vaina 2 – Pedalier 66
Figura 53 BlueSurf Vaina 1 – Pedalier 67
Figura 54 BlueSurf Vaina 2 – Pedalier 67
Figura 55 Sitch Vaina 1 – Pedalier 68
Figura 56 Sitch Vaina 2 – Pedalier 68
Figura 57 Conjunto Tubos – Conexión Sillín/Pedalier 69
Figura 58 Unión de la primera generación de sólidos 69
Figura 59 Boceto de apoyo de la BlueSurf de apoyo delantera 70
Figura 60 Superficie de apoyo de la BlueSurf de apoyo delantera 71

Figura 61 Simetría de la Superficie de apoyo de la BlueSurf de refuerzo delantera..... 71
Figura 62 Conjunto de cerrado del refuerzo delantero 72
Figura 63 Stich Refuerzo delantero 72
Figura 64 Conjunto Pieza – Refuerzo delantero..... 73
Figura 65 Unión refuerzo pieza 73
Figura 66 Superficie de Apoyo del Refuerzo trasero 74
Figura 67 Conjunto cerrado del refuerzo trasero..... 75
Figura 68 Conjunto Pieza refuerzo..... 75
Figura 69 Simetría del refuerzo trasero 76
Figura 70 Unión Pieza refuerzo trasero..... 76
Figura 71 Aplicación de redondeos principales 77
Figura 72 Vista lateral del espacio de diseño final del racor de pedalier. 78
Figura 73 Vista cenital del espacio de diseño final del racor de pedalier. 78
Figura 74 Vista lateral del espacio de diseño final del racor de pedalier. 79
Figura 75 Variables geometría base 79
Figura 76 Geometría optimizada con reducción del 10% de masa. 83
Figura 77 Distribución de tensiones de Von Mises — iteración 1 (10%). 83
Figura 78 Masa pieza — iteración 1 (10%)..... 83
Figura 79 Geometría optimizada con reducción del 40% de masa. 84
Figura 80 Distribución de tensiones de Von Mises — iteración 2 (20%). 84
Figura 81 Masa pieza — iteración 2 (20%)..... 84
Figura 82 Geometría optimizada con reducción del 30% de masa. 85
Figura 83 Distribución de tensiones de Von Mises — iteración 3 (30%). 85
Figura 84 Masa pieza — iteración 2 (20%)..... 85
Figura 85 Geometría optimizada con reducción del 40% de masa. 86
Figura 86 Distribución de tensiones de Von Mises — iteración 4 (40%). 86
Figura 87 Masa pieza — iteración 4 (20%)..... 86
Figura 88 Geometría optimizada con reducción del 50% de masa. 87
Figura 89 Distribución de tensiones de Von Mises — iteración 5 (50%). 87
Figura 90 Masa pieza — iteración 5 (50%)..... 87
Figura 91 Geometría optimizada con reducción del 70% de masa. 88

Figura 92 Distribución de tensiones de Von Mises — iteración 7 (70%). 88
Figura 93 Masa pieza — iteración 6 (60%)..... 88
Figura 94 Geometría optimizada con reducción del 70% de masa. 89
Figura 95 Distribución de tensiones de Von Mises — iteración 7 (70%). 89
Figura 96 Masa pieza — iteración 7 (70%)..... 89
Figura 97 Geometría optimizada con reducción del 69% de masa. 90
Figura 98 Distribución de tensiones de Von Mises — iteración 8 (69%). 90
Figura 99 Masa pieza — iteración 8 (69%)..... 90
Figura 100 Geometría optimizada antes del refinamiento con PolyNURBS. 92
Figura 101 Geometría del racor tras el refinamiento con PolyNURBS (I) 93
Figura 102 Geometría del racor tras el refinamiento con PolyNURBS (II)..... 93
Figura 103 Geometría del racor tras el refinamiento con PolyNURBS (III) 94
Figura 104 Hoja de cálculo ICAI para el prototipo en PLA (FDM). 96
Figura 105 Hoja de cálculo ICAI para el prototipo en resina (SLA). 97
Figura 106 Hoja de cálculo ICAI para el prototipo en PA12 (MJF). 98
Figura 107 Impresión del prototipo en PLA en la Bambu X1C..... 100
Figura 108 Prototipo impreso en PLA antes del postprocesado..... 100
Figura 109 Prototipo impreso en PLA tras el postprocesado. 101
Figura 110 Presupuesto de Protolabs para el racor en AlSi10Mg por DMLS. 102

Índice de tablas

Tabla 1 Comparativa de materiales para cuadros de bicicleta. 24
Tabla 2 Geometría de referencia del cuadro de montaña de aluminio talla M. 40
Tabla 3 Dimensiones nominales de los tubos del cuadro de referencia. 40
Tabla 4 Geometría de los tetones de inserción del racor. 41
Tabla 5 Solicitaciones estáticas en la base de cada tetón del racor (sin factor dinámico). 44
Tabla 6 Cargas de diseño tras la ponderación dinámica (k = 2). 45
Tabla 7 Criterios de diseño: resistencia estática y a fatiga. 47
Tabla 8 Parámetros de la junta adhesiva tubo-racor. 49
Tabla 9 Propiedades mecánicas del AlSi10Mg procesado por DMLS. 49
Tabla 10 Especificaciones de diseño completas del racor de pedalier. 51
Tabla 11 Condiciones de contorno de la simulación FEM de la geometría base. 80
Tabla 12 Resultados de la simulación FEM de la geometría base vs. criterios de diseño. 81
Tabla 13 Parámetros de configuración del estudio de diseño generativo. 82
Tabla 14 Resumen de iteraciones del proceso de optimización topológica. 91
Tabla 15 Comparativa de tecnologías disponibles para el prototipo. 96
Tabla 16 Parámetros de laminado del prototipo en PLA obtenidos con Bambu Studio. 99
Tabla 17 Parámetros de fabricación del componente final en AlSi10Mg. 102
Tabla 18 Resumen de costes de fabricación del proyecto. 103

Capitulo 1 Introducción

1.1. Contexto: industria, sostenibilidad y fabricación aditiva

En las últimas décadas, la industria manufacturera ha experimentado una transformación impulsada por la necesidad de reducir el consumo de materias primas, minimizar los residuos generados en los procesos productivos y disminuir la huella de carbono asociada a la fabricación de productos. Durante décadas, el modelo predominante ha sido el denominado lineal: extraer, fabricar, usar y desechar. Este enfoque, aunque eficiente en términos de productividad a corto plazo, ha demostrado ser insostenible desde el punto de vista ambiental y económico, ya que depende de un suministro constante de materias primas y genera una gran cantidad de residuos difíciles de gestionar.

Los procesos de fabricación tradicionales más extendidos (mecanizado por arranque de viruta, fundición en molde, forja y estampación) tienen una serie de limitaciones estructurales que son cada vez más evidentes. En primer lugar, estos son procesos sustractivos lo que genera inevitablemente material residual: en operaciones de mecanizado de precisión, entre el 80% y el 95% del material de partida puede acabar siendo viruta o recorte. En segundo lugar, están optimizados para series largas y geometrías relativamente simples: una modificación del diseño implica la fabricación de nuevos moldes o herramientas, lo que puede tardar semanas en implementarse haciendo inviable la fabricación de series cortas personalizadas, son procesos muy poco flexibles. En tercer lugar, imponen restricciones geométricas al diseñador: por ejemplo, el mecanizado requiere acceso físico de la herramienta de corte a todas las superficies y la fundición exige ángulos de desmoldeo, espesores mínimos... Estas restricciones obligan sistemáticamente a alejarse del óptimo estructural, introduciendo material donde no es necesario o simplificando formas que, desde el punto de vista de la resistencia, podrían ser más eficientes.

Además de estas limitaciones debemos de tener en cuenta la presión externa creciente: los marcos regulatorios orientados a la descarbonización industrial, como el Pacto Verde Europeo, están imponiendo costes explícitos sobre las emisiones asociadas a los procesos industriales, lo que convierte la ineficiencia material en un lastre económico y medioambiental.

Es en este contexto donde la Industria 4.0 entra en escena para cambiar los procesos de producción ajustándose a los nuevos retos. El término Industria 4.0, hace referencia a la cuarta revolución industrial la cual se basa en la digitalización y la interconexión de los procesos productivos mediante tecnologías como el IoT y la inteligencia artificial, con el objetivo de lograr una producción más eficiente, flexible y automatizada. A diferencia de las revoluciones industriales anteriores (basadas en la mecanización, la electricidad y la automatización electrónica respectivamente), la Industria 4.0 no se basa únicamente en una nueva tecnología, sino por la combinación de varias de ellas aprovechando sus sinergias (el Internet de las Cosas, la computación en la nube, la robótica colaborativa y la inteligencia artificial).

En el ámbito del diseño y la fabricación, herramientas como el diseño generativo, la optimización topológica y la fabricación aditiva, permiten superar las limitaciones geométricas, materiales, medioambientales y de flexibilidad productiva de los procesos convencionales. La industria manufacturera se encuentra en un punto de inflexión: los procesos tradicionales siguen siendo dominantes en producción en serie, pero las nuevas tecnologías van ganando terreno en aquellos contextos donde la personalización, la eficiencia de material o la complejidad geométrica son factores determinantes.

1.2. Motivación del proyecto

Este trabajo nace a raíz de dos de las grandes tendencias de la ingeniería actual: la fabricación sostenible y la aplicación de herramientas digitales para el diseño de componentes mecánicos. El objetivo del proyecto es mostrar que es posible fabricar componentes de uso final de alta exigencia estructural (como las uniones de un cuadro de bicicleta), manteniendo plenas garantías de seguridad y rendimiento mecánico empleando las nuevas tecnologías emergentes.

Para este proyecto, se ha escogido la unión del pedalier por ser la unión más solicitada del cuadro. En ella confluyen cuatro elementos estructurales: el tubo del sillín, que transmite el peso del ciclista; el down tube o tubo diagonal, que conecta con la dirección y absorbe las cargas de pedaleo; y las dos vainas inferiores, que conectan el pedalier con el eje de la rueda trasera y transmiten el esfuerzo de tracción durante la propulsión.

Desde una perspectiva personal, este proyecto permite integrar y aplicar de forma práctica los conocimientos adquiridos a lo largo del Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales en áreas como la resistencia de materiales, el diseño industrial o las tecnologías de fabricación. Por otro lado, aplicar de igual manera herramientas como el diseño generativo o la fabricación aditiva que tienen un peso cada vez más importante en la industria.

1.3. Objetivos del proyecto

El objetivo principal de este Trabajo de Fin de Grado es el siguiente:

Diseñar, optimizar y fabricar mediante impresión 3D un racor de pedalier para un cuadro de bicicleta construido con tubos reciclados empleando herramientas de diseño generativo y simulación por elementos finitos de forma que el componente final cumpla los requisitos estructurales exigidos garantizando la máxima eficiencia durante el proceso de fabricación.

Para alcanzar este objetivo principal, se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Realizar un estado del arte completo sobre racores de bicicleta, diseño generativo y fabricación aditiva.
- Definir el problema de ingeniería: caracterización geométrica de los tubos reciclados, determinación del estado de cargas que actúan sobre la unión y establecimiento de las especificaciones de diseño del racor.
- Modelar la geometría base de la unión en un software de diseño, validar su comportamiento estructural mediante simulación por elementos finitos (FEM).
- Aplicar diseño generativo para optimizar la distribución del material.
- Refinar la geometría optimizada para hacerla fabricable mediante impresión 3D y fabricar un prototipo del racor.
- Evaluar los resultados obtenidos en términos de reducción de masa y resistencia estructural.
- Contribuir al desarrollo de prácticas sostenibles en ingeniería, alineándose con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)

1.4. Alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) constituyen el marco de referencia global adoptado por las Naciones Unidas en la Agenda 2030, compuesto por 17 objetivos destinados a erradicar la pobreza, proteger el planeta y garantizar la prosperidad para todas las personas. La ingeniería, como disciplina con capacidad de transformar el mundo físico, tiene una responsabilidad directa en la consecución de varios de estos objetivos. El presente proyecto se alinea de manera directa con los siguientes ODS [1]:



ODS 9 — Industria, innovación e infraestructura: La aplicación del diseño generativo y la fabricación aditiva representa una contribución directa al fomento de la innovación tecnológica. Estas metodologías permiten desarrollar infraestructuras industriales más eficientes transformando los procesos de fabricación tradicionales hacia modelos más sostenibles.



ODS 11 — Ciudades y comunidades sostenibles: La promoción de la bicicleta como medio de transporte urbano sostenible, y especialmente el desarrollo de cuadros fabricados con material reciclado, contribuye a la creación de sistemas de movilidad urbana más limpios, accesibles y eficientes.



ODS 12 — Producción y consumo responsables: El uso de tubos metálicos reciclados como material base presenta frente a la producción de tubería nueva un impacto medioambiental mucho más pequeño durante el proceso productivo. La fabricación aditiva, por su parte, reduce el desperdicio de material respecto a los procesos sustractivos convencionales.



ODS 13 — Acción por el clima: El uso de material reciclado reduce las emisiones asociadas a la producción de materia prima; la fabricación aditiva elimina los procesos de mecanizado intensivos en energía; y el fomento de la bicicleta contribuye a reducir las emisiones de CO_2.

1.5. Estructura de la memoria

La memoria se organiza en seis capítulos que muestran, todo el desarrollo del proyecto desde su contextualización hasta sus conclusiones

Este documento se estructura en seis capítulos: el Capítulo 1 contextualiza el proyecto en el marco de la Industria 4.0 y la economía circular, define sus objetivos y justifica su alineación con los ODS. El Capítulo 2 desarrolla el Estado del Arte, revisando el conocimiento existente sobre racores de bicicleta, diseño generativo, optimización topológica y fabricación aditiva. El Capítulo 3 define el problema: caracterización de los tubos reciclados y el nudo del pedalier, análisis de cargas y especificaciones de diseño. El Capítulo 4, recoge el modelado CAD, la simulación FEM, iteraciones de diseño generativo, refinamiento geométrico y fabricación del prototipo. El Capítulo 5 presenta y analiza los resultados obtenidos. Finalmente, el Capítulo 6 recoge las conclusiones y propone líneas futuras de investigación, tras lo cual se incluyen la bibliografía y los anexos correspondientes.

Capitulo 2 Estado del arte

Este capítulo repasa los conocimientos sobre las áreas relacionadas con el proyecto. En primer lugar la bicicleta y, en particular, la unión del pedalier; sigue con los materiales, la sostenibilidad y las herramientas de diseño y fabricación; y finaliza con una explicación de las decisiones técnicas adoptadas.

2.1 La bicicleta como sistema estructural

2.1.1 Breve historia de la bicicleta y evolución del cuadro

La bicicleta es el resultado de más de dos siglos de evolución técnica e industrial. Sus orígenes se remontan al siglo XIX, cuando se presentó la denominada Laufmaschine, un artefacto de madera sin pedales impulsado con los pies que incorporaba el principio del equilibrio sobre dos ruedas alineadas. Esta máquina sentó las bases conceptuales del vehículo que vendría después.



Figura 1 Laufmaschine

La incorporación de los pedales en la rueda delantera, en torno a 1860, dio lugar al velocípedo, cuyo cuadro seguía siendo de hierro forjado con formas complejas y artesanales.



Figura 2 Velocípedo

La irrupción del biciclo en los años 1870 (rueda delantera de gran diámetro) representó el primer intento de optimizar la transmisión de la fuerza del pedaleo a la propulsión a costa de una inestabilidad evidente.



Figura 3 Biciclo (Penny Farthing)

La aparición de la bicicleta moderna (safety bicycle en inglés) a finales de la década de 1880 consolidó la geometría de cuadro de diamante con ruedas de igual tamaño y cadena de transmisión, configuración que se mantiene hasta la actualidad [2].



Figura 4 Safety bicycle

A lo largo del siglo XX, la industria de la bicicleta trató de hacer los cuadros más ligeros sin perder resistencia [3]. Inicialmente se optó las aleaciones de acero al cromo-molibdeno que permitieron adelgazar los tubos manteniendo la robustez, después se pasó al aluminio que aportó una densidad tres veces inferior, luego al titanio que combinó ligereza con durabilidad y finalmente a la fibra de carbono rompió con la lógica del tubo metálico, permitiendo moldear el cuadro entero en una sola pieza.

En la actualidad, los cuadros de carbono dominan el segmento de competición y alta gama, mientras que el aluminio ocupa el segmento medio (mayor volumen de ventas) [4].

2.1.2 Tipos de marcos: geometrías y usos

La diversidad de usos de la bicicleta ha dado lugar a una amplia variedad de geometrías de cuadro, cada una optimizada para las condiciones de uso previstas. Las principales tipologías son las siguientes:

– Cuadro de diamante: es la geometría clásica, compuesta por dos triángulos estructurales que comparten el tubo del sillín como elemento común. Es la geometría de cuadro más extendida ya que ofrece el mejor equilibrio entre rigidez, ligereza y facilidad de fabricación.



Figura 5 Cuadro de diamante

– Cuadro de paso bajo o mixto: es una variante del diamante en la que dos tubos de menor diámetro bajan desde la cabeza de dirección hasta el eje del pedalier, facilitando el subirse o bajarse de ella.



Figura 6 Cuadro paso bajo

– Cuadro de montaña (full suspension): incorpora un sistema de suspensión trasera articulada que añade complejidad geométrica y puntos de pivote al cuadro. Diseñado específicamente para absorber impactos en terrenos irregulares.



Figura 7 Cuadro de montaña

– Cuadro de triatlón o contrarreloj (TT): geometría incómoda para el usuario con el tubo del sillín casi vertical que permite colocar al ciclista en una posición aerodinámica.



Figura 8 Cuadro TT

Hoy en día existen muchos tipos de cuadros de bicicleta, adaptados a distintos usos y necesidades. Sin embargo, el cuadro de diamante sigue siendo el más utilizado y la base estructural de la mayoría de estas variantes.

2.1.3 El cuadro de diamante: justificación de la elección

El cuadro de diamante es la geometría escogida para el proyecto por varias razones: es la geometría más extendida en el mercado, lo que garantiza la disponibilidad de tubos

reciclados con las dimensiones estándar que la definen. Además su comportamiento estructural está ampliamente documentado en la literatura técnica y en la normativa aplicable, lo que facilita la definición de las condiciones de carga para el análisis FEM.

Desde el punto de vista estructural, el cuadro de diamante funciona como una celosía en la que los tubos trabajan a tracción y compresión, con flexión secundaria en los nudos de unión. Esta forma de repartir los esfuerzos resulta especialmente adecuada para los materiales metálicos, ya que sus propiedades mecánicas se aprovechan mejor cuando trabajan a tracción o compresión que cuando lo hacen a flexión. Por ello, la geometría de diamante no solo es la más extendida, sino también una de las más eficientes para cuadros.

2.1.4 Tubos que componen el cuadro de diamante

El cuadro de diamante está compuesto por los siguientes tubos principales

- Tubo de dirección (head tube): tubo corto de gran diámetro que aloja la horquilla delantera y el juego de dirección. Es el punto de conexión con el sistema de dirección de la bicicleta.
- Tubo superior (top tube): conecta el tubo de dirección con el tubo del sillín en su parte superior, formando el lado superior del triángulo delantero.
- Tubo diagonal o down tube: el tubo más largo y de mayor sección del cuadro, conecta el tubo de dirección con el eje del pedalier. Es el elemento más solicitado estructuralmente, pues soporta la mayor parte de las cargas de flexión del cuadro.
- Tubo del sillín (seat tube): conecta el eje del pedalier con el vértice superior trasero del triángulo delantero, donde se unen el top tube y los tirantes. Aloja la tija del sillín.
- Vainas inferiores (chainstays): dos tubos de pequeño diámetro que conectan el eje del pedalier con el eje de la rueda trasera, formando la base del triángulo trasero.
- Tirantes o vainas superiores (seatstays): dos tubos de pequeño diámetro que conectan el vértice superior del triángulo trasero con el eje de la rueda trasera, cerrando el triángulo trasero.

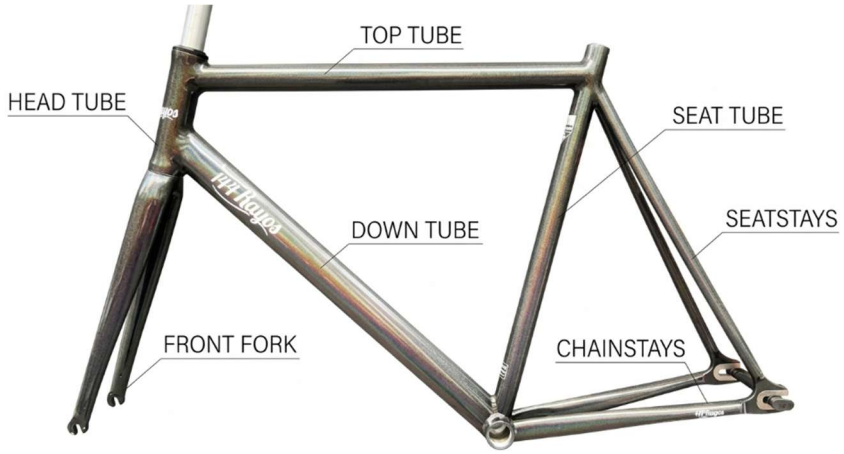


Figura 9 Tubos principales del cuadro Diamante

Los diámetros y espesores de estos tubos están estandarizados por la industria, aunque pueden variar según el fabricante. Como referencia, el tubo diagonal suele tener un diámetro exterior de entre 38 y 44 mm y un espesor de 1,0 a 1,5 mm, mientras que las vainas inferiores presentan diámetros de entre 22 y 28 mm con espesores similares. Esta cierta estandarización permite utilizar tubos reciclados como material de partida [5].

2.1.5 La unión del pedalier: función y exigencias mecánicas

La unión del pedalier es el nudo estructural más complejo y solicitado del cuadro de diamante. En él convergen cuatro tubos: el down tube, el tubo del sillín y las dos vainas inferiores, articulados en torno al eje del pedalier. En la unión convergen esfuerzos de torsión generados por el pedaleo, compresión y tracción transmitidos por los tubos, momentos de flexión debidos al peso y a las irregularidades del terreno, y cargas laterales producidas por el balanceo del ciclista. A esto se añade su carácter cíclico: todos estos esfuerzos se repiten con cada pedalada, lo que convierte la resistencia a fatiga en uno de los criterios de diseño más determinantes del componente.



Figura 10 Unión del pedalier

El diseño de la unión del pedalier debe garantizar la resistencia bajo las cargas máximas de diseño, la resistencia a fatiga bajo las cargas cíclicas de uso normal y la rigidez suficiente para evitar deformaciones.

2.2 Materiales del cuadro

La elección del material del cuadro de una bicicleta es una de las decisiones de diseño más determinantes, con implicaciones directas sobre el peso, la resistencia, el confort, la durabilidad, el coste y la huella ambiental del producto. A continuación se revisan los cuatro materiales principales empleados en la fabricación de cuadros de bicicleta.

2.2.1 Acero

El acero fue el material dominante durante más de un siglo gracias a su alta resistencia, buen comportamiento a fatiga, facilidad de soldadura y bajo coste [6]. Las aleaciones CrMo siguen siendo una opción válida hoy en día, pero su principal limitación es la densidad, que penaliza el peso del cuadro respecto a materiales más modernos.

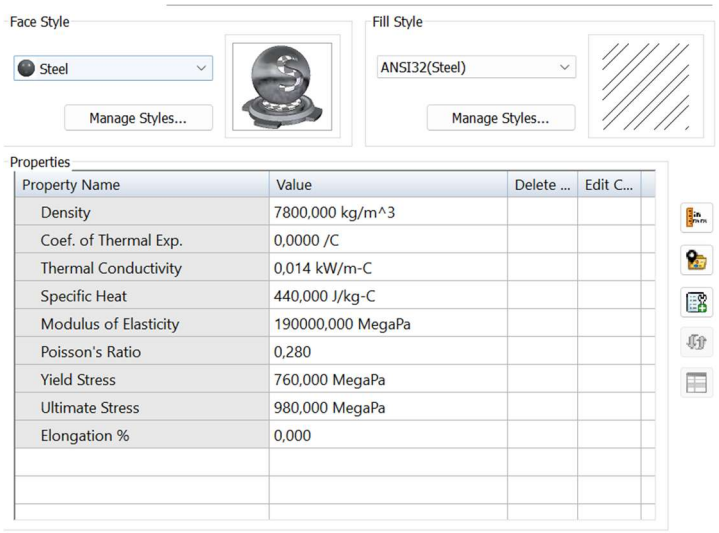


Figura 11 Propiedades de la aleación acero CrMo

2.2.2 Aluminio

El aluminio es la alternativa ligera al acero. Con una densidad 3 veces inferior a la del acero permite construir cuadros significativamente más ligeros. La aleación 6061-T6 es la más extendida en el sector, con un buen equilibrio entre propiedades mecánicas, facilidad de soldadura y coste [7] [8]. Es hoy el material dominante en el segmento de precio medio, que representa el mayor volumen de ventas del mercado [5].

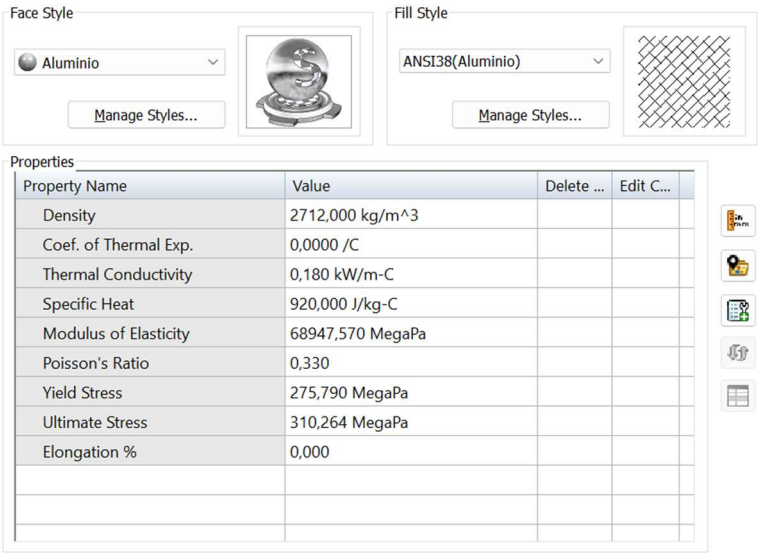


Figura 12 Propiedades del Aluminio 6061-T6

2.2.3 *Titanio*

El titanio combina baja densidad y alta resistencia, pero su presencia en el mercado es reducida [9]. Esto lo descarta como fuente de tubos reciclados en cantidad suficiente para un proyecto como el presente.

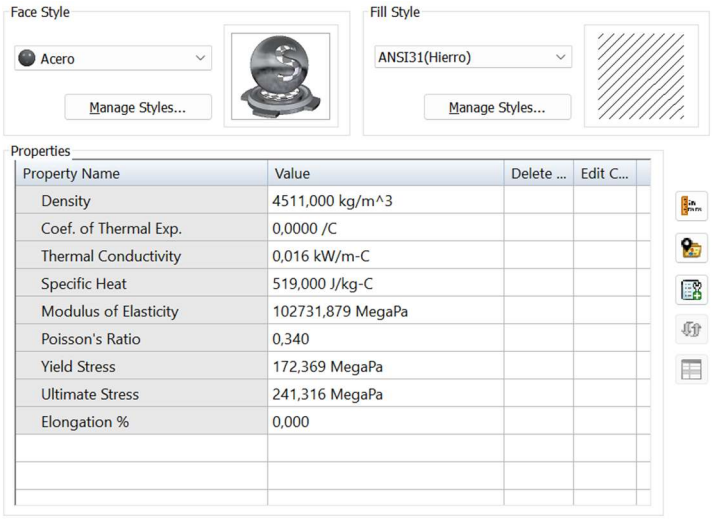
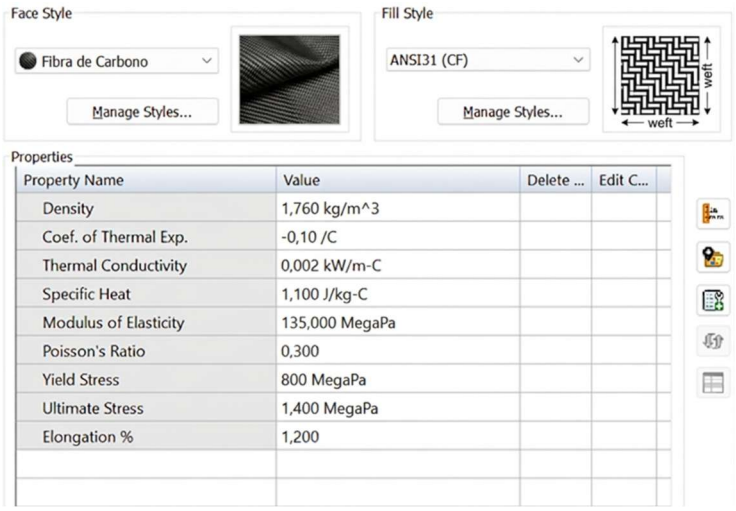


Figura 13 Propiedades del Titanio

2.2.4 Fibra de carbono

Ofrece la mejor relación rigidez-peso, pero queda descartada debido a que los cuadros de carbono son prácticamente irreciclables: separar la fibra de la matriz de resina epoxi con la que está impregnada requiere procesos de alta temperatura que degradan irreversiblemente las propiedades mecánicas de la fibra, haciendo inviable su reutilización estructural [10].



Property Name	Value	Delete ...	Edit C...
Density	1,760 kg/m^3		
Coef. of Thermal Exp.	-0,10 /C		
Thermal Conductivity	0,002 kW/m-C		
Specific Heat	1,100 J/kg-C		
Modulus of Elasticity	135,000 MegaPa		
Poisson's Ratio	0,300		
Yield Stress	800 MegaPa		
Ultimate Stress	1,400 MegaPa		
Elongation %	1,200		

Figura 14 Propiedades de la fibra de carbono

2.2.5 Comparativa y justificación de la elección del aluminio reciclado

La Tabla 1 resume las principales propiedades mecánicas y ambientales de los cuatro materiales revisados, facilitando la comparación objetiva entre ellos.

Material	ρ (g/cm³)	σy (MPa)	E (GPa)	Fatiga	Reciclabilidad
Acero CrMo	7,85	900–1200	210	Alta	Baja
Aluminio 6061	2,70	276–310	69	Media	Muy alta
Titanio Ti-3Al	4,51	620–800	105	Muy alta	Muy alta
Fibra carbono	1,55	600–700	70	Muy alta	Muy baja

Tabla 1 Comparativa de materiales para cuadros de bicicleta.

La elección del aluminio reciclado como material base de los tubos para este proyecto se debe a tres razones principales. En primer lugar, el aluminio es el material metálico más usado en la fabricación de cuadros de bicicleta. En segundo lugar, sus propiedades mecánicas cumplen con los requerimientos: la aleación 6061-T6 ofrece un límite elástico de 276 MPa que es suficiente para soportar las cargas de uso normal con el factor de seguridad requerido. Por último, el aluminio es el material más adecuado para la reutilización directa de tubos: siempre que un cuadro no haya sufrido golpes ni corrosión, sus tubos conservan íntegramente sus propiedades mecánicas originales y pueden reutilizarse sin necesidad de ningún proceso intermedio de transformación [16].

2.3 Sostenibilidad y huella ecológica

2.3.1 Contexto general: economía circular en la industria

La economía circular es un modelo económico y productivo sostenible que busca cambiar el modelo de «extraer, fabricar, usar, desechar» por un modelo en el que los materiales y los productos mantienen su valor en la economía durante el mayor tiempo posible. Este concepto, se apoya en tres principios fundamentales: diseñar para reducir residuos y contaminación, mantener los productos y materiales en uso, y regenerar los sistemas naturales [11].

En el ámbito industrial, esta transición está siendo impulsada por la presión regulatoria europea (Pacto Verde Europeo o el mecanismo CBAM), la creciente conciencia medioambiental de los consumidores o la propia lógica económica de no depender de materias primas cuyo precio y disponibilidad son cada vez más inciertos [12].

Dentro de la economía circular, reutilizar directamente un componente siempre es preferible a reciclarlo. Reciclar un tubo de aluminio implica fundirlo y volver a procesarlo, lo que consume energía. Reutilizarlo tal cual conserva no solo el material, sino también todo ese proceso previo de laminado, estirado y tratamiento térmico que ya lleva incorporado [13].



Figura 15 Esquema Economía circular

2.3.2 El aluminio reciclado como apuesta sostenible

El aluminio es el material más empleado en la fabricación de bicicletas[14] [15]. Esto tiene una consecuencia directa: cada año millones de cuadros de bicicletas son desechados, muchos de ellos con daños localizados (una abolladura, una rotura en la zona de soldadura) que los inutilizan como cuadros completos pero dejan intactos la mayoría de sus tubos. Reutilizar esos tubos para nuevos cuadros evita que acaben en el horno de reciclaje (ahorrando la energía que costó darles forma) y los convierte en materia prima a coste prácticamente nulo.

No todos los tubos serán reutilizables, ya que aquellos que hayan sufrido deformación plástica o corrosión no podrán ser empleados para un nuevo cuadro debido a que habrán perdido sus propiedades. Sin embargo, dado el volumen de cuadros disponibles, la selección de tubos en buen estado estructural no representa un problema de disponibilidad sino simplemente de criterio de inspección que deberán pasar para descartar aquellos que no cumplan con los requisitos.



Figura 16 Cuadro de bicicleta para reciclar alguno de sus tubos

2.3.3 Criterios de selección e inspección de tubos reciclados

Para que un tubo reciclado pueda utilizarse como elemento estructural, debe cumplir unas condiciones básicas: ausencia de deformación plástica, que no haya corrosión, y dimensiones compatibles.

Para verificar estas condiciones, los tubos se someten a un proceso de inspección el cual empieza por una inspección visual, con la que se descartan de forma inmediata aquellos tubos que presenten abolladuras, fisuras, o corrosión. Posteriormente se realizan mediciones para verificar que el tubo no ha perdido su sección circular y que su diámetro exterior y espesor se encuentran dentro de los márgenes necesarios para el ensamblaje en la unión. Finalmente, el tubo se somete a un ensayo de dureza para confirmar que los tubos conservan sus propiedades mecánicas.

Se consideran aptos únicamente los tubos que superen la inspección. Esta selección garantiza que los tubos reciclados seleccionados tengan propiedades equivalentes a las del aluminio 6061-T6.

2.4 Optimización topológica y diseño generativo

2.4.1 Concepto e historia

La optimización topológica es una metodología que, dado un espacio disponible y unas cargas aplicadas, determina automáticamente cómo distribuir el material de forma óptima dentro de ese espacio. A diferencia del diseño convencional donde el ingeniero dibuja la pieza y luego comprueba si aguanta, aquí es el algoritmo el que decide dónde poner y dónde quitar material, llegando a proponer geometrías complejas y poco intuitivas que aprovechan al máximo el material disponible. El resultado es siempre una geometría que cumple los requisitos estructurales con la menor cantidad de material posible [17].

Sus bases matemáticas se remontan a principios del siglo XX, pero no fue hasta los años ochenta cuando se desarrollaron los primeros métodos computacionales que la hicieron práctica [18]. El algoritmo funciona apoyándose en el Método de los Elementos Finitos (FEM): en cada iteración simula el comportamiento estructural de la pieza, identifica las zonas con menor aporte estructural y elimina progresivamente el material sobrante hasta converger en una solución óptima [19].



Figura 17 Optimización topológica y diseño generativo

2.4.2 Método de cálculo y software utilizado

El proceso de optimización topológica se apoya en el Método de Elementos Finitos (FEM). En cada iteración, el FEM divide la geometría en miles de pequeños elementos y calcula el estado tensional de cada uno bajo las cargas aplicadas. El algoritmo elimina los elementos menos solicitados y repite el análisis hasta que la geometría converge hasta una solución óptima. Este ciclo de simulación y eliminación es el que da lugar a las formas orgánicas características de la optimización topológica.

Para este proyecto se ha empleado Solid Edge 2025 como entorno de trabajo [40], por disponer de un módulo de optimización topológica integrado con el entorno CAD que permite realizar todo desde el modelado de la geometría base hasta la obtención de la geometría optimizada. El refinamiento geométrico se realizará posteriormente en Altair Inspire, mediante su herramienta PolyNURBS, que transforma la geometría facetada resultado del algoritmo en superficies continuas aptas para la fabricación aditiva [41].

2.4.3 Ventajas frente a los métodos de diseño convencionales

La principal ventaja de la optimización topológica frente al diseño convencional es la reducción de masa, ya que permite obtener componentes con la misma resistencia utilizando únicamente el material estrictamente necesario [20]. Esto repercute directamente en una

menor cantidad de material empleado, reduciendo tanto el coste de fabricación como la huella ecológica del componente.



Figura 18 Proceso de torneado (desperdicio de materia prima)

Otra ventaja fundamental es que no parte de una geometría predeterminada. El diseño se genera a partir de las condiciones de carga y las restricciones definidas, lo que permite crear geometrías que se pasarían por alto en un proceso de diseño convencional

Por último, en cada iteración se puede ver la respuesta estructural de la pieza, lo que permite observar cómo evoluciona su comportamiento y detectar posibles problemas desde las primeras fases. Esta integración entre diseño y análisis reduce la necesidad de revisiones posteriores y acorta el tiempo de desarrollo del producto.

2.5 Fabricación aditiva

2.5.1 Concepto e historia

La fabricación aditiva, popularmente conocida como impresión 3D, es una tecnología que permite fabricar piezas tridimensionales añadiendo material capa a capa a partir de un modelo digital. A diferencia de los procesos convencionales (donde se parte de un bloque y se elimina lo que sobra), aquí solo se deposita material donde es necesario, lo que elimina prácticamente el desperdicio y permite fabricar geometrías de alta complejidad sin restricciones de acceso de herramienta ni necesidad de moldes.

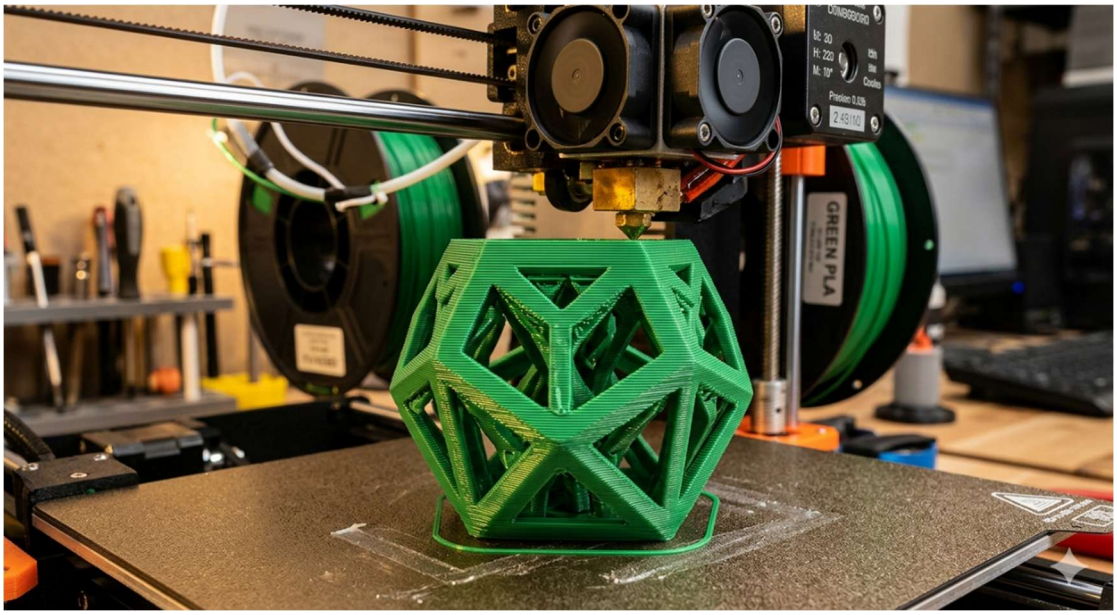


Figura 19 Fabricación aditiva (capa a capa)

Estas dos características (libertad geométrica y mínimo desperdicio) son las que la hacen que se pueda combinar con la optimización topológica. Las geometrías orgánicas y complejas que produce el algoritmo de optimización son, en la mayoría de los casos, imposibles de obtener por mecanizado o fundición. La fabricación aditiva las puede materializar ya que el proceso es indiferente a la forma de la pieza.

Nacida en los años ochenta como herramienta de prototipado rápido, la fabricación aditiva ha evolucionado hasta convertirse en una tecnología de producción de piezas de uso final en sectores tan exigentes como la aeronáutica, la medicina o el transporte [22] [26].



Figura 20 Pieza con geometría orgánica impresa con fabricación aditiva

2.5.2 Tecnologías disponibles: FDM, SLA, SLS, MJF, DMLS

FDM (Fused Deposition Modeling): deposita capas de filamento termoplástico fundido. Es la tecnología más accesible y económica, ideal para prototipos de verificación rápida, aunque con precisión y propiedades mecánicas limitadas.

SLA (Stereolithography): cura resina fotosensible con luz ultravioleta [21]. Ofrece alta precisión y buen acabado superficial, pero las piezas resultantes son frágiles y poco adecuadas para uso estructural.

SLS (Selective Laser Sintering): sinteriza polvo de polímero con láser. No requiere soportes, permite geometrías complejas y ofrece buenas propiedades mecánicas. Es la tecnología de referencia para piezas poliméricas funcionales.

MJF (Multi Jet Fusion): similar al SLS en resultados pero con mayor velocidad de producción y mejor acabado superficial. Adecuada para series cortas de piezas funcionales.

DMLS/SLM: fusionan polvo metálico con láser de alta potencia, obteniendo piezas con propiedades mecánicas comparables a las de fundición o forja [22]. Es la tecnología prevista para el componente de uso final del presente proyecto.

2.5.3 Materiales fabricación aditiva

Los materiales disponibles para fabricación aditiva abarcan tres grandes familias:

Los **polímeros** son los más extendidos, desde materiales de uso general como el PLA hasta polímeros técnicos como la poliamida PA12, ampliamente utilizada en piezas funcionales por su buena resistencia mecánica y química.

Los **metales** (aluminio, titanio, acero inoxidable) permiten fabricar piezas de responsabilidad estructural con propiedades mecánicas comparables a las obtenidas por fundición o forja. Son la opción de referencia cuando el componente debe soportar cargas reales.

Las **cerámicas** se emplean en aplicaciones más específicas que requieren alta resistencia térmica, dureza extrema o biocompatibilidad, como implantes médicos o componentes expuestos a altas temperaturas.

Debido a la naturaleza del trabajo, la familia metálica es la más adecuada, ya que el racor es una pieza estructural sometida a cargas reales que los polímeros no pueden soportar. Dentro de los metales procesables por fabricación aditiva existe una aleación de aluminio (el AlSi10Mg) cuyas propiedades mecánicas son equivalentes a las del aluminio 6061 de los tubos reciclados [23] [25].

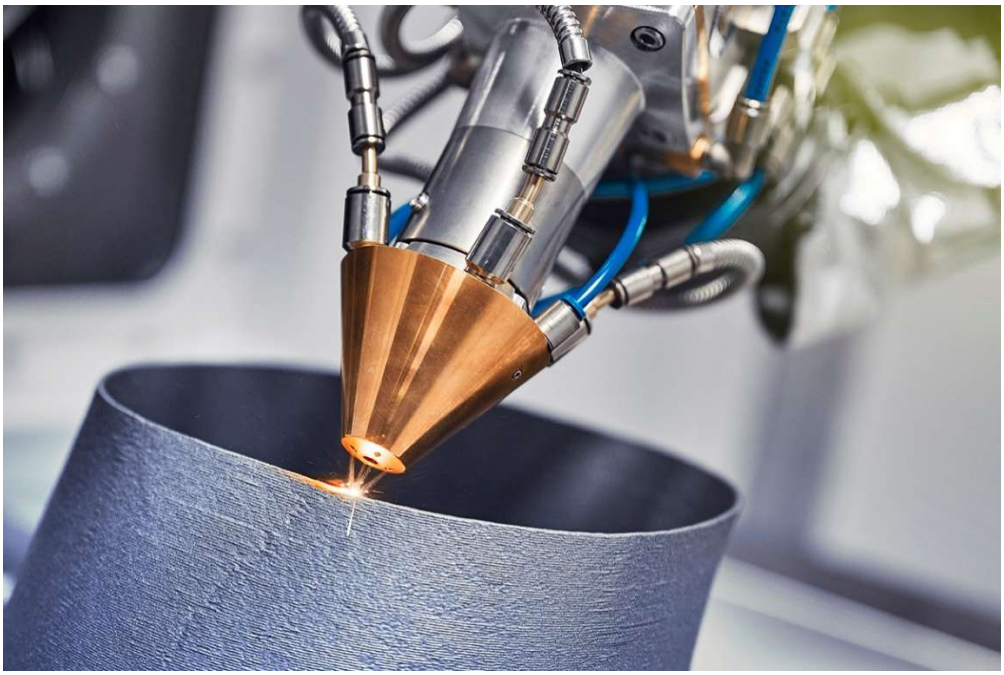


Figura 21 Fabricación aditiva metálica

2.5.4 Ventajas frente a los métodos de fabricación convencionales

Las ventajas de la fabricación aditiva respecto a los procesos convencionales son especialmente relevantes en el contexto de este proyecto. Al no requerir moldes ni herramientas de corte específicas, la fabricación aditiva elimina el coste fijo de puesta en marcha que hace inviable económicamente la producción de piezas únicas o series muy cortas en procesos convencionales. Esto es fundamental para un proyecto en el que cada racor debe adaptarse a las dimensiones específicas de los tubos reciclados disponibles, que pueden variar de un cuadro reciclado a otro.

La segunda ventaja es la libertad geométrica: a diferencia del mecanizado o la fundición, el proceso de impresión es indiferente a la complejidad de la forma, por lo que fabricar una geometría orgánica resultado de la optimización topológica no supone ningún coste adicional respecto a fabricar una pieza simple. Por último, el desperdicio de material es mínimo: en fabricación aditiva el material sobrante, correspondiente únicamente a las estructuras de soporte, representa menos del 10% del peso de la pieza, frente al 80–95% que puede llegar a perderse en mecanizado de precisión [24].

2.6 Sinergia entre diseño generativo y fabricación aditiva

2.6.1 Por qué se complementan: lo que una no puede sin la otra

El diseño generativo y la fabricación aditiva son tecnologías complementarias: una resuelve la limitación fundamental de la otra. El diseño generativo produce geometrías de máxima eficiencia estructural, pero esas geometrías son imposibles de fabricar por procesos convencionales: sus superficies orgánicas, sus secciones variables continuas, sus canales internos y sus estructuras ramificadas no pueden obtenerse por mecanizado, fundición ni estampación. La fabricación aditiva ofrece libertad geométrica total, pero esa libertad solo cobra sentido cuando se combina con una metodología que la aproveche. Sin la optimización topológica, se corre el riesgo de imprimir formas que simplemente replican lo que se haría por mecanizado o fundición, desaprovechando por completo las capacidades del proceso. Es la optimización topológica la que genera las geometrías orgánicas y complejas que los procesos convencionales no pueden fabricar, y la fabricación aditiva la que las materializa.

La combinación de ambas tecnologías es lo que hace posible obtener piezas que serían imposibles por separado: la optimización topológica encuentra la geometría estructuralmente óptima sin preocuparse de si es fabricable por métodos convencionales, y la fabricación aditiva la produce tal cual, sin restricciones de molde ni herramienta. El resultado son componentes más ligeros, más resistentes y con menos material del que hubiera requerido cualquier diseño convencional.

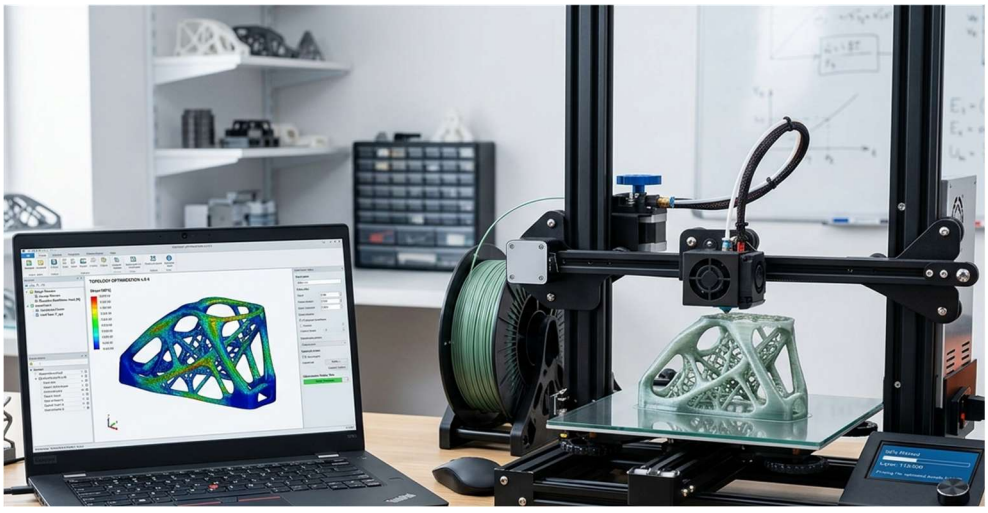


Figura 22 Sinergia entre la optimización topológica y la fabricación aditiva

2.6.2 *Aplicaciones reales en ingeniería y en el sector de la bicicleta*

En el diseño de bicicletas, el peso es una de las variables más importantes a optimizar, pero reducirlo no puede hacerse a costa de la resistencia estructural: la normativa ISO 4210 establece los ensayos de fatiga e impacto que cualquier componente del cuadro debe superar. La combinación de optimización topológica y fabricación aditiva permite abordar ambos objetivos a la vez: la primera elimina material donde no es estructuralmente necesario, y la segunda materializa la geometría resultante sin las restricciones que impondría cualquier proceso convencional [27] [28] [29] [30] [31].

Un ejemplo que ilustra bien esta sinergia es el proyecto Rockrider BABEL, desarrollado por Mathieu Petot en colaboración con Decathlon [32], en el que se rediseñaron los nudos del cuadro de una bicicleta de montaña aplicando optimización topológica. Las geometrías obtenidas, más ligeras y adaptadas a las cargas reales de uso, solo eran fabricables mediante impresión 3D: sin la fabricación aditiva, el resultado del algoritmo habría sido inaplicable. El proyecto demuestra que es precisamente la combinación de ambas tecnologías la que hace viable este tipo de soluciones.

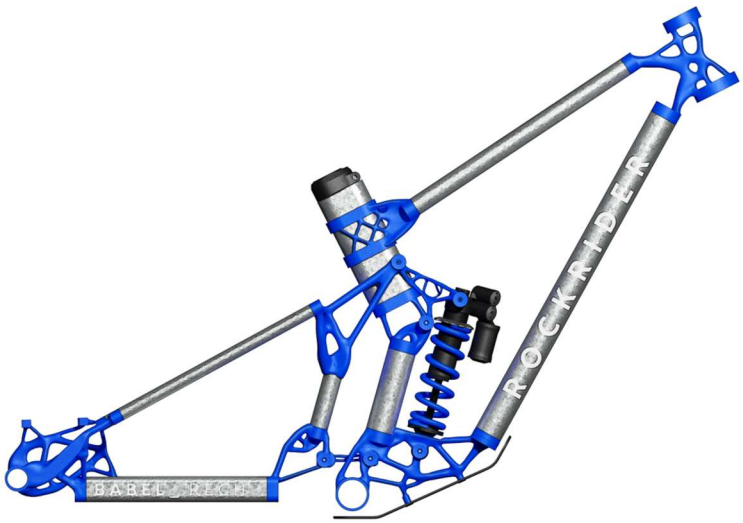


Figura 23 Cuadro de bicicleta desarrollado por Mathieu Petot

La unión del pedalier del presente proyecto responde a la misma lógica: es el nudo más solicitado del cuadro, concentra la mayor variedad de esfuerzos simultáneos y, con el diseño

convencional, acumula inevitablemente material en zonas poco solicitadas. La optimización topológica encuentra la distribución óptima del material, y la fabricación aditiva la convierte en una pieza real.

2.6.3 Aplicación a la unión del pedalier con tubos reciclados de aluminio

La unión del pedalier con tubos reciclados de aluminio representa un caso de aplicación ideal para la combinación del diseño generativo con la fabricación aditiva. Desde el punto de vista geométrico, cuatro tubos de diferentes diámetros convergen en ángulos variables que dependen de la geometría del cuadro. Los diámetros de los tubos empleados pueden variar de un cuadro a otro por lo que la optimización topológica es una herramienta ideal ya que se puede cambiar el diseño de la unión rápidamente generando una nueva solución para el caso dado.

El resultado es un componente personalizado, estructuralmente óptimo y fabricado con material de bajo impacto ambiental. La eficiencia estructural, personalización y sostenibilidad hacen que la optimización topológica y la fabricación aditiva sean las herramientas principales para desarrollar este proyecto

2.7 Selección justificada de materiales y tecnología

Las secciones anteriores han proporcionado el contexto técnico y científico necesario para fundamentar las decisiones de diseño del presente proyecto. Este apartado formaliza dichas decisiones y establece el flujo de trabajo que guiará el desarrollo técnico descrito en los capítulos siguientes.

El cuadro de referencia será el de diamante, por ser la geometría más extendida en el mercado, lo que garantiza tanto la disponibilidad de tubos reciclados con dimensiones estándar como un comportamiento estructural ampliamente documentado. Los tubos serán de aluminio 6061 reciclado: es el material más empleado en la fabricación de bicicletas, sus propiedades mecánicas son adecuadas para la aplicación y puede incorporarse directamente al proyecto sin necesidad de ningún proceso de transformación previo, lo que lo convierte en la opción más alineada con el enfoque sostenible del proyecto.

La unión del pedalier se diseñará mediante optimización topológica y se fabricará por DMLS. Esta combinación permite obtener un componente estructuralmente óptimo con total libertad geométrica, algo imposible de conseguir con cualquier proceso de fabricación convencional. El material de impresión será AlSi10Mg, aleación de aluminio desarrollada específicamente para fabricación aditiva metálica, compatible mecánica y electroquímicamente con los tubos de aluminio 6061 y con la menor densidad entre los metales procesables por DMLS.

Estas decisiones (cuadro de diamante, tubos reciclados de aluminio, optimización topológica y fabricación por DMLS) definen el enfoque del proyecto y serán el punto de partida del desarrollo técnico que se describe en los capítulos siguientes.

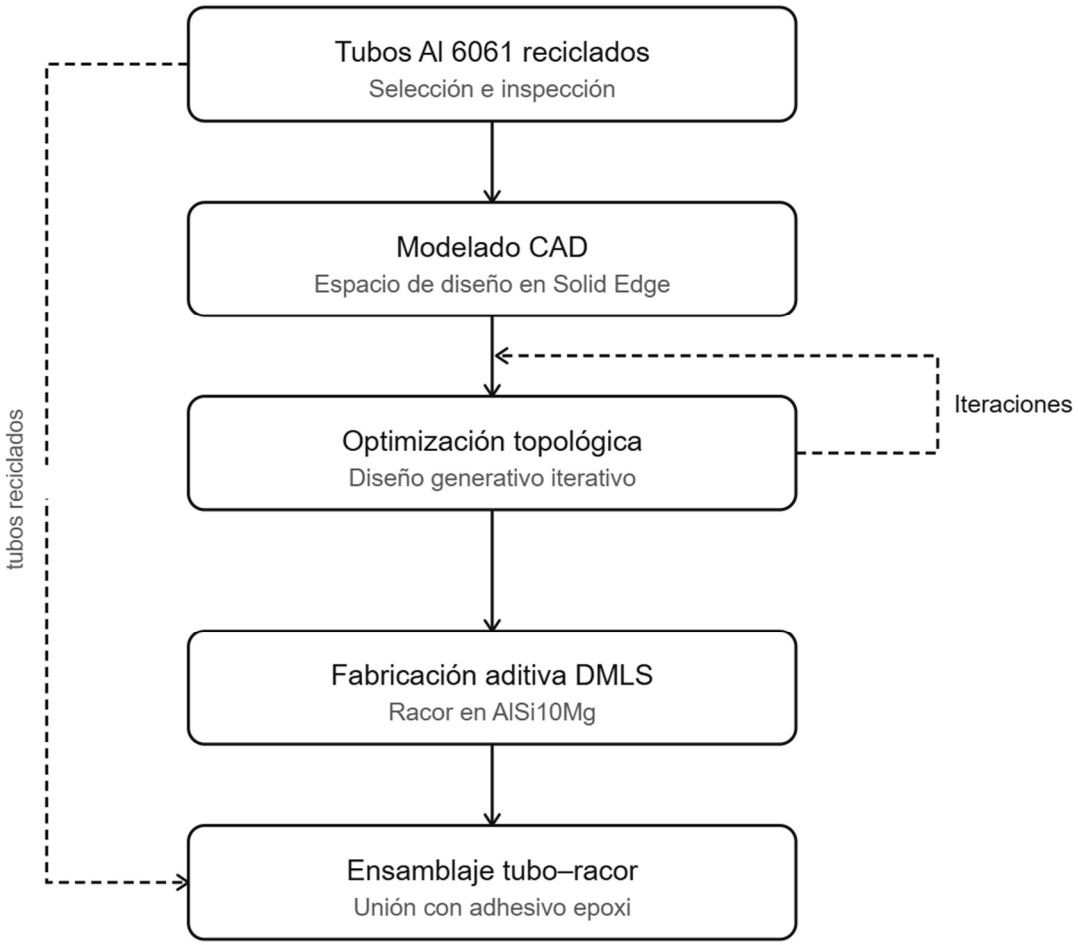


Figura 24 Flujo de trabajo

Capitulo 3 Definición y planteamiento del problema

Este capítulo establece el marco técnico sobre el que se desarrollará el diseño del racor del pedalier. Se parte de la normativa aplicable, se define la geometría del cuadro, se calcula el estado de cargas y la solución de unión adoptada. Este capítulo define las especificaciones de diseño que servirán para el proceso de optimización topológica del Capítulo 4.

3.1 Normativa aplicable: ISO 4210

La norma ISO 4210 es el estándar internacional para los requisitos de seguridad de bicicletas de uso general [33]. Publicada por la Organización Internacional de Normalización, establece los ensayos que deben superar los cuadros y componentes antes de su comercialización. La norma se divide en nueve partes; para este proyecto son relevantes las Partes 2, 3 y 6, que definen los requisitos estructurales del cuadro, los métodos de ensayo comunes y los ensayos específicos de cuadro y horquilla respectivamente [34] [35] [36].

- Parte 1: términos y definiciones.
- Parte 2: requisitos para bicicletas de ciudad, trekking, jóvenes, montaña y carreras.
- Parte 3: métodos de ensayo comunes.
- Parte 4: métodos de ensayo de frenos.
- Parte 5: métodos de ensayo de dirección.
- Parte 6: métodos de ensayo de cuadro y horquilla.
- Parte 7: métodos de ensayo de ruedas y llantas.
- Parte 8: métodos de ensayo de pedales y sistema de transmisión.
- Parte 9: métodos de ensayo de sillín y tija.

Los tres ensayos de la norma aplicables a la unión del pedalier son los siguientes. El primero es el ensayo de fatiga por pedaleo, en el que se aplica una carga cíclica en el eje del pedalier que simula el esfuerzo de pedaleo por carga horizontal, en el que se aplica una carga lateral cíclica en el sillín con él. El segundo es el ensayo de fatiga cuadro fijado por el eje del pedalier, verificando la resistencia a los esfuerzos de balanceo. El tercero es el ensayo

estático de resistencia del cuadro, que verifica que bajo una carga estática aplicada en el sillín no se produce rotura ni deformación permanente. Los valores concretos de cada carga de ensayo se detallan en el apartado 3.3, cuando se calculen las cargas de diseño correspondientes.

La norma no establece dimensiones concretas para los tubos ni para los racores, ya que eso queda a criterio del fabricante. Lo que sí fija son los requisitos de comportamiento que el conjunto debe cumplir, independientemente de las dimensiones empleadas. El racor se diseñará para cumplir las cargas de ensayo de la ISO 4210, sin estar condicionado por dimensiones normalizadas de ningún componente.

3.2 Definición geométrica del cuadro de referencia

Para diseñar la unión es necesario conocer la geometría del cuadro al que pertenece: los ángulos entre tubos, las dimensiones de cada tubo y la geometría de la zona de unión. Todos estos parámetros definen el espacio de diseño del racor y las zonas de conexión con los tubos.

3.2.1 Geometría del cuadro de diamante

La geometría escogida se basa un cuadro de montaña de aluminio de talla M, que es la más común. Los valores de la Tabla 2 recogen las medidas y ángulos de los tubos que lo componen.

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Ángulo vainas	γ	9	°
Ángulo tubo del sillín	α	73,0	°
Ángulo down tube	β	71,0	°
Longitud tubo superior	L_{TT}	570	mm
Longitud tubo del sillín	L_{ST}	432	mm
Longitud vainas inferiores	L_{CS}	425	mm
Caída del pedalier (BB drop)	h_{BB}	68	mm
Distancia entre ejes	WB	1.060	mm
Diámetro caja del pedalier	$Ø_{BB}$	34,8	mm
Longitud down tube	L_{DT}	620	mm

Tabla 2 Geometría de referencia del cuadro de montaña de aluminio talla M.

El diámetro de la caja del pedalier es 34,8 mm con rosca BSA (British Standard), que es el estándar más extendido en bicicletas de montaña y compatible con la gran mayoría de grupos de transmisión del mercado. Esta elección de pedalier garantiza que es compatible con los componentes comerciales existentes, sin necesidad de adaptadores.

3.2.2 Dimensiones de los tubos

La Tabla 3 recoge las dimensiones de los tubos del cuadro de referencia. Estos tubos serán los empleados para el diseño del racor.

Tubo	Ø exterior (mm)	Espesor pared (mm)	Ø interior (mm)
Down tube	44,0	1,5	41,0
Tubo del sillín	34,9	1,2	32,5
Vainas inferiores (×2)	25,4	1,2	23,0

Tabla 3 Dimensiones nominales de los tubos del cuadro de referencia.

3.2.3 Geometría del racor: tetones de inserción y zonas de conexión

El racor diseñado en este proyecto es un racor de inserción interna: en lugar de envolver los tubos por el exterior, el racor dispone de cuatro tetones (espigos macizos) que se introducen dentro de los tubos. Cada tetón tiene un diámetro ligeramente inferior al diámetro interior del tubo correspondiente, dejando la holgura necesaria para el adhesivo epoxi. Esta solución presenta varias ventajas respecto al racor externo convencional.

En primer lugar, el material del racor queda completamente alojado entre los extremos de los tubos, lo que simplifica el espacio de diseño y da lugar a una solución más compacta. En segundo lugar, la carga se transmite a través de toda la superficie lateral del tetón en contacto con la pared interior del tubo, distribuyendo los esfuerzos de forma más uniforme que una junta a tope.

Los parámetros geométricos de los tetones se recogen en la Tabla 4. La longitud de inserción de 35 mm se ha establecido para garantizar la resistencia de la junta adhesiva bajo las cargas de diseño, como se verifica en el apartado 3.4.

Tubo	Ø interior tubo (mm)	Ø tetón racor (mm)	Holgura (mm)	Long. inserción (mm)
Down tube	41,0	40,7	0,15	35
Tubo del sillín	32,5	32,2	0,15	35
Vaina inferior izq.	23,0	22,7	0,15	35
Vaina inferior der.	23,0	22,7	0,15	35

Tabla 4 Geometría de los tetones de inserción del racor.

Como se ha citado anteriormente, el racor incorpora además en su zona central el alojamiento de la caja del pedalier: un taladro pasante de diámetrocon rosca BSA que conecta con el eje de transmisión. Esta zona central, junto con la base de los cuatro tetones, forma el núcleo estructural de la unión y quedará definida como zona preservada en el proceso de optimización topológica, es decir, el algoritmo no podrá eliminar material en esa región.

3.3 Propuesta de estado de cargas

3.3.1 Consideraciones previas y modelo estructural

El estado de cargas real al que está sometida la unión del pedalier durante el uso de la bicicleta es de naturaleza dinámica y variable. Para el análisis estructural se construye un modelo estático equivalente: se calculan las cargas (en las condiciones de uso más exigentes) y se aplica un factor de amplificación dinámica para tener en cuenta los efectos dinámicos.

Para determinar las fuerzas que actúan sobre la unión del pedalier se plantea un análisis estático del sistema bicicleta-ciclista. El sistema está sometido a cargas externas conocidas (el peso del ciclista y la fuerza de pedaleo) y a las reacciones del terreno sobre las ruedas. Aplicando las ecuaciones de equilibrio estático es posible calcular las fuerzas que se transmiten a la unión a través de cada uno de los tubos. Estas fuerzas son las que definen el estado de carga de la unión y las que se introducirán como condiciones de contorno en el modelo FEM.

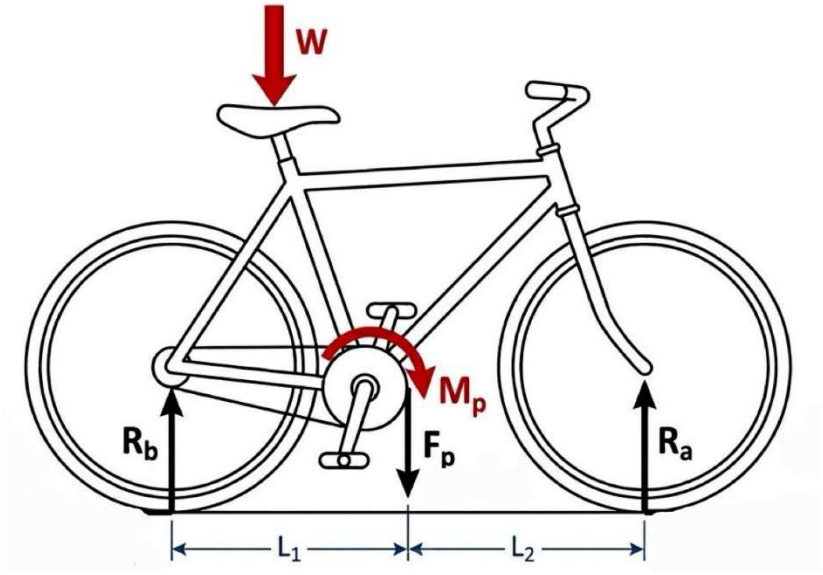


Figura 25 Fuerzas que actúan en el cuadro

3.3.2 Cargas estáticas: peso, pedaleo y reacciones de las ruedas

El sistema bicicleta-ciclista en condición de pedaleo estático está sometido a las siguientes fuerzas externas, que se calculan a continuación. Se considera un ciclista de referencia de 80 kg en posición de pedaleo sentado [37].

Peso del ciclista (W):

El peso del ciclista actúa verticalmente hacia abajo en su centro de gravedad, situado aproximadamente sobre el eje del pedalier:

$$W = m \cdot g = 80 \times 9{,}81 = 785\ N \approx 800\ N$$

Reacciones normales de las ruedas (RA, RB):

Las reacciones verticales de las ruedas equilibran el peso del ciclista. Tomando momentos respecto al eje de la rueda trasera, con WB = 1.060 mm y el centro de gravedad a 400 mm del eje trasero:

$$R_A = W \times \frac{400}{1060} = 800 \times \frac{400}{1060} = 302\ N$$

$$R_B = W - R_A = 800 - 302 = 498\ N$$

R_B se transmite al racor a través de las vainas inferiores. R_A llega al racor a través de la horquilla, el tubo de dirección y el down tube.

Fuerza de pedaleo (Fp) y momento torsor (Mp):

La fuerza máxima de pedaleo se produce cuando el ciclista aplica todo su peso sobre un pedal en posición horizontal. Para el cálculo estático se toma la componente equivalente al peso del ciclista:

$$F_p = \mathbf{W} = \mathbf{800\ N}$$

Con una longitud de biela estándar de 175 mm, el momento torsor en el eje del pedalier es:

$$M_p = F_p \times L_{biela} = 800 \times 0,175 = 140\ Nm$$

Descomposición en el tubo del sillín:

El tubo del sillín trabaja como una ménsula empotrada en el racor, con el peso del ciclista aplicado en su extremo superior. El tubo forma un ángulo α = 73° respecto a la horizontal, por lo que W se descompone en:

$$N_{ST} = W \cdot sen(73°) = 800 \times 0,956 = 765\ N \quad \textbf{[axil de compresión]}$$

$$V_{ST} = W \cdot cos(73°) = 800 \times 0,292 = 234\ N \quad \textbf{[cortante]}$$

El cortante V_{ST} genera un momento flector en la base del tetón (empotramiento en el racor):

$$M_{ST} = V_{ST} \times L_{ST} = 234 \times 0,432 = 101\ Nm$$

Descomposición en las vainas inferiores:

Las vainas transmiten R_B = 498 N al racor. Con una inclinación de 9° respecto a la horizontal:

$$N_{CS} = R_B \cdot sen(9°) = 498 \times 0,159 = 78\ N \ \textbf{[axil de compresión]}$$

$$V_{CS} = R_B \cdot cos(9°) = 498 \times 0,988 = 492\ N \quad \textbf{[cortante]}$$

El momento flector en la base del tetón de cada vaina es:

$$M_{CS} = V_{CS} \times L_{CS} = 492 \times 0,425 = 209\ Nm$$

Las vainas trabajan fundamentalmente a compresión axil; su momento flector es pequeño respecto al del tubo del sillín.

Descomposición en el down tube:

La reacción delantera R_A = 302 N llega al racor a través del down tube. El down tube forma un ángulo de 67° respecto a la horizontal (complementario al ángulo del tubo de dirección β = 71° con la vertical). Sus componentes según el eje del tubo son:

$$\boldsymbol{N_{DT} = R_A \cdot sen(71°) = 302 \times 0,949 = 286\ N}\ \textbf{[axil de compresión]}$$

$$\boldsymbol{V_{DT} = R_A \cdot cos(71°) = 302 \times 0,326 = 98\ N}\ \textbf{[cortante]}$$

El momento flector en la base del tetón del down tube, tomando una longitud de down tube de 620 mm para un cuadro de montaña talla M:

$$\boldsymbol{M_{DT} = V_{DT} \times L_{DT} = 118 \times 0,620 = 61\ Nm}$$

La Tabla 4 recoge de forma compacta las solicitaciones estáticas en la base de cada tetón del racor antes de aplicar el factor de amplificación dinámica.

Tubo	Fuerza origen	Axil N (N)	Cortante V (N)	Momento flector M (N·m)
Tubo del sillín	$W = 800\ N$	765	234	101
Vainas inferiores (×2)	$R_B = 498\ N$	78	492	209
Down tube	$R_A = 302\ N$	286	98	61
Pedalier (torsión)	$F_p = 800\ N$	—	—	$M_p = 140\ N \cdot m$

Tabla 5 Solicitaciones estáticas en la base de cada tetón del racor (sin factor dinámico).

Estas cargas se aplicarán en el modelo FEM sobre las superficies de los extremos de los tetones en dirección normal a cada una, lo que permite al software calcular internamente todos los estados tensionales resultantes. El factor de amplificación dinámica se aplica en el apartado 3.3.3.

3.3.3 Ponderación dinámica de las cargas

Las cargas calculadas en el apartado anterior son cargas estáticas equivalentes para las condiciones de uso normal. En uso real, la bicicleta está sometida a cargas dinámicas (impactos con irregularidades del terreno, variaciones bruscas de la fuerza de pedaleo, maniobras de frenada) que pueden multiplicar significativamente las cargas estáticas durante períodos breves.

La ISO 4210 tiene en cuenta estos efectos en sus ensayos: las cargas de ensayo son superiores a las cargas estáticas equivalentes calculadas. Para el ensayo de fatiga por pedaleo, la norma establece una carga de 1.200 N, frente a los 800 N de la carga estática equivalente calculada. Esto supone un factor de amplificación de 1.200 / 800 = 1,5. Para los ensayos de cuadro, la norma aplica factores similares. En la práctica de diseño de componentes de bicicleta es habitual usar un factor de amplificación dinámica k = 2 como valor conservador que engloba tanto los efectos dinámicos de la norma como las incertidumbres del modelo.

Las cargas de diseño resultantes, que son las que se introducirán en el modelo FEM y en el proceso de optimización topológica, se recogen en la Tabla 5.

Tubo	Fuerza origen	Axil N (N)	Cortante V (N)	Momento flector M (N·m)
Tubo del sillín	$W = 800\ N$	1530	468	202
Vainas inferiores (×2)	$R_B = 498\ N$	156	984	418
Down tube	$R_A = 302\ N$	556	236	146
Pedalier (torsión)	$F_p = 1600\ N$	—	—	$M_p = 280\ N \cdot m$

Tabla 6 Cargas de diseño tras la ponderación dinámica (k = 2).

3.3.4 Análisis de fatiga según ISO 4210

Las cargas calculadas en los apartados anteriores son cíclicas. Esto significa que el criterio de diseño no es la resistencia estática del material sino su resistencia a fatiga, que indica cuál es la tensión máxima que puede soportar de forma repetida sin llegar a romperse. La ISO 4210 establece que el cuadro debe superar 100.000 ciclos bajo las cargas de ensayo sin fisura ni rotura, lo que equivale a aproximadamente 10.000 km de uso. El objetivo de este apartado es calcular la tensión máxima admisible que garantiza el cumplimiento de ese requisito.

El aluminio no presenta un límite de fatiga definido como el acero: su resistencia decrece continuamente con el número de ciclos. Para el aluminio 6061-T6, la resistencia a fatiga para 10^7 ciclos es aproximadamente el 35–40% de la resistencia a tracción estática. Tomando $\sigma_{UTS} = 310\ MPa$ para el 6061-T6, la resistencia a fatiga de referencia es:

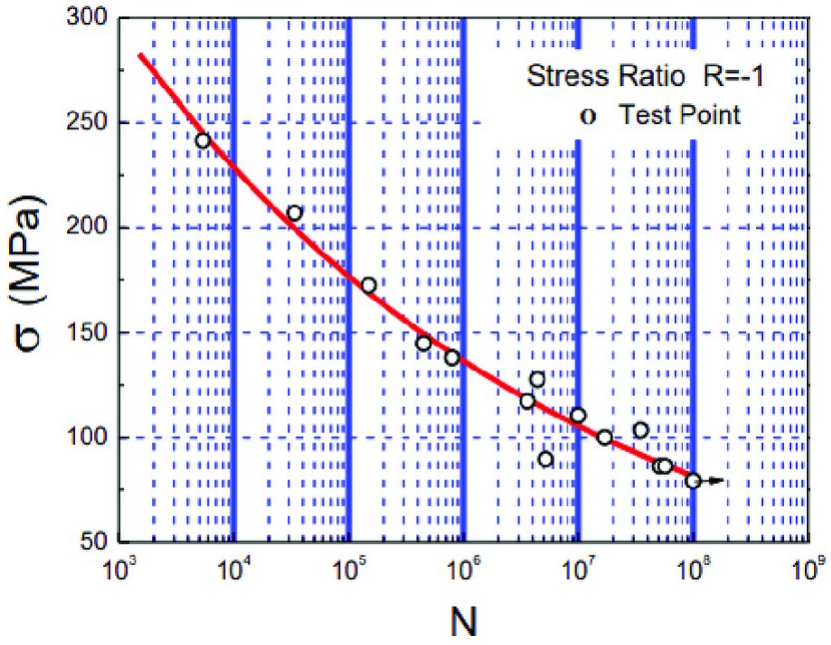


Figura 26 Curva S-N del Aluminio 6061-T6

$$\boldsymbol{\sigma_{fatiga} \approx 0,35 \times 310 = 108\ MPa \rightarrow \sigma_{fatiga} = 110\ MPa\ (conservador)}$$

Aplicando un factor de seguridad FS = 2 sobre la resistencia a fatiga para contemplar las incertidumbres en las propiedades del material reciclado, la calidad de la junta adhesiva y las variaciones en las condiciones de uso:

$$\boldsymbol{\sigma_{adm} = \frac{\sigma_{fatiga}}{FS} = \frac{110}{2} = 55\ MPa}$$

Este valor es la tensión admisible de diseño. Si en ningún punto del racor se supera esta tensión bajo las cargas de la Tabla 5, queda garantizado que el componente no fallará por fatiga. Este criterio es más restrictivo que el de resistencia estática: una unión que no se rompe bajo carga puntual podría igualmente fallar por fatiga en uso real si trabaja por encima del valor calculado de forma repetida. Por eso este es el criterio que gobierna el diseño.

Criterio	Valor	Referencia
Resistencia estática Al 6061-T6 (σ_y)	276 MPa	Propiedad material
Resistencia a fatiga 10^7 ciclos (σ_f)	110 MPa	Curva S-N Al 6061-T6
Factor de seguridad (FS)	2	Diseño conservador
Tensión admisible estática	138 MPa	-
Tensión admisible de fatiga (σ_{adm})	55 MPa	-

Tabla 7 Criterios de diseño: resistencia estática y a fatiga.

3.4 Unión tubo-racor: adhesivo epoxi estructural

Una vez definida la geometría del racor y calculadas las cargas de diseño, es necesario establecer cómo se unirá el racor a los tubos reciclados. Este apartado justifica la solución adoptada, verifica su resistencia y establece los requisitos de ejecución que garantizan la calidad de la junta.

3.4.1 Justificación de la solución adoptada

La unión entre los salientes del racor impreso y los tubos de reciclados se realizará mediante adhesivo epoxi. Esta solución es la más adecuada por tres razones principales [38] [39].

La primera es la compatibilidad con el proceso de fabricación aditiva: soldar aluminio impreso por DMLS con tubos de aluminio reciclado es complejo y puede degradar las propiedades mecánicas de ambos materiales. El adhesivo epoxi se aplica a temperatura ambiente, eliminando completamente este riesgo. La segunda es la flexibilidad dimensional: la holgura entre el tetón y la pared interior del tubo permite que el adhesivo rellene las irregularidades superficiales, garantizando una junta continua sin concentradores de tensión. Finalmente, la resistencia mecánica: los adhesivos epoxi estructurales de alta resistencia presentan resistencias a cortadura de 15–20 MPa en juntas de aluminio con preparación superficial adecuada, suficientes para las cargas de diseño de este proyecto como se verifica a continuación.

1.5.1. *Resistencia de la junta adhesiva y protocolo de montaje*

La capacidad resistente de cada junta adhesiva se calcula como el producto de la resistencia a cortadura del adhesivo por la superficie de pegado. La superficie de pegado de cada tetón es la superficie lateral del cilindro de inserción:

$$A_{junta} = \pi \times Ø_{tetón} \times L_{inserción}$$

Para el tetón del down tube (tetón de mayor diámetro, caso más desfavorable en términos de carga axil):

$$A_{junta} = \pi \times 40,7\ mm \times 35\ mm = 4.472\ mm^2$$

$$F_{junta\ max} = \tau_{adm} \times A_{junta} = 25 \frac{N}{mm^2} \times 4.472\ mm^2 = 67080\ N \approx 67\ kN$$

Este valor es muy superior a la carga axil máxima de diseño en el down tube (del orden de 1600 N), lo que confirma que la longitud de inserción de 35 mm es suficiente con un amplio margen de seguridad.

Para garantizar la resistencia de la junta, la ejecución debe seguir estos pasos:

- **Preparación superficial:** desengrase con acetona, lijado ligero y limpieza final tanto en el tetón como en la pared interior del tubo.
- **Aplicación:** el adhesivo se aplica sobre el tetón antes de la inserción. La holgura de 0,15 mm asegura su distribución uniforme.
- **Curado:** 24 horas a temperatura ambiente o 1 hora a 60°C, manteniendo los tubos en posición correcta.
- **Verificación:** comprobar que el adhesivo ha rebosado uniformemente por todo el perímetro, lo que confirma la cobertura completa de la junta.

Parámetro	Valor adoptado
Adhesivo de referencia	epoxi bicomponente
Resistencia a cortadura τ_{adm}	15 MPa (valor conservador)
Longitud de inserción	35 mm (todos los tetones)

Holgura tetón-tubo	0,15 mm
Preparación superficial	Desengrase + lijado + limpieza
Curado	24h a 23°C o 1h a 60°C
Capacidad junta down tube	67 kN >> 1.600 N de diseño

Tabla 8 Parámetros de la junta adhesiva tubo-racor.

3.5 Especificaciones de diseño del racor

Este apartado resume todas las especificaciones definidas a lo largo del capítulo, que servirán como parámetros de entrada para el proceso de optimización topológica del Capítulo 4.

3.5.1 Material y propiedades mecánicas de referencia

El material de la unión es AlSi10Mg procesado por DMLS. Se utilizan los valores en condición as-built (sin tratamiento térmico posterior), que son los más conservadores y los que mejor representan el estado real del componente fabricado.

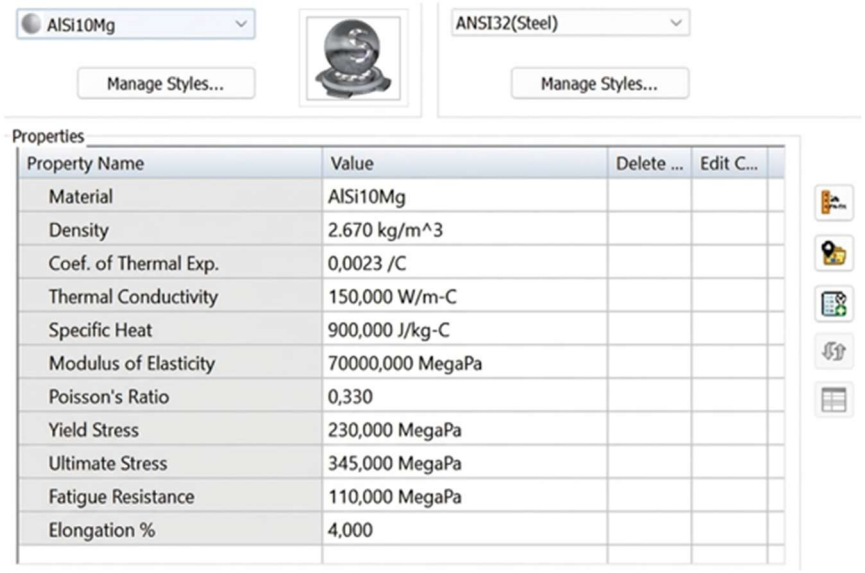


Tabla 9 Propiedades mecánicas del AlSi10Mg procesado por DMLS.

3.5.2 Tensión admisible y factor de seguridad

El criterio gobernante es la resistencia a fatiga. La tensión admisible de diseño es:

$$\sigma_{adm} = \frac{\sigma_{fatiga}}{FS} = \frac{110}{2} = 55\ MPa$$

En cada iteración de optimización topológica se verificará que la tensión máxima de Von Mises no supera este valor en ningún punto del racor bajo las cargas de la Tabla 5.

3.5.3 Definición del espacio de diseño y zonas preservadas

El espacio de diseño es el volumen máximo disponible para que el algoritmo distribuya el material. Es un sólido macizo que conecta los cuatro tetones siguiendo la geometría real del cuadro, incorporando la orientación de cada tubo. Sobre este sólido, visible en la Figura 27, el algoritmo irá eliminando el material menos solicitado hasta obtener la geometría óptima.

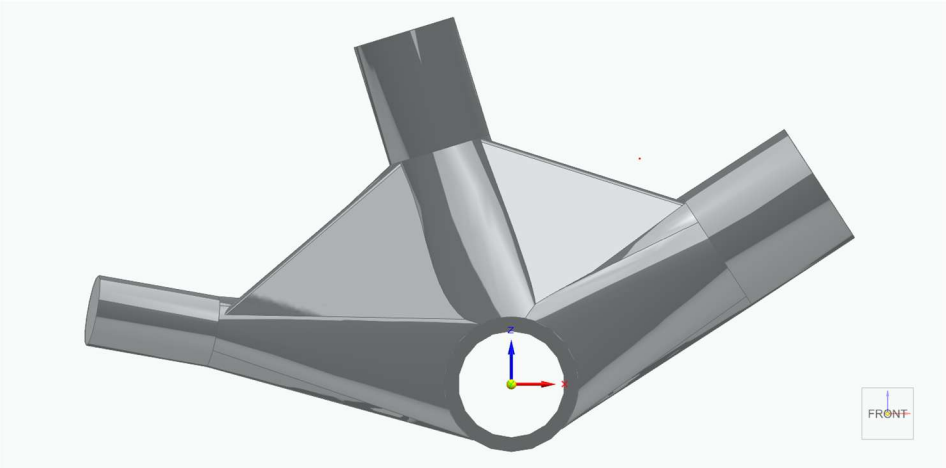


Figura 27 Espacio de diseño

Las zonas preservadas (regiones donde el material no puede ser eliminado) son las siguientes:

- Los cuatro tetones de inserción, incluyendo su longitud de 35 mm y el diámetro nominal correspondiente a cada tubo.
- El alojamiento central de la caja del pedalier: cilindro de diámetro 34,8 mm con rosca BSA y longitud 68 mm.

La Tabla 9 recoge de forma compacta todas las especificaciones de entrada para el Capítulo 4.

Parámetro	Valor
Material del racor	AlSi10Mg (DMLS, as-built)
Tensión admisible de diseño (σ_{adm})	55 MPa (fatiga, criterio gobernante)
Factor de seguridad (FS)	2
Fuerza de pedaleo de diseño (F_p)	1.600 N
Carga en sillín de diseño (W)	1.600 N
Reacción vainas de diseño (R_B)	996 N
Momento torsor de diseño (M_p)	280 N·m
Momento flector tubo sillín (M_{ST})	202 N·m
Longitud de inserción de tetones	35 mm
Desplazamiento máximo admisible	0,5 mm
Estándar caja de pedalier	BSA (Ø 34,8 mm, rosca inglesa)
Normativa de referencia	ISO 4210, partes 2, 3 y 6

Tabla 10 Especificaciones de diseño completas del racor de pedalier.

Con estas especificaciones completamente definidas, el Capítulo 4 abordará la implementación en software: modelado CAD del espacio de diseño, configuración del análisis FEM, ejecución de las iteraciones de diseño generativo y refinamiento geométrico de la solución óptima.

Capitulo 4 Implantación

El Capítulo 3 estableció el marco técnico completo del proyecto: la normativa aplicable, la geometría del cuadro de referencia, el estado de cargas actuante sobre la unión del pedalier, la solución de unión mediante adhesivo epoxi y las especificaciones de diseño que debe cumplir el racor. Con todas esas condiciones definidas, el presente capítulo aborda su implementación práctica en software.

El flujo de trabajo seguido consta de las siguientes etapas, que se desarrollan en los apartados sucesivos: en primer lugar, el modelado CAD del espacio de diseño en Solid Edge 2025, que constituye el punto de partida sobre el que operará el algoritmo de optimización; en segundo lugar, la simulación por elementos finitos (FEM) de la geometría base para verificar el comportamiento estructural antes de la optimización; en tercer lugar, la ejecución del diseño generativo con iteraciones sucesivas de reducción de masa; en cuarto lugar, el refinamiento geométrico de la solución óptima obtenida; y finalmente, la fabricación del prototipo mediante impresión 3D.

4.1 Modelado CAD del espacio de diseño

El primer paso de la implantación consiste en construir en Solid Edge 2025 [40] el sólido macizo que servirá como espacio de diseño para el algoritmo de optimización topológica. Este sólido no es la pieza final, sino el volumen máximo disponible para la distribución de material: representa la envolvente completa dentro de la cual el algoritmo podrá operar, eliminando progresivamente el material menos solicitado hasta obtener la geometría óptima.

La estrategia de modelado adoptada parte de una idea clara: en lugar de intentar construir directamente la forma compleja del racor, se modela primero el cuadro de referencia completo (con sus tubos en sus orientaciones reales según los ángulos de la Tabla 2) y se usa esa geometría como referencia para definir los tetones de inserción y el cuerpo central del racor. De esta forma, la orientación de cada tetón queda garantizada por construcción, sin necesidad de introducir ángulos manualmente. A continuación se describe el proceso de modelado paso a paso.

4.1.1 Definición de planos y tubos de referencia

El modelado se inicia con la definición de los planos de referencia orientados según los ángulos del cuadro de la Tabla 2. Estos planos determinan la dirección axial de cada uno de los tubos que convergen en la unión: el down tube (71° respecto a la horizontal), el tubo del sillín (73°) y las dos vainas inferiores (9°). Su correcta definición es crítica, ya que cualquier error en esta fase afectaría a todas las operaciones posteriores.

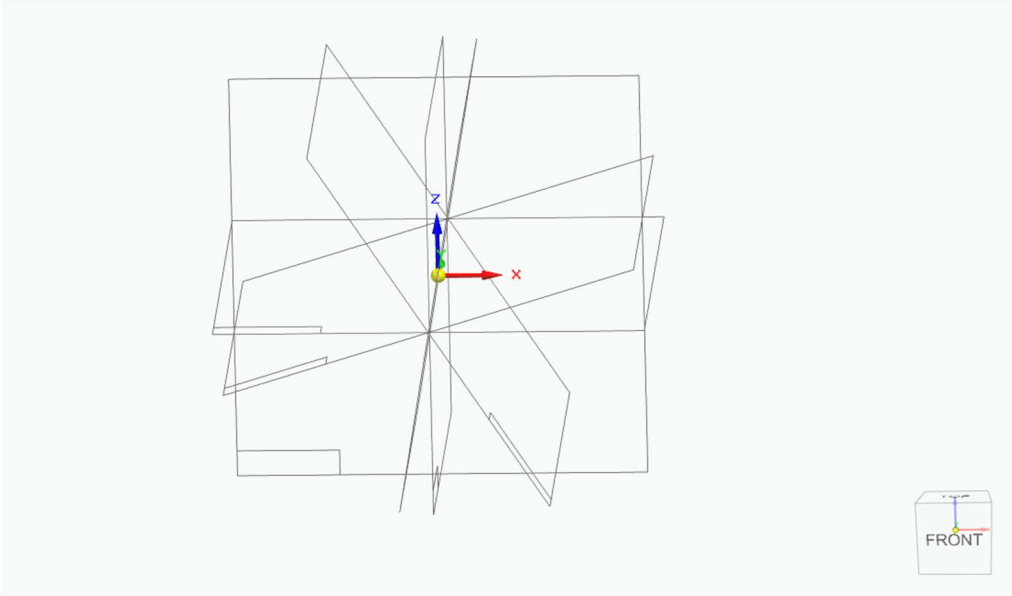


Figura 28 Planos de referencia definidos según la Tabla 2.

Una vez definidos los planos de referencia, se modela en primer lugar el cilindro central del pedalier. Este elemento es el núcleo geométrico de la unión: todos los tubos y, posteriormente, todas las BlueSurfaces de transición convergen hacia él. Su diámetro exterior es el correspondiente al estándar BSA (34,8 mm de diámetro interior) y su posición define el origen del sistema de coordenadas del modelo.

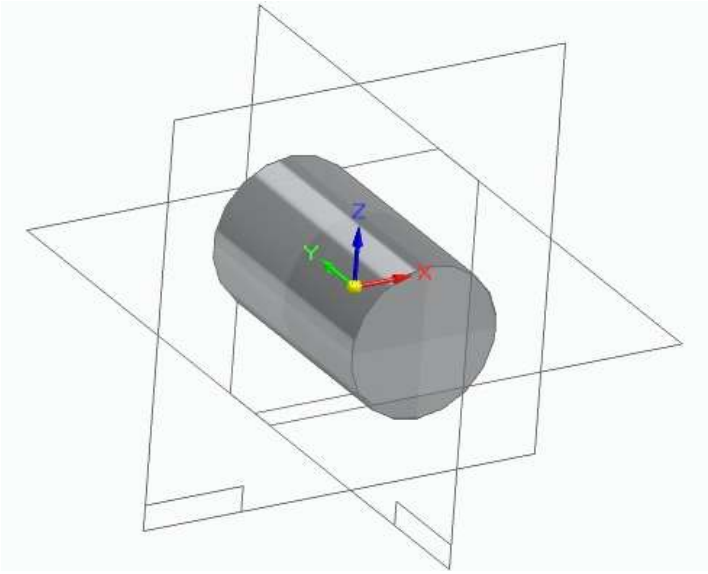


Figura 29 Cilindro del pedalier modelado como referencia central del conjunto.

A continuación se modela el tubo del sillín. Se dibuja el boceto de su sección circular en el plano de referencia correspondiente (Plane 4), con un diámetro exterior de 34,9 mm según la Tabla 3, y se extruye en la dirección axial del tubo hasta una longitud suficiente para que supere con claridad la zona de intersección con el cuerpo central del racor.

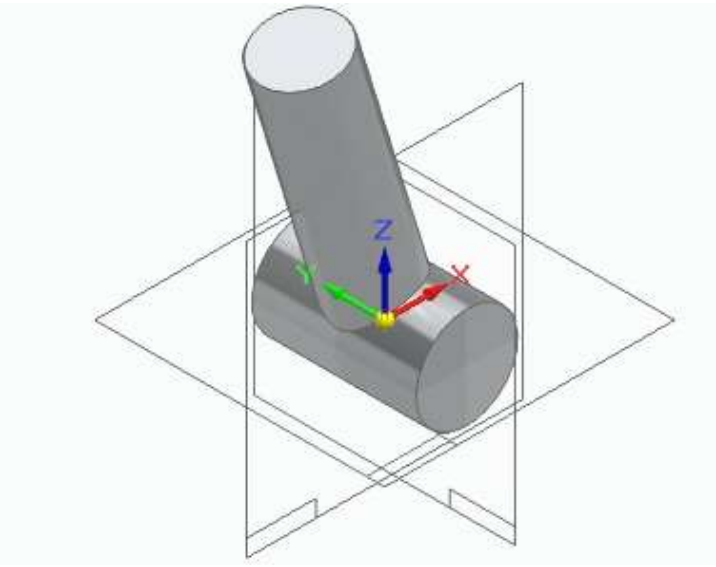


Figura 30 Tubo del sillín extruido.

El mismo procedimiento se aplica al down tube: boceto de la sección en su plano de referencia con diámetro de 44,0 mm, y extrusión en la dirección axial. El down tube es el tubo de mayor sección del cuadro y, por tanto, el que genera el tetón de mayor diámetro.

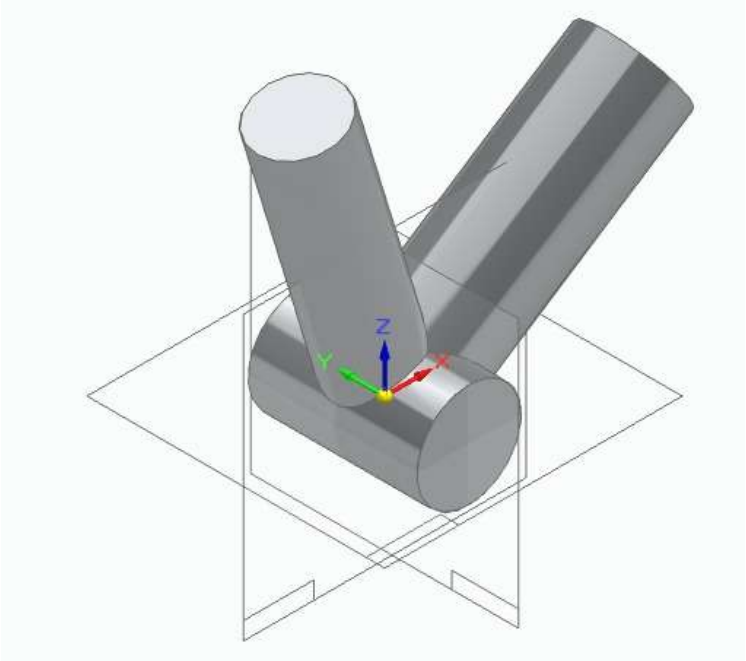


Figura 31 Down tube con las dimensiones de la Tabla 3.

Para las vainas inferiores, se define un plano de referencia orientado a 9° respecto a la horizontal y se modela una única vaina con sección de 25,4 mm de. Dado que las dos vainas son simétricas respecto al plano sagital del cuadro, se obtiene la segunda mediante la operación “Mirror” una vez modelada la primera, lo que garantiza la simetría perfecta del modelo.

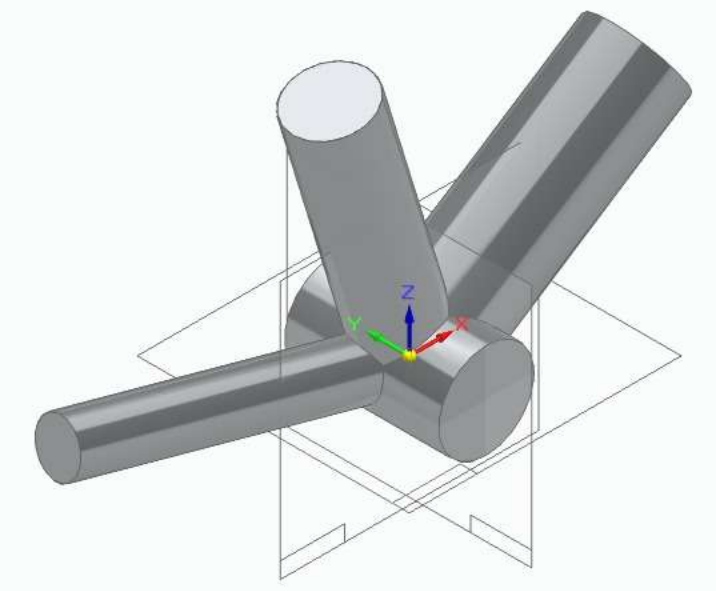


Figura 32 Vaina inferior extruida.

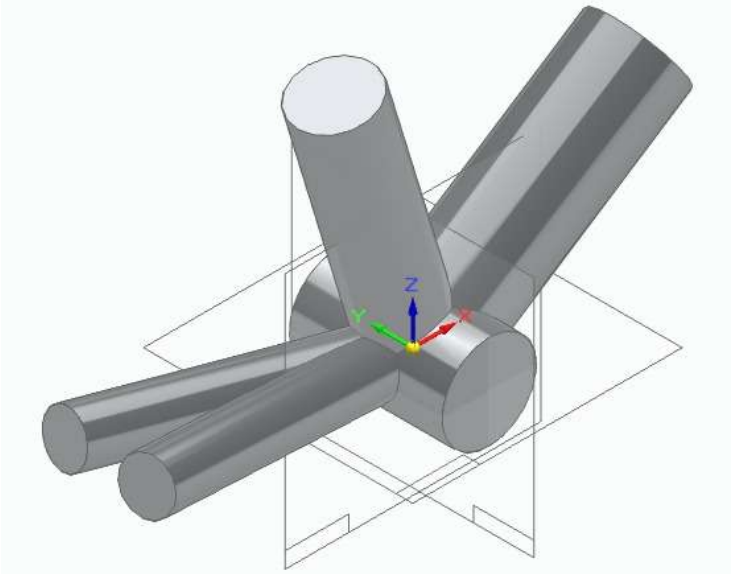


Figura 33 Conjunto de los cuatro tubos de referencia tras la operación Mirror.

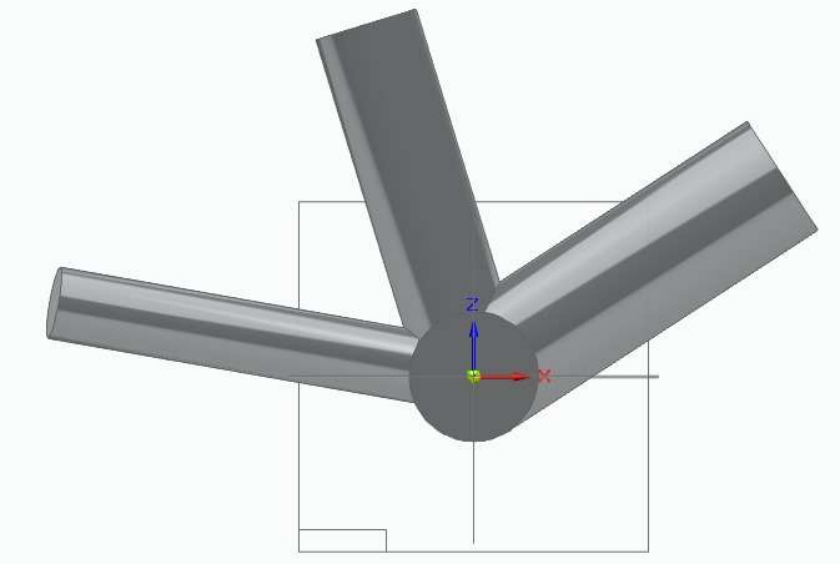


Figura 34 Vista lateral del conjunto de los tubos de referencia

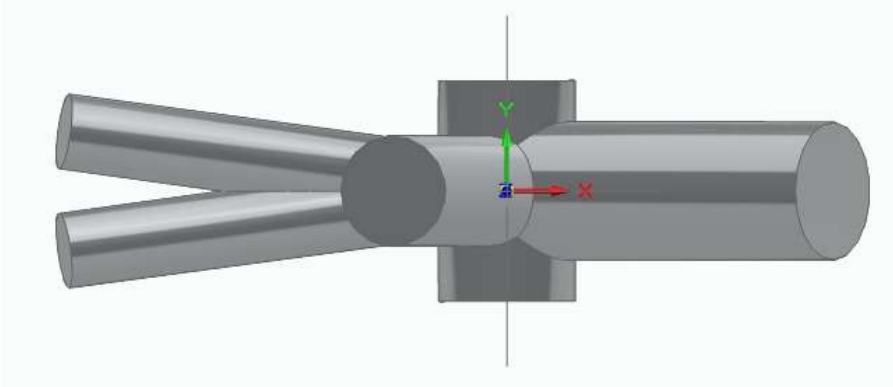


Figura 35 Vista cenital del conjunto de los tubos de referencia

4.1.2 Obtención de los tetones por sección de los tubos

Con los cuatro tubos modelados en sus orientaciones reales, el siguiente paso consiste en obtener los tetones de inserción del racor. La estrategia adoptada es sencilla: se secciona cada tubo a una distancia de 35 mm de sus respectivos extremos (que es precisamente la longitud de inserción definida en la Tabla 4) y se conserva únicamente el segmento, que constituye el tetón.

Este enfoque tiene una ventaja fundamental: la orientación de cada tetón queda definida de forma implícita por la orientación del tubo del que procede, eliminando cualquier posibilidad

de error angular. Los diámetros de los tetones (ligeramente inferiores a los diámetros interiores de los tubos para dejar la holgura de 0,15 mm del adhesivo) se obtienen directamente de los bocetos originales de cada tubo.

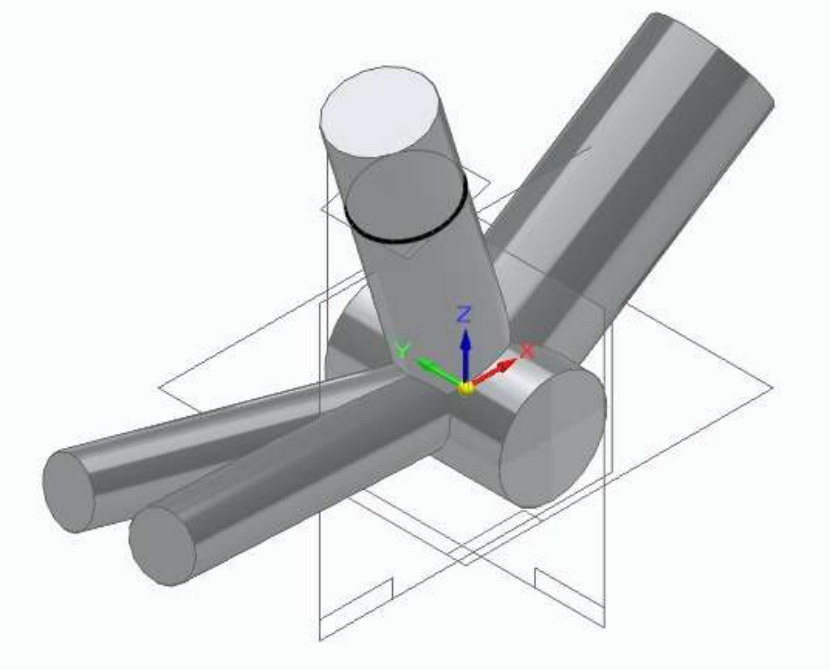


Figura 36 Tetón del tubo del sillín obtenido por sección del tubo de referencia.

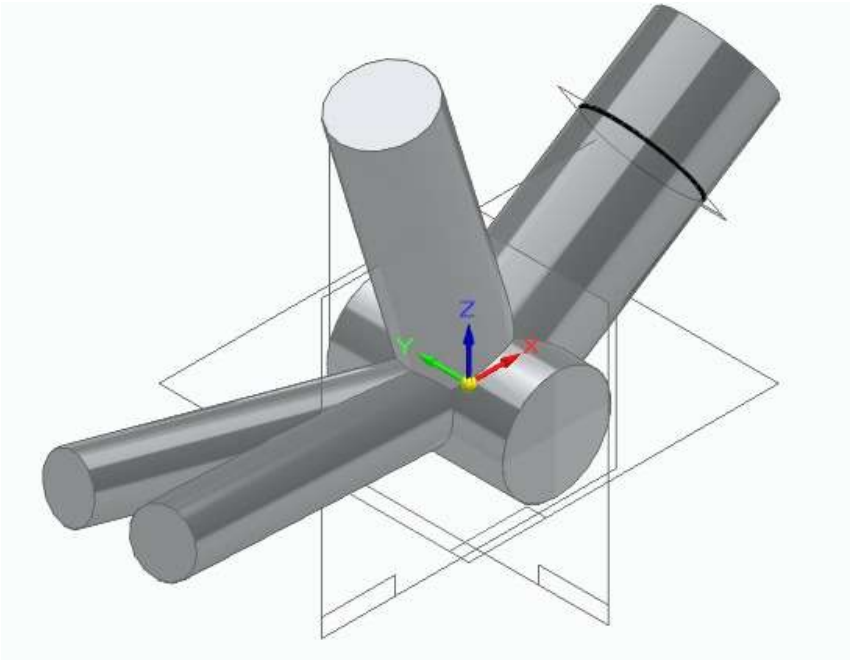


Figura 37 Tetón del down tube obtenido por sección del tubo de referencia.

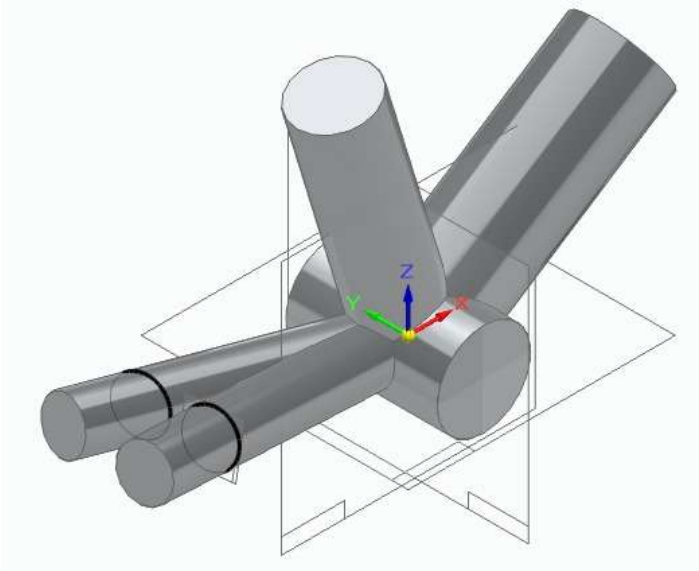


Figura 38 Tetones de las vainas inferiores.

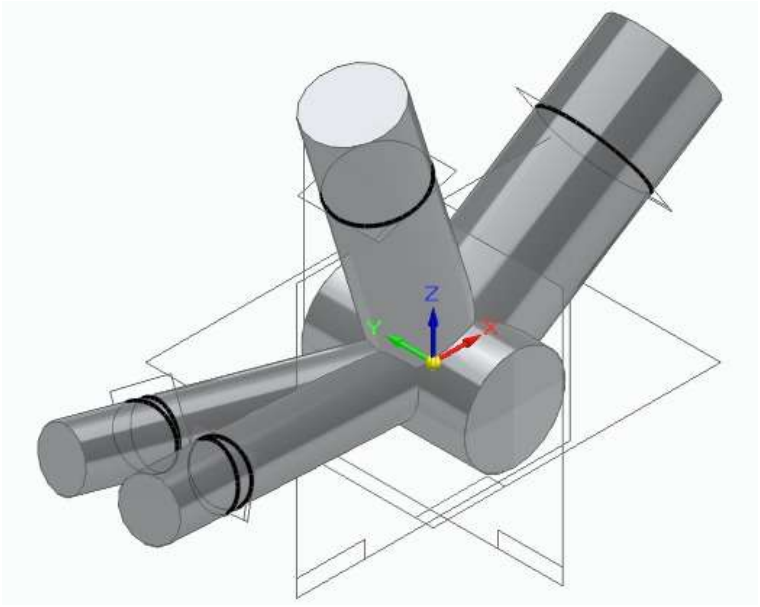


Figura 39 Vista general de los cuatro tetones de inserción del racor.

4.1.3 BlueSurfaces conexión tetones–pedalier

Con los tetones definidos, el siguiente paso es construir el cuerpo central del racor que los conecta entre sí y con el cilindro del pedalier. Para ello se emplea la herramienta BlueSurf de Solid Edge, que permite generar superficies de transición suaves entre curvas guía definidas en distintos planos del espacio. Esta herramienta es especialmente adecuada para

geometrías orgánicas como la del racor, donde las transiciones entre los tetones y el cuerpo central deben ser continuas y sin aristas para evitar concentraciones de tensión.

En la primera fase de modelado de superficies se construyen las BlueSurfs que conectan directamente los extremos de los tetones con el perímetro del cilindro del pedalier. Para cada una de las BlueSurf, en primer lugar se deben crear los bocetos que posteriormente se transformen en superficie. Con estas superficies cerradas, se emplea la herramienta "Stich" la cuál une y sella un conjunto de superficies que forman un volumen cerrado, convirtiéndolas automáticamente en un sólido. Este sólido se unirá posteriormente al conjunto de tubos iniciales

4.1.3.1 BlueSurf Down Tube - Pedalier

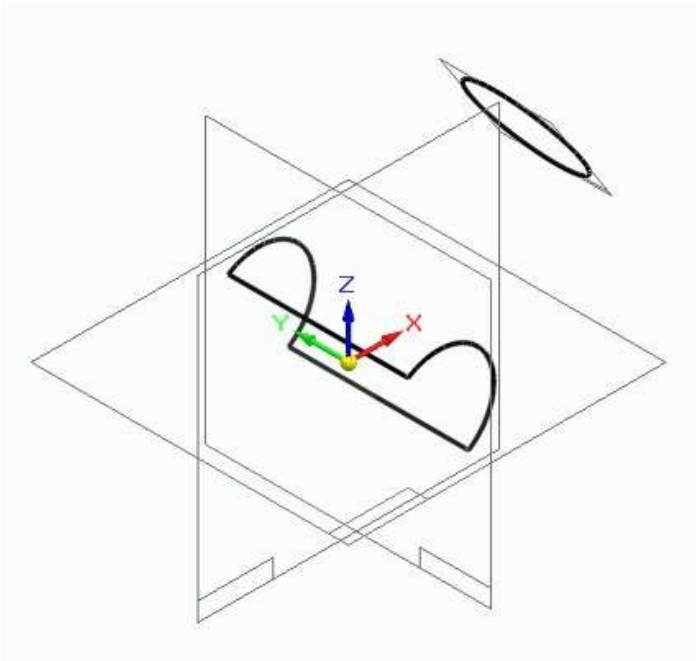


Figura 40 Boceto de las superficies de la BlueSurf Down Tube - Pedalier

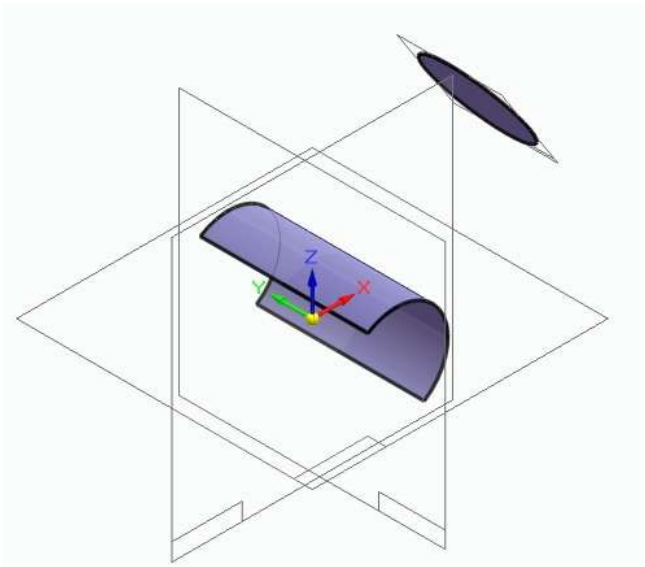


Figura 41 Superficies *de la BlueSurf Down Tube - Pedalier*

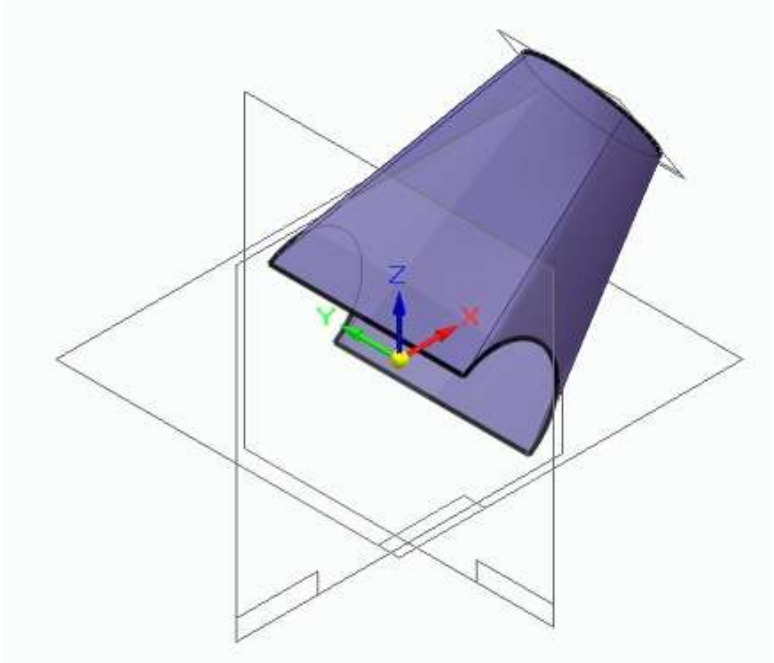


Figura 42 BlueSurf Down Tube – Pedalier

Una vez creada la BlueSurf y comprobado que se trata de un conjunto de superficies cerradas, empleamos “Sitch” para crear el sólido.

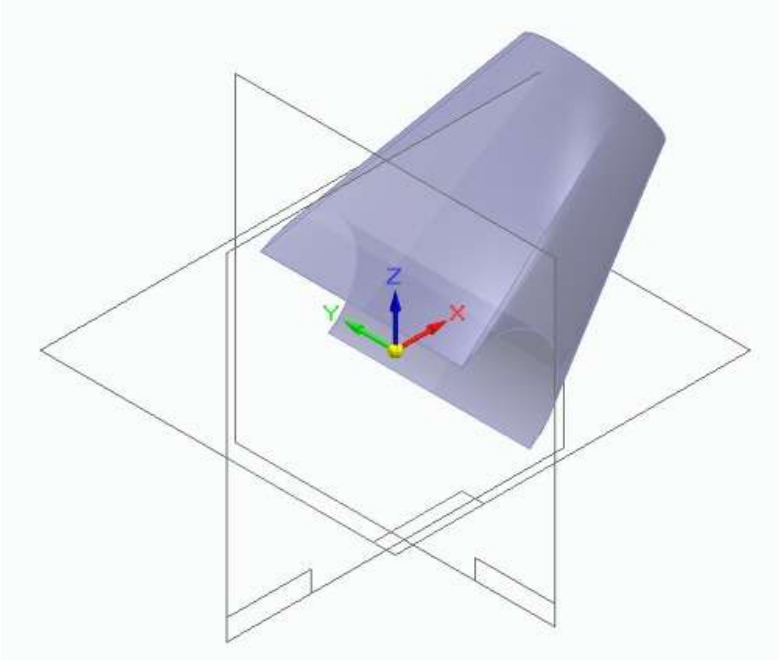


Figura 43 Sitch Down Tube - Pedalier

Una vez obtenido el sólido, obtenemos el siguiente conjunto de cuerpos que se será unido posteriormente:

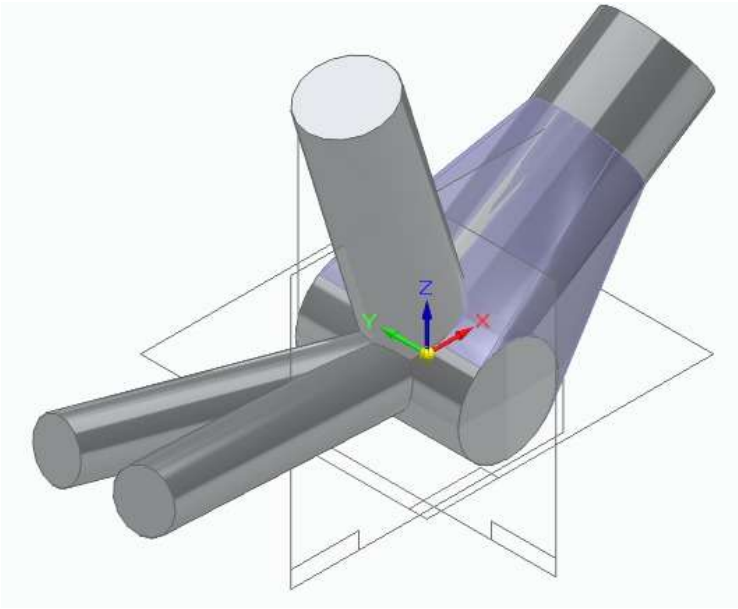


Figura 44 Conjunto Tubos – Conexión Down Tube/Pedalier

Las demás BlueSurfs entre el pedalier y los distintos tubos de referencia son idénticas.

4.1.3.2 BlueSurf Tubo Sillín – Pedalier

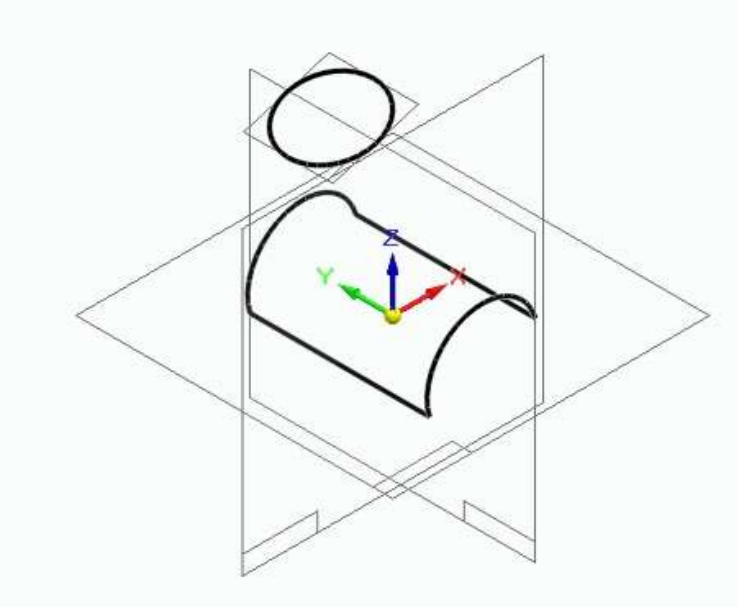


Figura 45 Boceto de las superficies de la BlueSurf Sillín - Pedalier

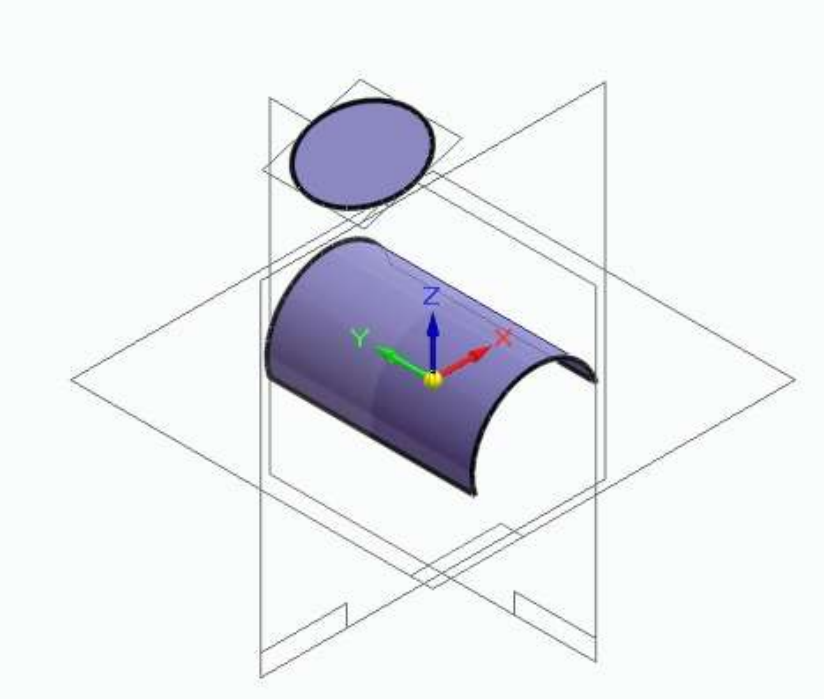


Figura 46 Superficies *de la Sillín - Pedalier*

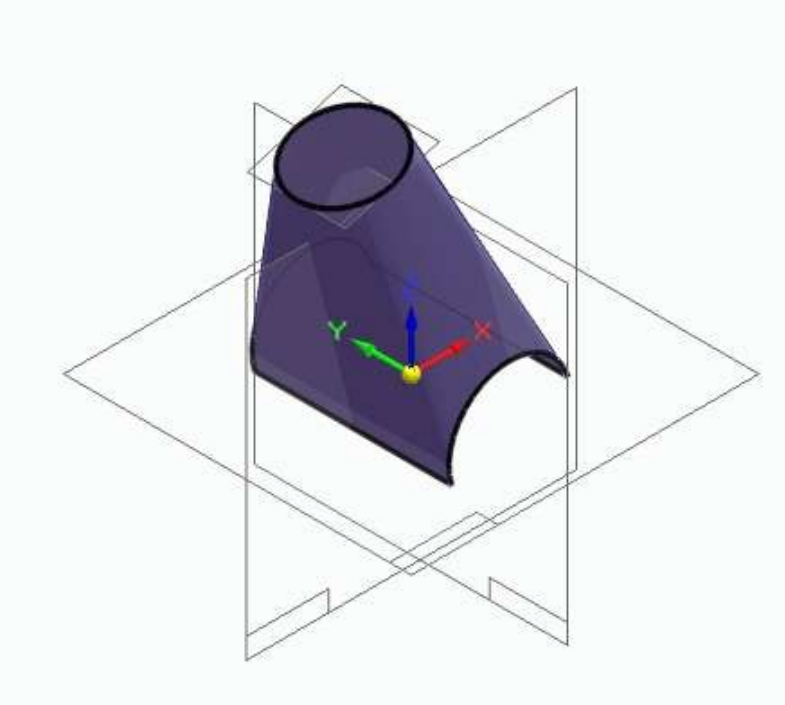


Figura 47 BlueSurf Sillín – Pedalier

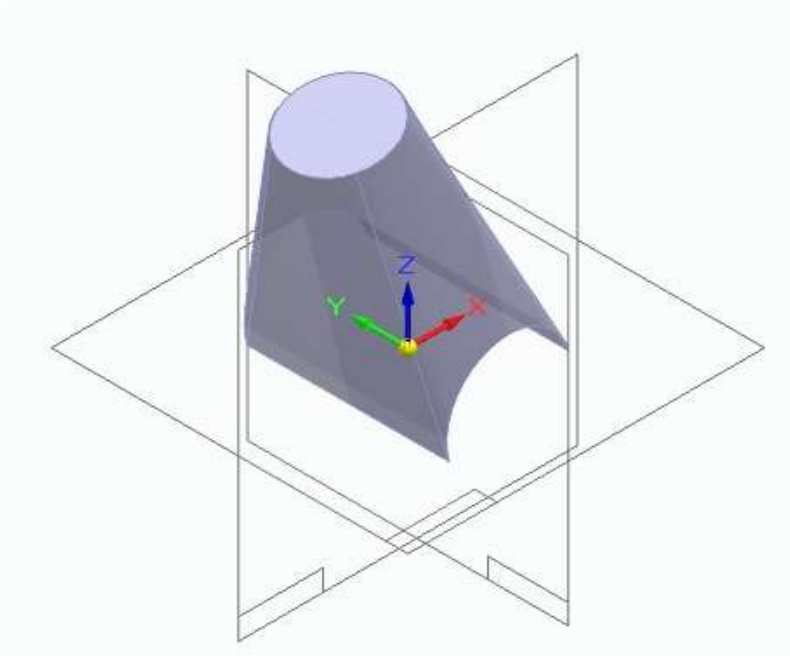


Figura 48 Sitch Sillín – Pedalier

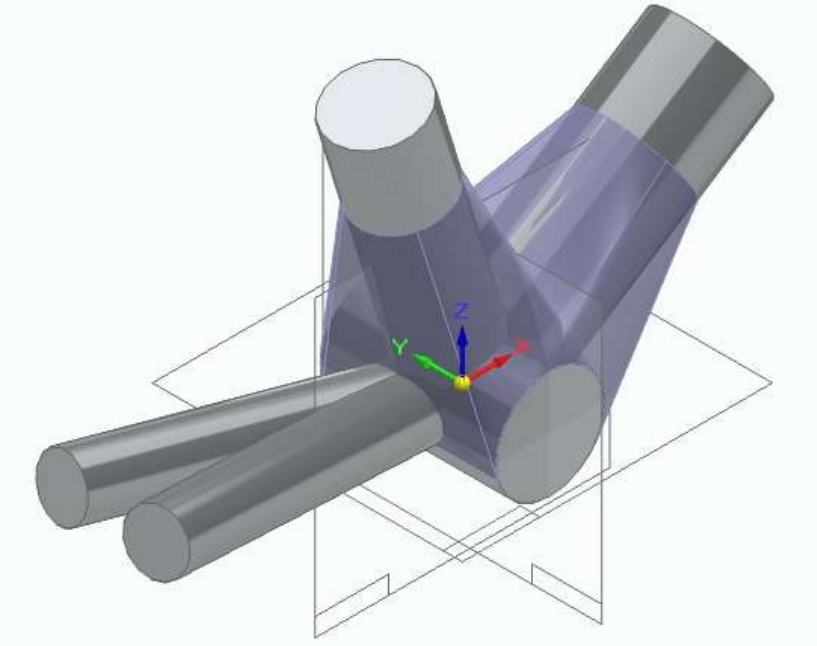


Figura 49 Conjunto Tubos – Conexión Sillín/Pedalier

4.1.3.3 BlueSurf Vainas – Pedalier

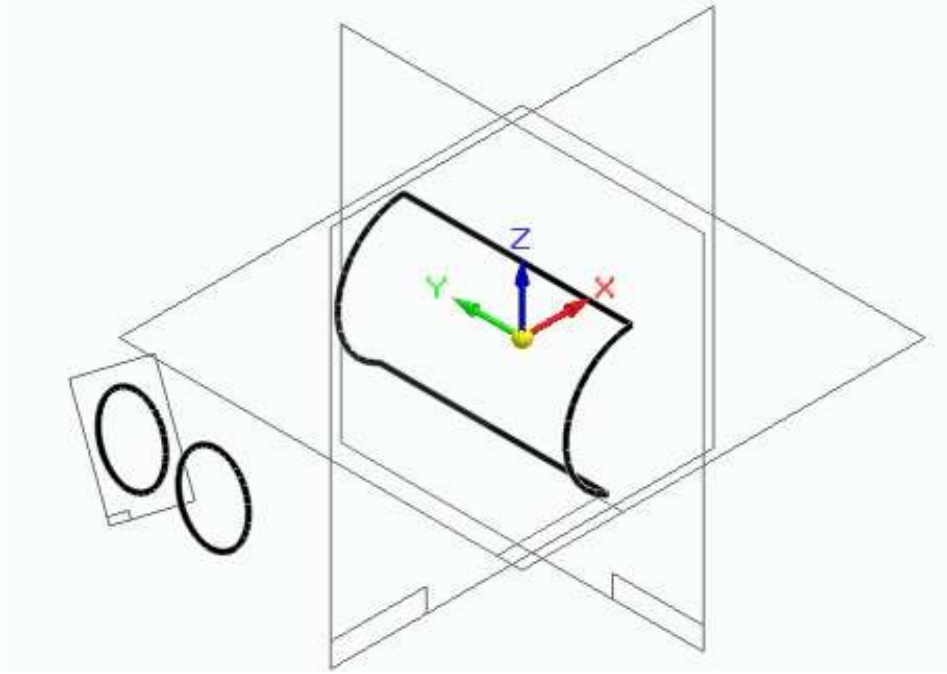


Figura 50 Boceto de las superficies de las BlueSurfs Vainas – Pedalier

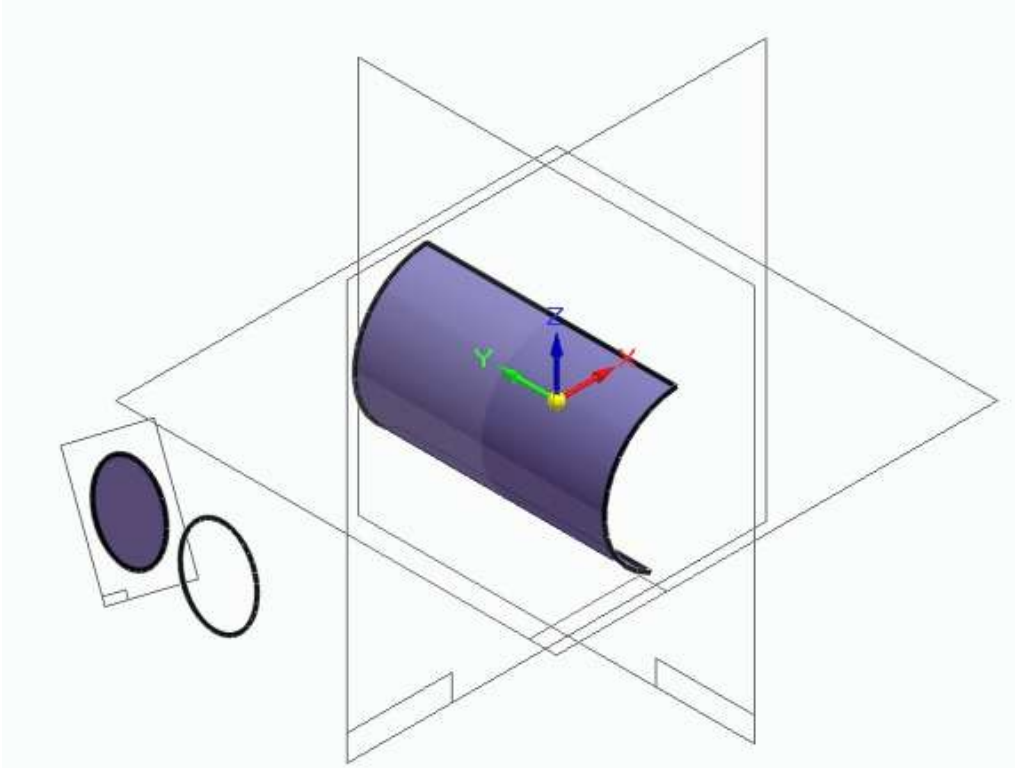


Figura 51 Superficies *de la Vaina 1 – Pedalier*

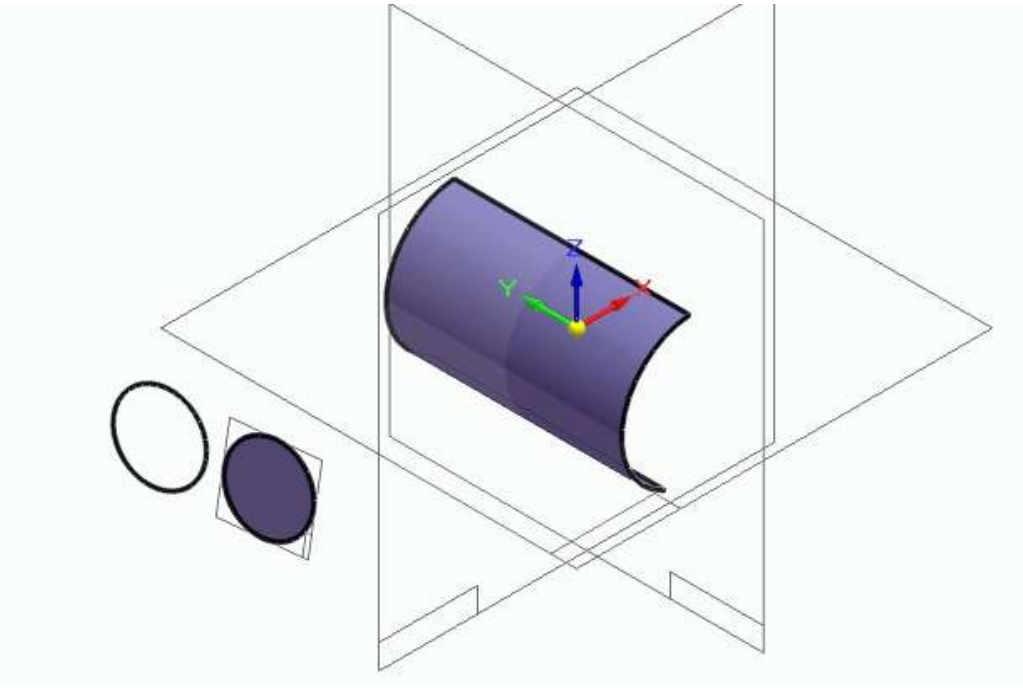


Figura 52 Superficies *de la Vaina 2 – Pedalier*

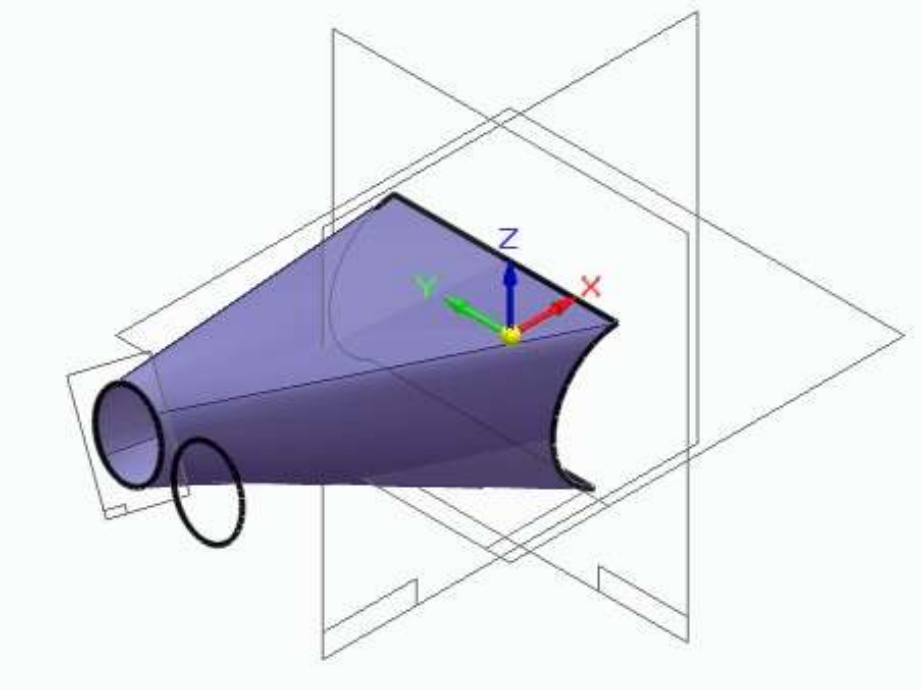


Figura 53 BlueSurf Vaina 1 – Pedalier

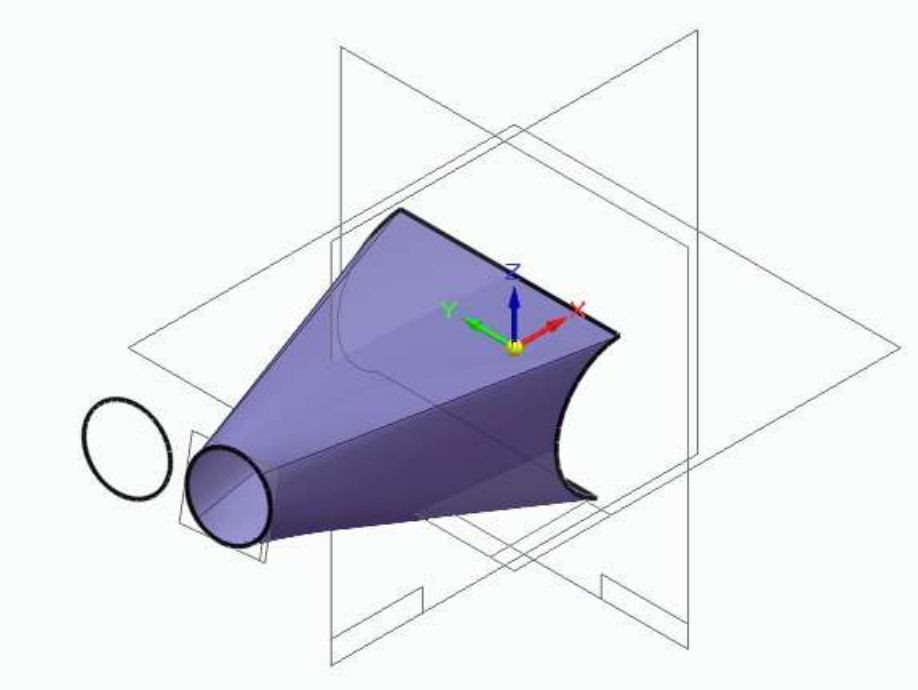


Figura 54 BlueSurf Vaina 2 – Pedalier

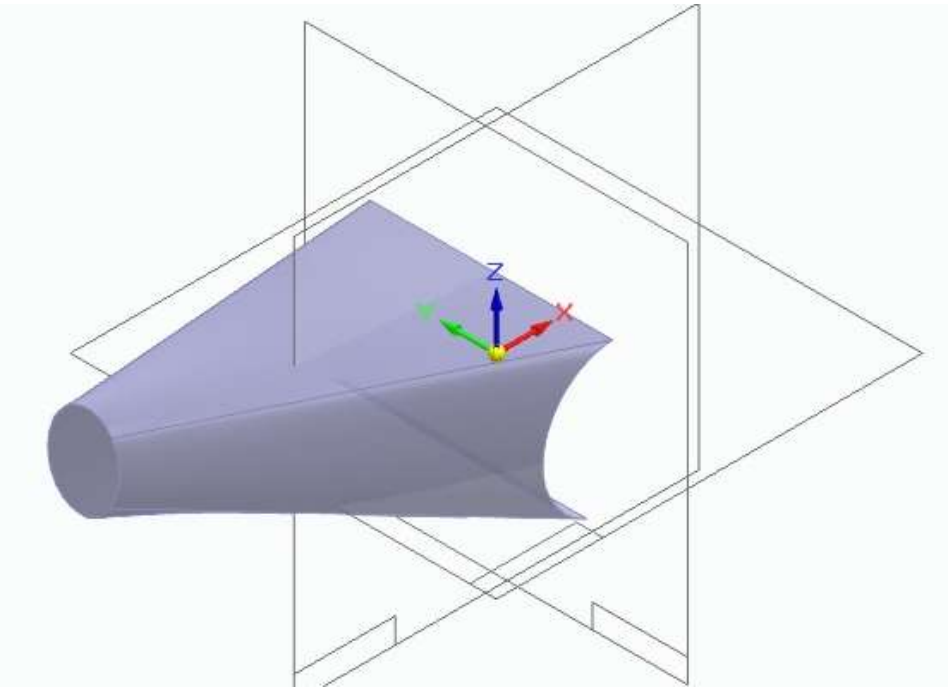


Figura 55 Sitch Vaina 1 – Pedalier

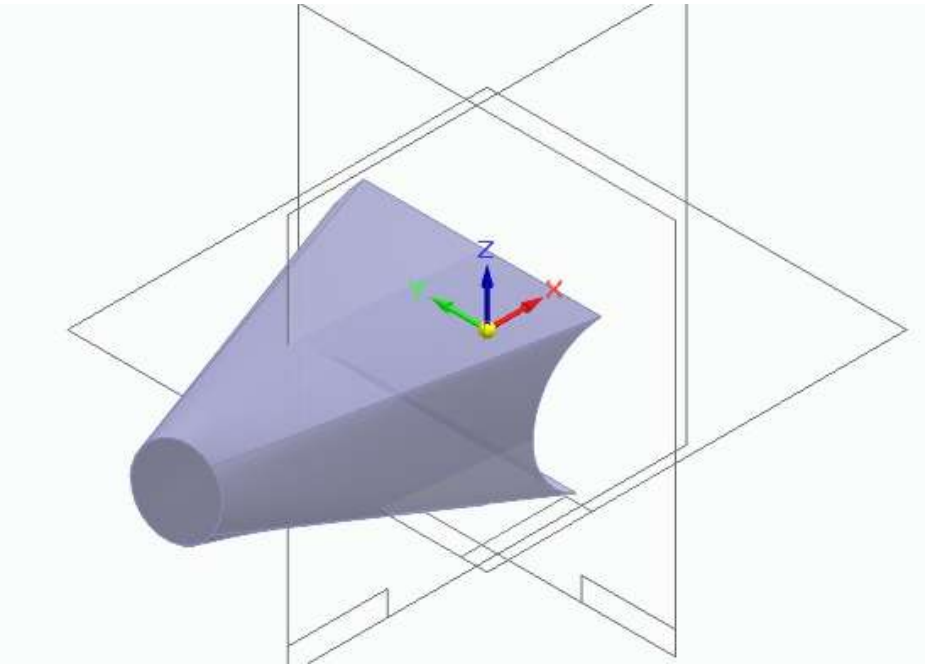


Figura 56 Sitch Vaina 2 – Pedalier

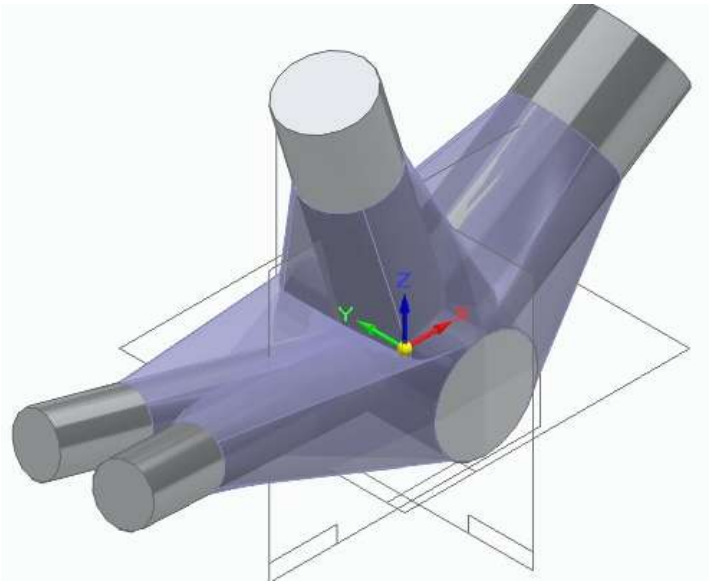


Figura 57 Conjunto Tubos – Conexión Sillín/Pedalier

De esta manera, y mediante las distintas Bluesurfs obtenemos sólidos que dotan a la pieza principal de continuidad evitando concentradores de tensión. Finalmente mediante la Herramienta unión, obtenemos una única pieza.

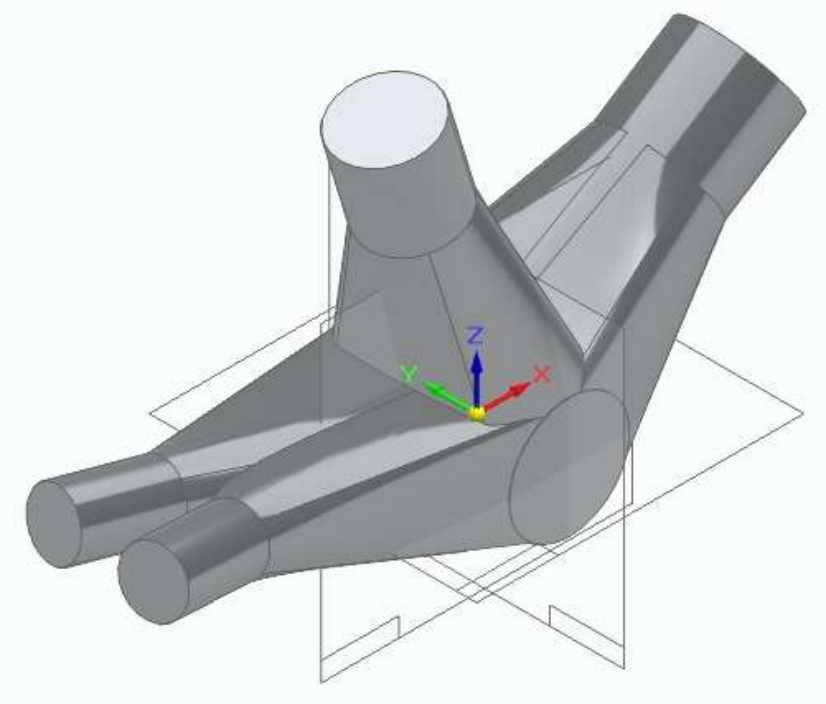


Figura 58 Unión de la primera generación de sólidos

4.1.4 BlueSurfaces de refuerzo

Una vez construidas las primeras BlueSurfaces, se observó que el volumen del cuerpo central resultante era reducido en relación con la complejidad de la unión. Dado que el algoritmo de optimización topológica del apartado 4.3 se encargará de eliminar todo el material que no sea estructuralmente necesario, resulta más conveniente partir de un espacio de diseño generoso. Un volumen de partida mayor le da al algoritmo más libertad para explorar distribuciones de material eficientes y reduce el riesgo de llegar a un óptimo local por falta de material disponible. Por este motivo se añadió una segunda generación de BlueSurfaces tanto en la zona delantera como en la trasera, ampliando el cuerpo central del racor antes de pasar a la fase de optimización.

4.1.4.1 BlueSurfaces de refuerzo de la zona delantera

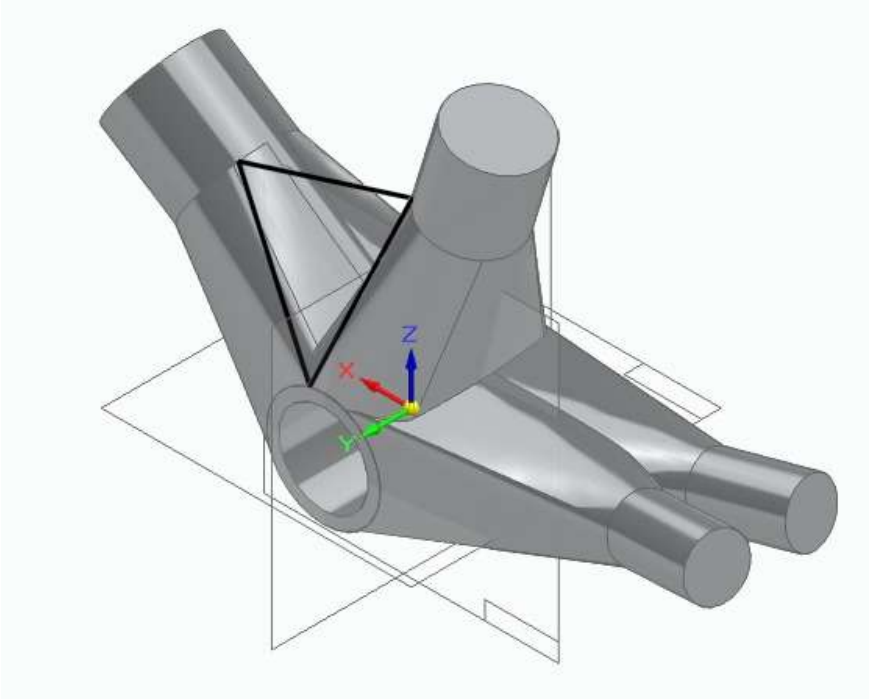


Figura 59 Boceto de apoyo de la BlueSurf de apoyo delantera

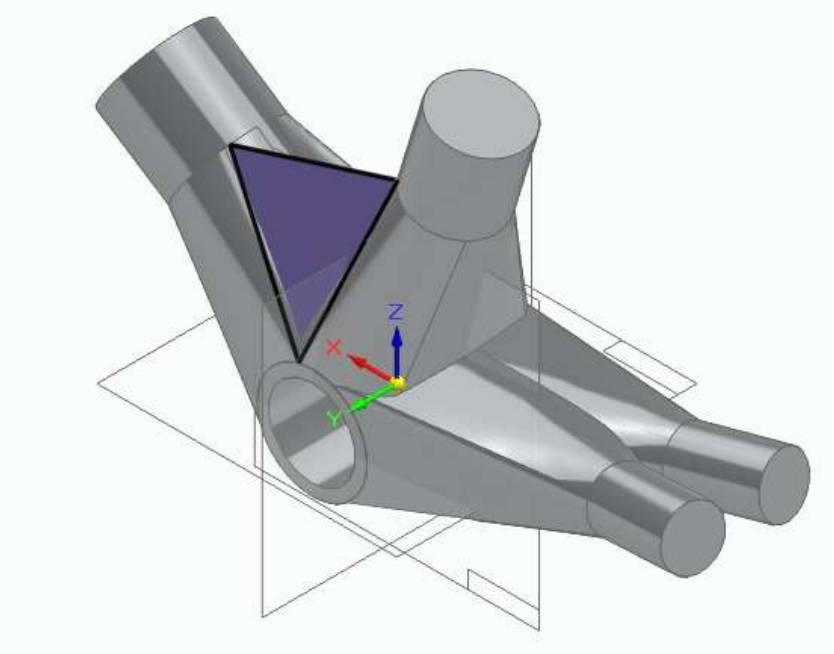


Figura 60 Superficie de apoyo de la BlueSurf de apoyo delantera

Una vez creada la superficie de apoyo, se realiza una simetría respecto del plano vertical con el fin de obtener su homólogo en el lado contrario como se puede apreciar en la siguiente imagen:

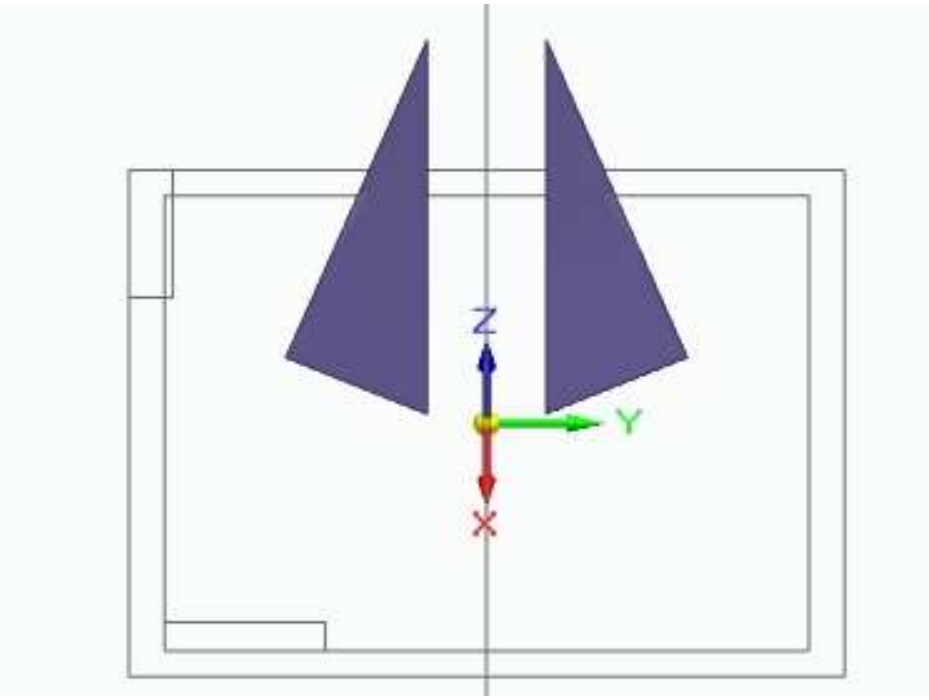


Figura 61 Simetría de la Superficie de apoyo de la BlueSurf de refuerzo delantera

Las siguientes operaciones se basan en crear otras superficies con el fin de crear un conjunto cerrado y poder aplicar la herramienta “Sitch” y crear un sólido

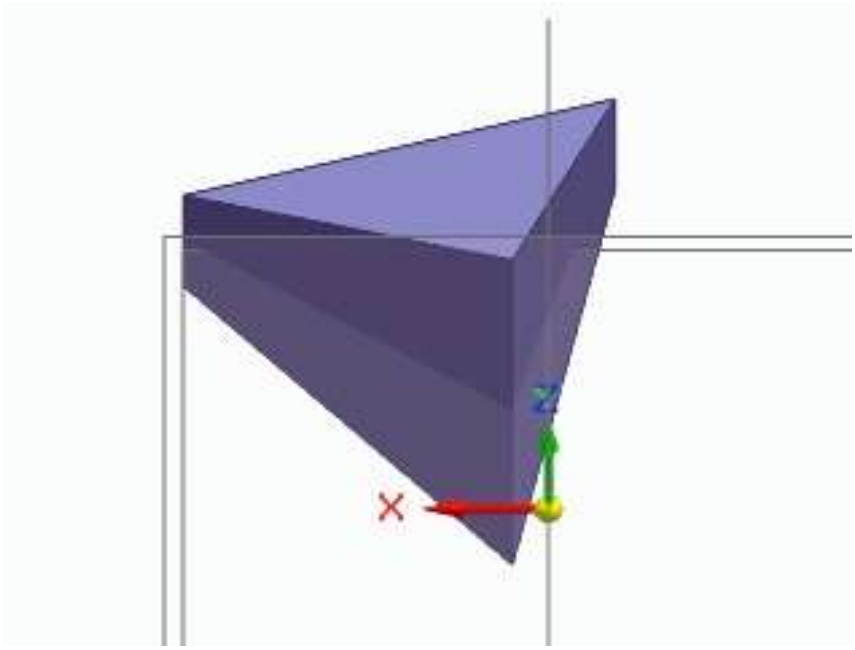


Figura 62 Conjunto de cerrado del refuerzo delantero

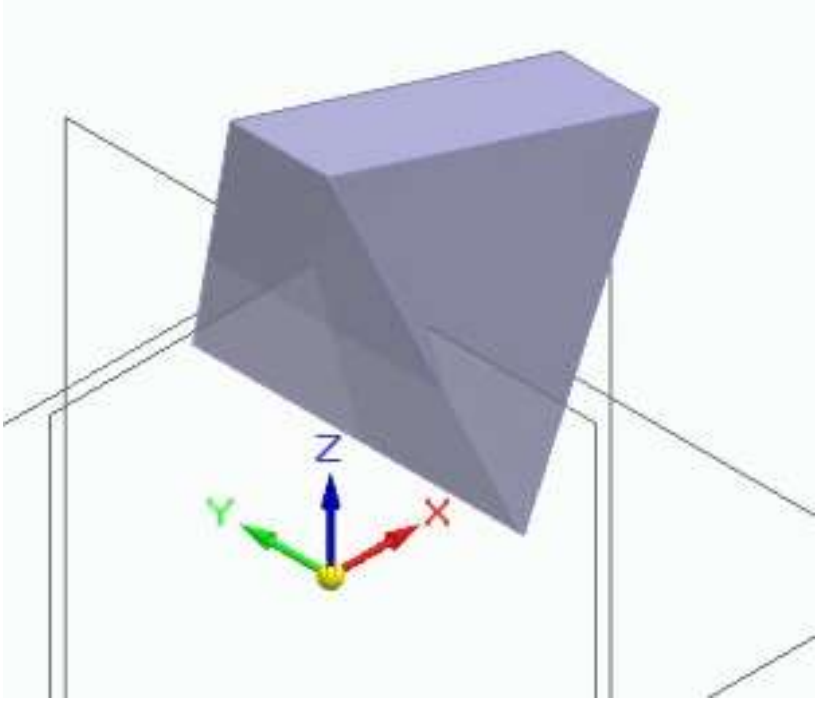


Figura 63 Stich Refuerzo delantero

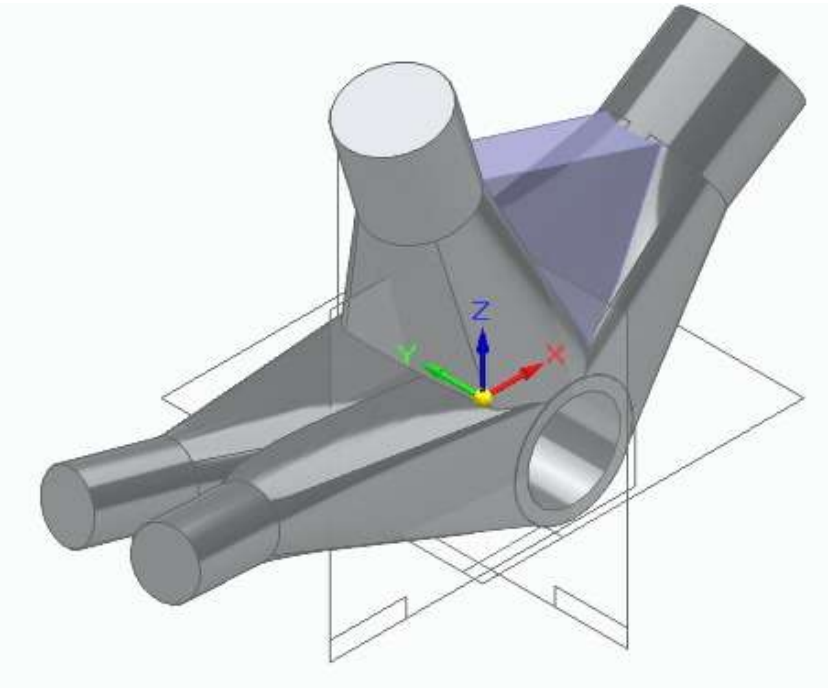


Figura 64 Conjunto Pieza – Refuerzo delantero

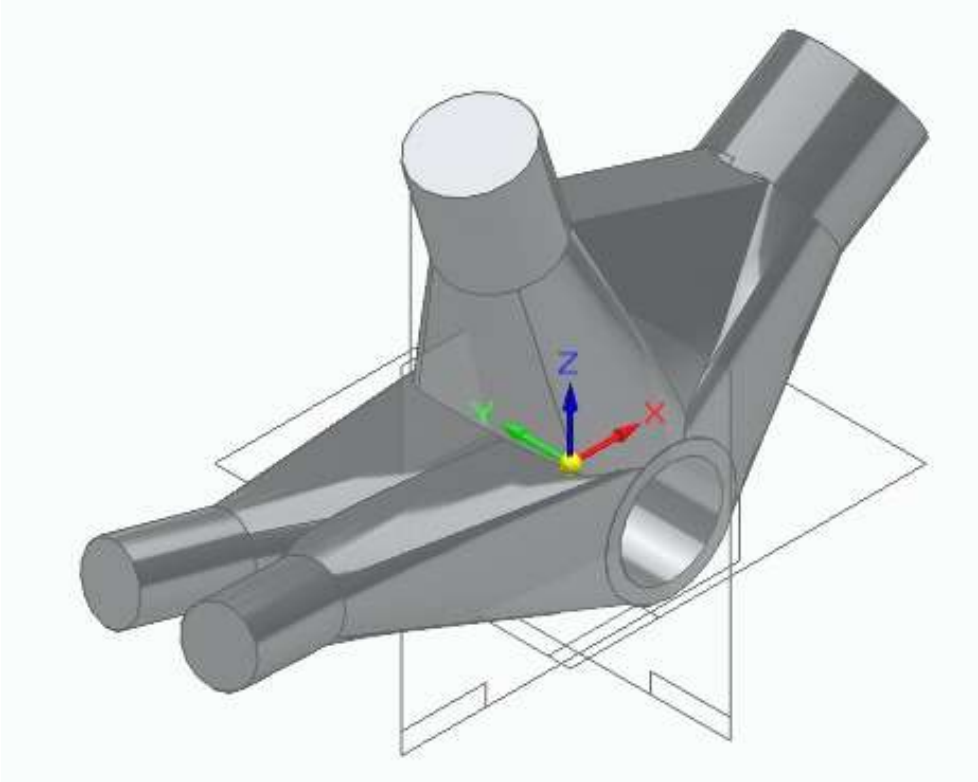


Figura 65 Unión refuerzo pieza

4.1.5

4.1.5.1 BlueSurfaces de la zona trasera y simetría

La zona trasera del racor (la que conecta los tetones de las vainas inferiores con el cilindro del pedalier) se modela de forma análoga. Se construyen las BlueSurfaces que definen las superficies de transición entre las vainas y el tubo del sillín.

Una vez modelada la zona trasera de un lado, se aplica la operación Mirror Body para obtener por simetría la geometría del lado opuesto. Esta operación garantiza la simetría perfecta del racor respecto al plano sagital del cuadro, lo que es fundamental tanto desde el punto de vista estructural (para que las cargas se distribuyan simétricamente) como desde el punto de vista de la fabricación aditiva, donde la simetría simplifica la orientación de impresión y reduce la necesidad de soportes.

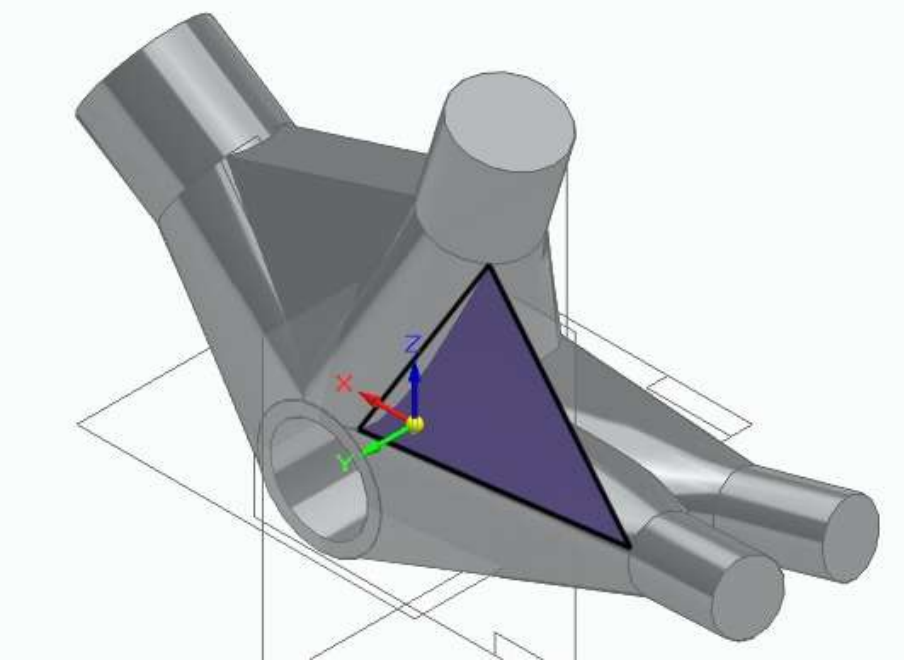


Figura 66 Superficie de Apoyo del Refuerzo trasero

De nuevo, con ayuda de distintos bocetos se crean distintas superficies con el fin de crear un conjunto cerrado y poder aplicar la herramienta Stich.

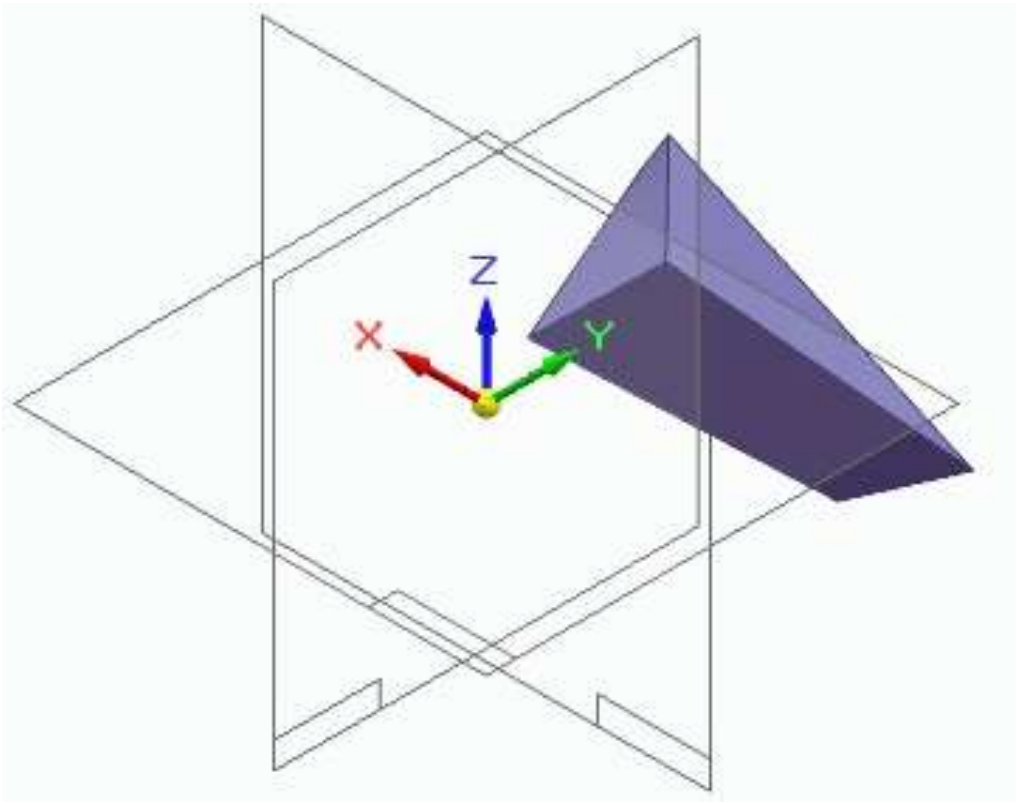


Figura 67 Conjunto cerrado del refuerzo trasero

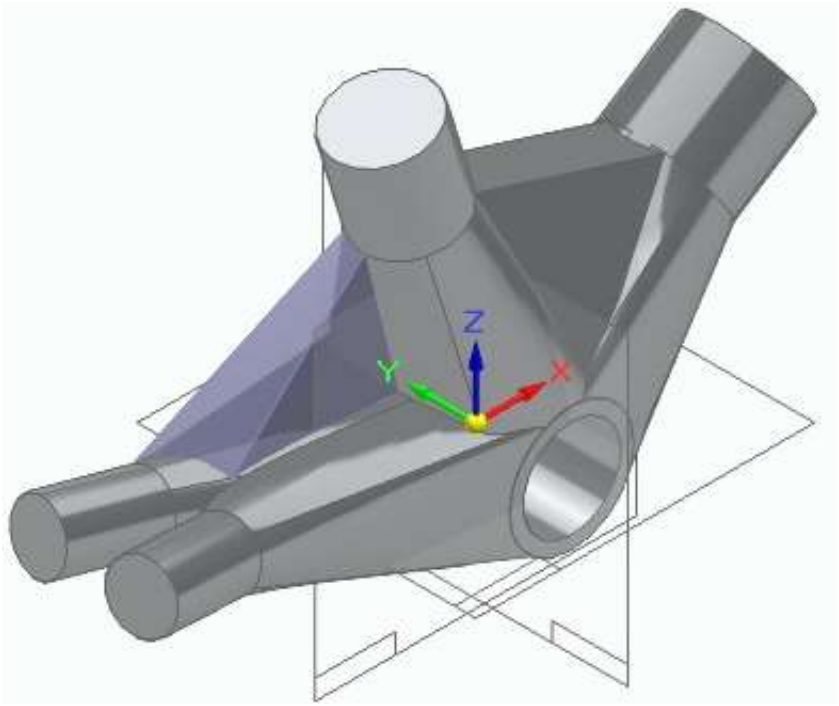


Figura 68 Conjunto Pieza refuerzo

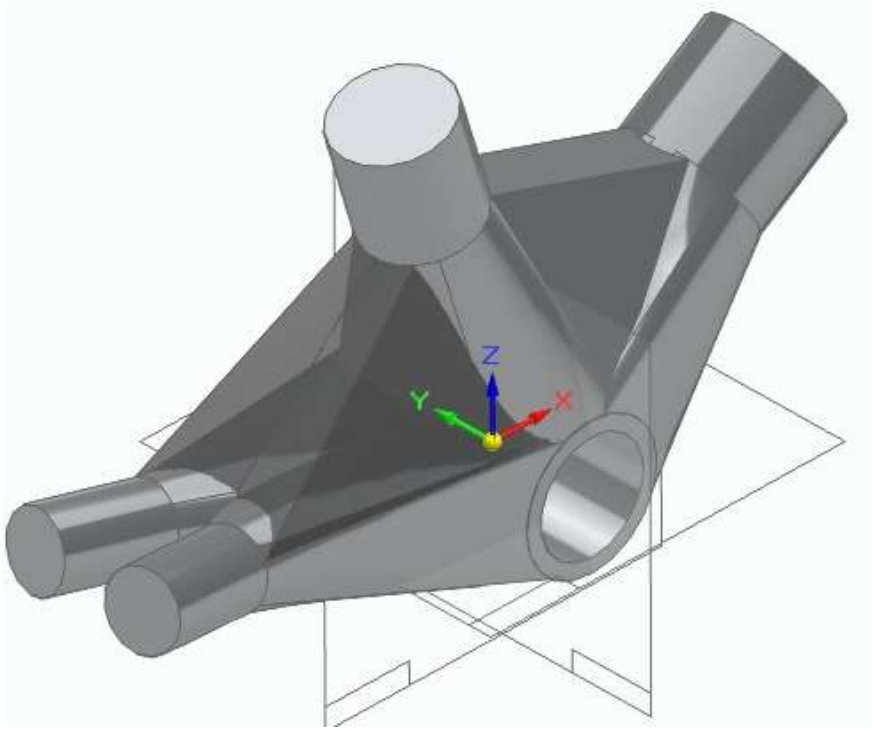


Figura 69 Simetría del refuerzo trasero

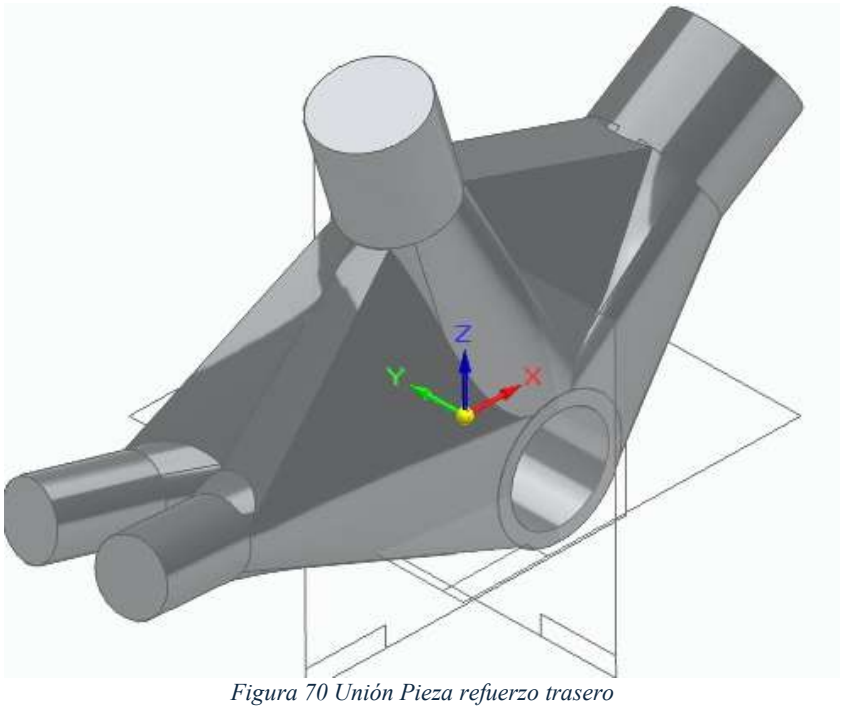


Figura 70 Unión Pieza refuerzo trasero

4.1.6 Redondeos y geometría final del espacio de diseño

El último paso del modelado CAD es la aplicación de redondeos en todas las aristas vivas del sólido. Estos redondeos tienen una doble función: por un lado, eliminan los concentradores de tensión geométricos que aparecerían en las aristas y por otro, facilitan el proceso de impresión 3D, ya que las superficies curvadas son más fáciles de imprimir con buena calidad que las esquinas vivas. El radio de redondeo aplicado es de 3 mm en las transiciones principales y de 1,5 mm en las secundarias.

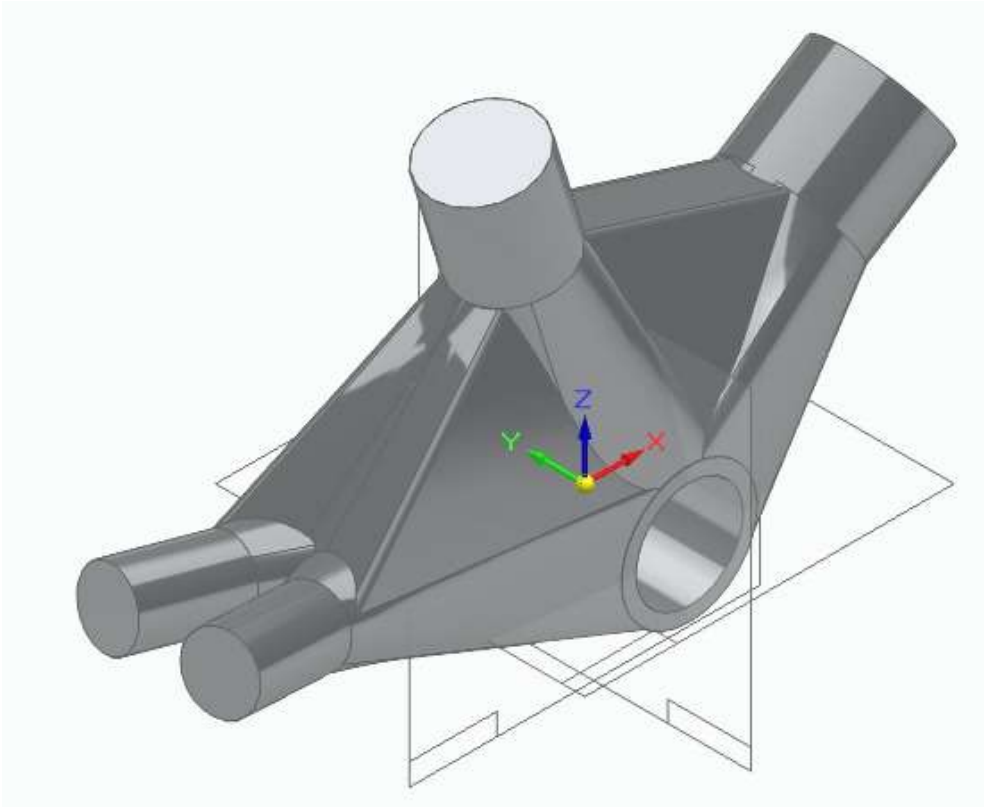


Figura 71 Aplicación de redondeos principales

El resultado es el espacio de diseño completo del racor de pedalier: un sólido macizo que integra los cuatro tetones de inserción orientados según la geometría real del cuadro, el cuerpo central de transición con sección suficiente para garantizar margen de optimización, el alojamiento de la caja del pedalier con estándar BSA, y todas las transiciones suavizadas mediante redondeos. Este sólido, cuya masa total en su versión maciza sirve como referencia

para cuantificar la reducción obtenida tras la optimización, constituye el punto de partida del apartado 4.2.

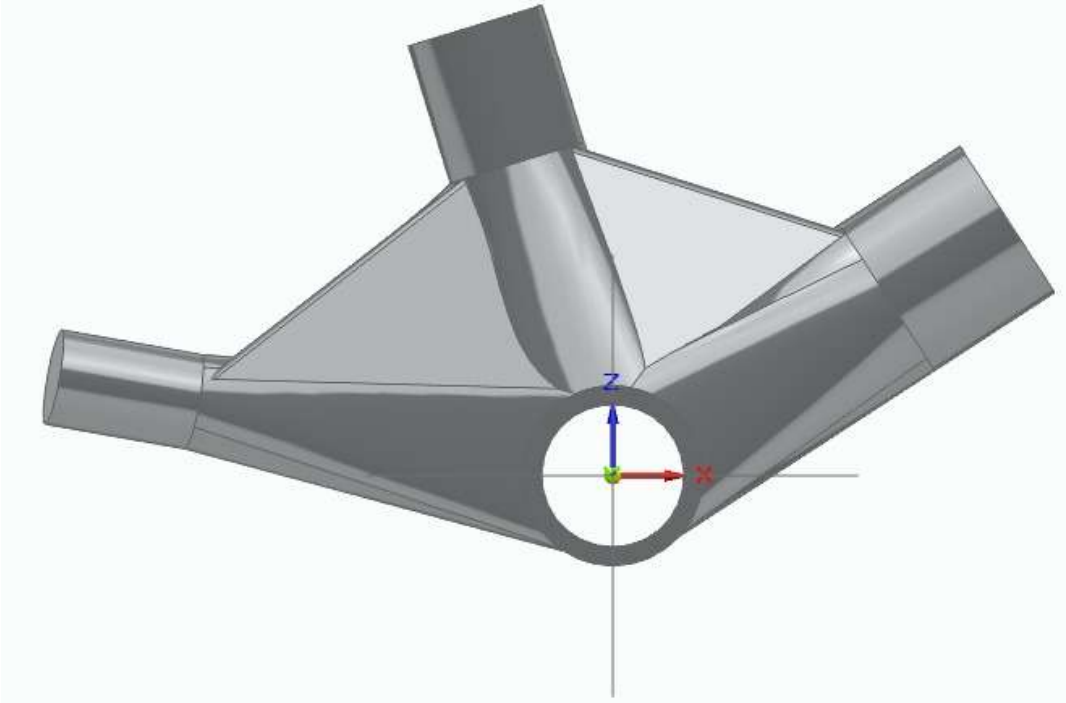


Figura 72 Vista lateral del espacio de diseño final del racor de pedalier.

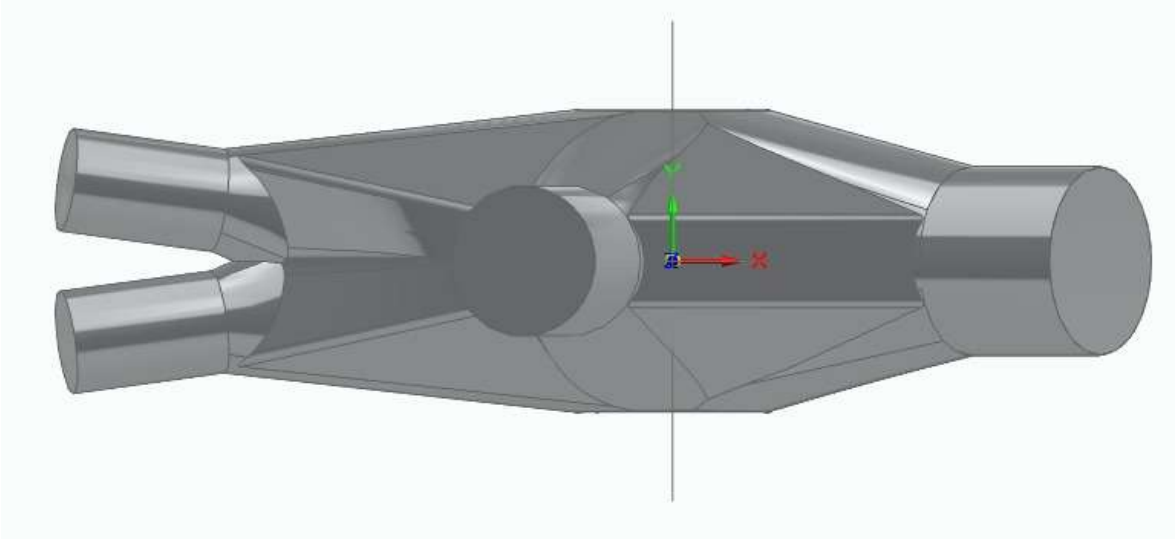


Figura 73 Vista cenital *del espacio de diseño final del racor de pedalier.*

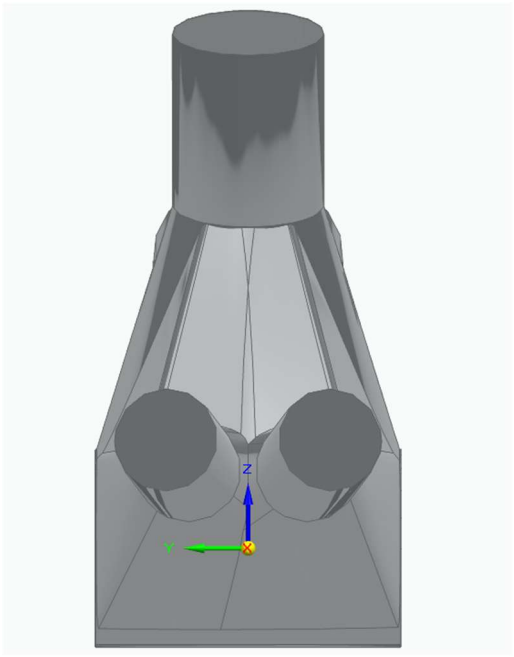


Figura 74 Vista lateral del espacio de diseño final del racor de pedalier.

4.2 Simulación FEM de la geometría base

Antes de lanzar la optimización topológica conviene comprobar que la geometría base se comporta bien bajo las cargas del Capítulo 3. Este paso sirve para dos cosas: primero, confirmar que el modelo no tiene ningún problema estructural de partida; y segundo, obtener el mapa de tensiones que el algoritmo usará para decidir qué material puede quitar y qué material tiene que conservar.

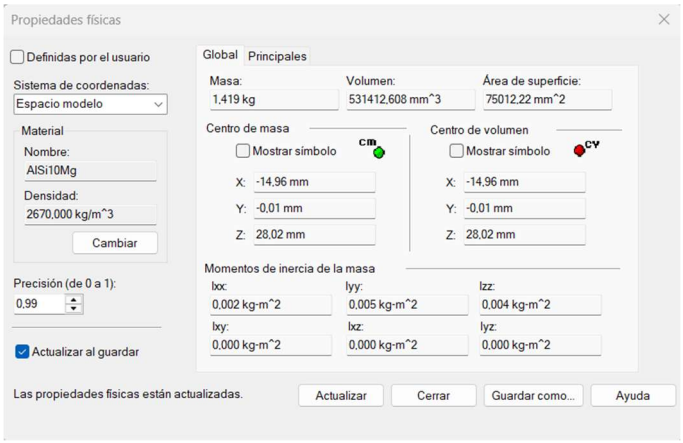


Figura 75 Variables geometría base

4.2.1 Configuración del análisis

La simulación se hace directamente en Solid Edge 2025, sin necesidad de exportar el modelo a otro software. El material asignado es AlSi10Mg en condición as-built, con las propiedades de la Tabla 8 del Capítulo 3: E = 70 GPa, ν = 0,33 y ρ = 2,67 g/cm³.

El mallado se genera automáticamente con tamaño de elemento adaptativo, concentrando más densidad en las zonas de transición entre los tetones y el cuerpo central, donde es más probable que aparezcan las tensiones más altas.

Las condiciones de contorno son las siguientes. El empotramiento se aplica en la superficie interior del cilindro del pedalier, que actúa como punto fijo del sistema. Las cargas se aplican todas a la vez sobre los extremos de los tetones según la tabla y con los valores de la Tabla 5:

Carga	Punto de aplicación	Valor	Dirección
Fuerza de pedaleo (Fp)	Extremo tetón tubo sillín	1.600 N	Axial al tubo
Peso en sillín (W)	Extremo tetón tubo sillín	1.600 N	Vertical
Reacción vainas (RB)	Extremo tetones vainas	996 N	Vertical
Momento torsor (Mp)	Superficie cilindro pedalier	280 N·m	Torsión axial

Tabla 11 Condiciones de contorno de la simulación FEM de la geometría base.

4.2.2 Resultados: mapa de tensiones de Von Mises

La escala de colores va del azul, que corresponde a tensiones bajas, al rojo, que marca los puntos de mayor tensión. Como era de esperar, las zonas más cargadas aparecen en las transiciones entre los tetones y el cuerpo central, que es donde se produce la transferencia de esfuerzos entre los tubos y la unión.

La tensión máxima obtenida es de 9 MPa, en las vainas inferiores. Este valor queda muy por debajo de los 55 MPa admisibles del Capítulo 3, lo que era esperable: el sólido macizo tiene mucho más material del que necesita, así que sus tensiones son bajas. Eso es exactamente lo que le da margen al algoritmo para ir quitando material en el apartado 4.3.

4.2.3 Síntesis de resultados

La Tabla 12 resume los resultados principales y los compara con los criterios del Capítulo 3. En todos los casos la geometría maciza cumple holgadamente, lo que confirma que el espacio de diseño está bien planteado y que las condiciones de contorno son representativas del estado real de carga.

Parámetro	Resultado FEM	Criterio de diseño	¿Cumple?
Tensión máxima Von Mises	9 MPa	≤ 55 MPa	✓
Masa geometría base	1419 g	Referencia	1,419 Kg

Tabla 12 Resultados de la simulación FEM de la geometría base vs. criterios de diseño.

Con la geometría base validada, el apartado 4.3 arranca el proceso de optimización: partiendo de este sólido macizo y del mapa de tensiones obtenido, el algoritmo irá eliminando el material menos solicitado hasta encontrar la distribución que cumple con fatiga usando la menor masa posible.

4.3 Diseño generativo: iteraciones de optimización topológica

Con la geometría base validada en el apartado 4.2, se empieza el proceso de optimización topológica con el módulo de diseño generativo de Solid Edge 2025. El objetivo es reducir la masa del racor quitando el material que menos trabaja estructuralmente, sin que en ningún punto la tensión de Von Mises supere los 55 MPa del Capítulo 3.

El proceso tiene dos fases. En la primera se hacen iteraciones subiendo de 10% en 10% (30%, 40%, 50%, 60%...) hasta que el software no pueda cumplir las restricciones. En la segunda se afina con una búsqueda binaria dentro del rango donde se produce el fallo: si falla entre 40% y 50%, se prueba 49% y así sucesivamente hasta dar con el porcentaje máximo entero que cumple. Esa es la geometría óptima que se refinará en el 4.4.

Para cada iteración se muestran dos imágenes: la geometría resultante y el mapa de tensiones de Von Mises que confirma si se cumple o no el criterio acompañado de los datos de la pieza resultante

4.3.1 Configuración del estudio generativo

Antes de ejecutar las iteraciones, se configura el estudio de diseño generativo en Solid Edge con los siguientes parámetros, coherentes con las especificaciones de la Tabla 9 del Capítulo 3:

Parámetro	Valor configurado
Material	AlSi10Mg (as-built)
Tensión admisible máxima	55 MPa
Zonas preservadas	Tetones (35 mm) + alojamiento pedalier BSA
Condiciones de contorno	Empotramiento en cilindro pedalier
Cargas aplicadas	Fuerzas normales en extremos de tetones (Tabla 10)
Calidad de malla	Media-alta (calidad 4 sobre 5)
Restricción de fabricación	Sin cavidades internas cerradas

Tabla 13 Parámetros de configuración del estudio de diseño generativo.

4.3.2 Fase 1: exploración por incrementos del 10%

Se empieza probando reducciones del 10%, 20%, 30%, 40%, 50% y 60% de forma consecutiva. En cada caso se lanza el estudio generativo y se comprueba que la tensión máxima no pasa de 55 MPa.

Iteración 1 — Reducción del 10%

Se fija un objetivo de reducción del 10%. El algoritmo trabaja respetando los tetones y el alojamiento del pedalier como zonas preservadas y trata de eliminar el máximo volumen posible del cuerpo central sin superar los 55 MPa.

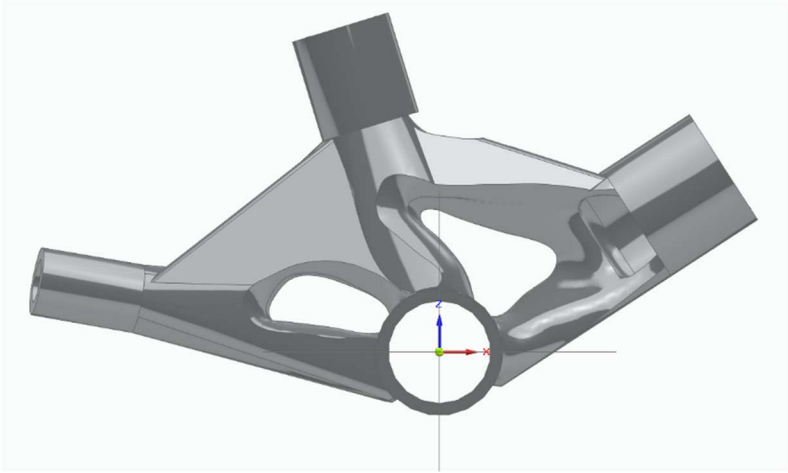


Figura 76 Geometría optimizada con reducción del 10% de masa.

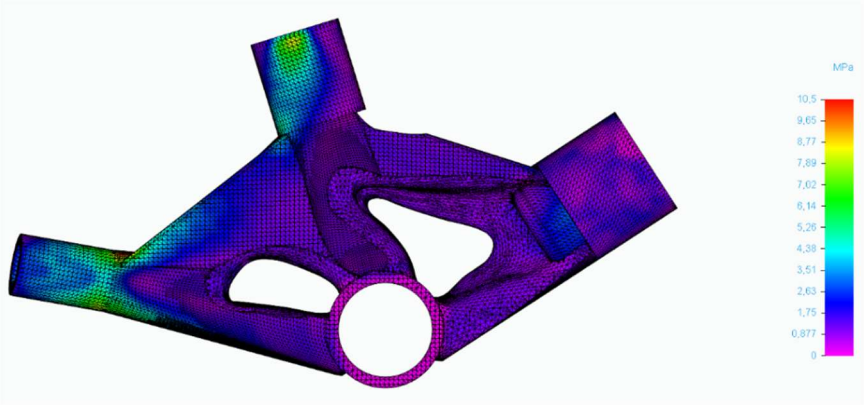


Figura 77 Distribución de tensiones de Von Mises — iteración 1 (10%).

La tensión máxima es de 10,5 MPa, por debajo del límite. El margen es amplio, lo que indica que el algoritmo puede quitar bastante más material. Se sube al 20%.

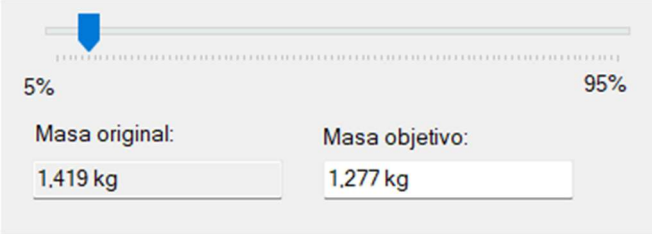


Figura 78 Masa pieza — iteración 1 (10%).

Iteración 2 — Reducción del 20%

Se sube el objetivo al 20%. Las zonas preservadas siguen siendo las mismas y el algoritmo tiene más margen para trabajar.

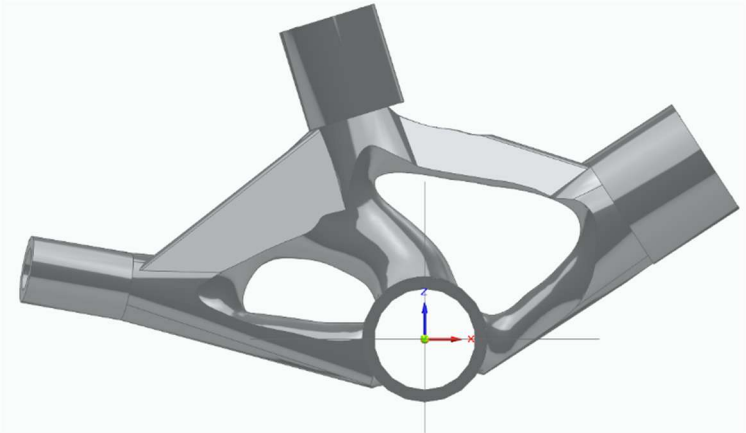


Figura 79 Geometría optimizada con reducción del 40% de masa.

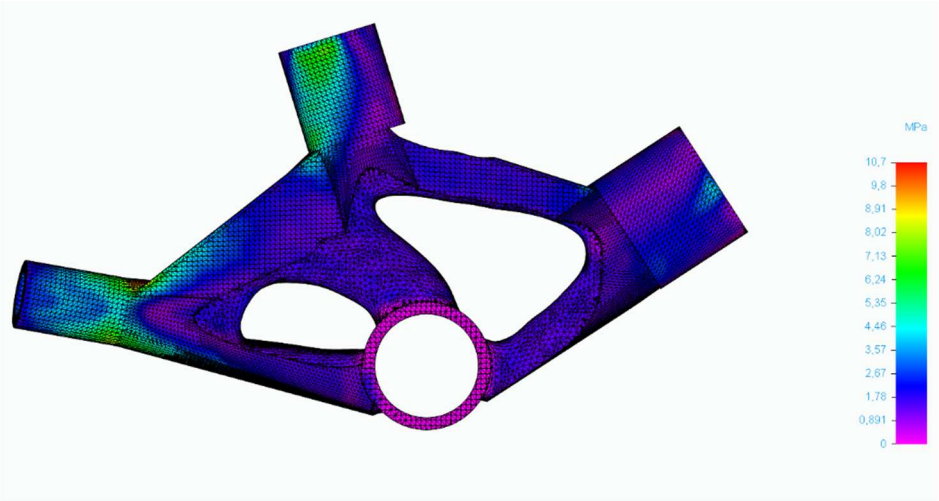


Figura 80 Distribución de tensiones de Von Mises — iteración 2 (20%).

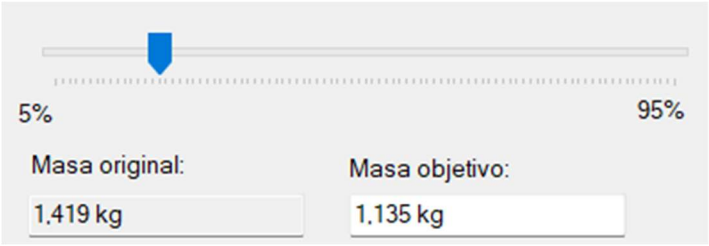


Figura 81 Masa pieza — iteración 2 (20%).

La tensión máxima sube a 10,7 MPa pero sigue siendo inferior a 55 MPa. Hay margen todavía. Se continúa subiendo.

Iteración 3 — Reducción del 30%

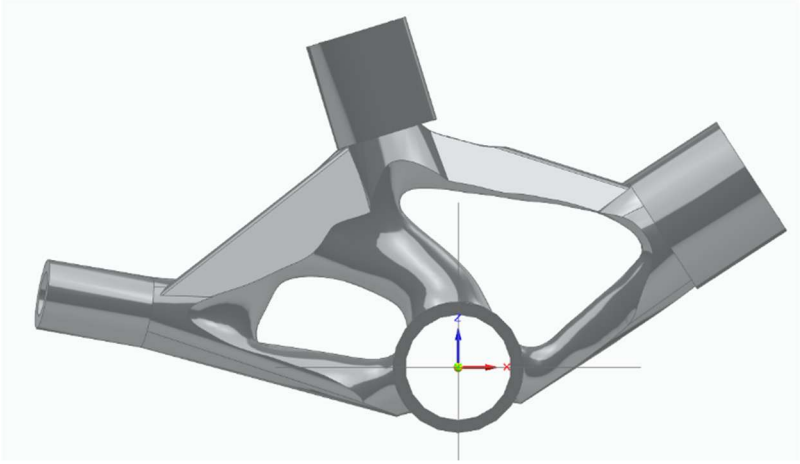


Figura 82 Geometría optimizada con reducción del 30% de masa.

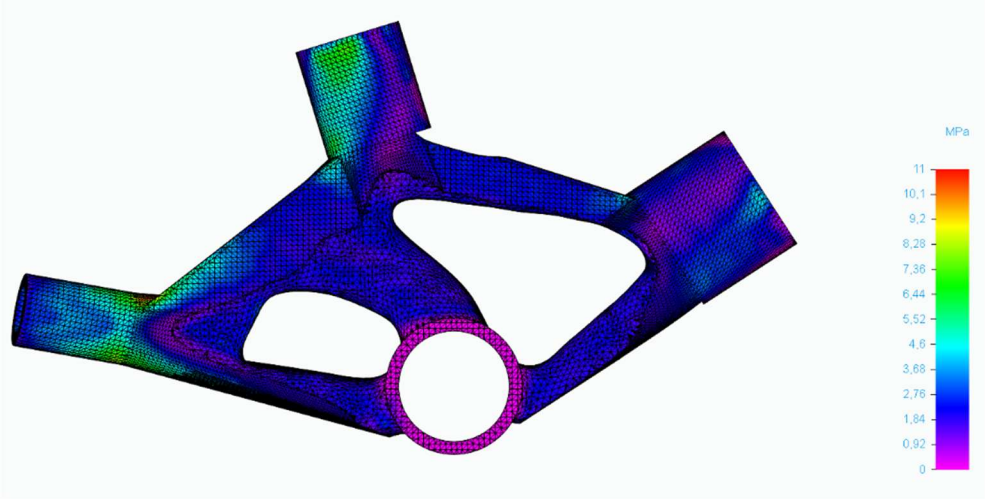


Figura 83 Distribución de tensiones de Von Mises — iteración 3 (30%).

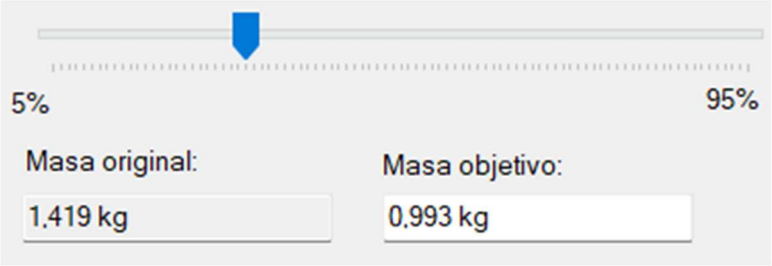


Figura 84 Masa pieza — iteración 2 (20%).

La tensión máxima alcanza 11 MPa, todavía por debajo del límite. Se intenta el 40%.

Iteración 4 — Reducción del 40%

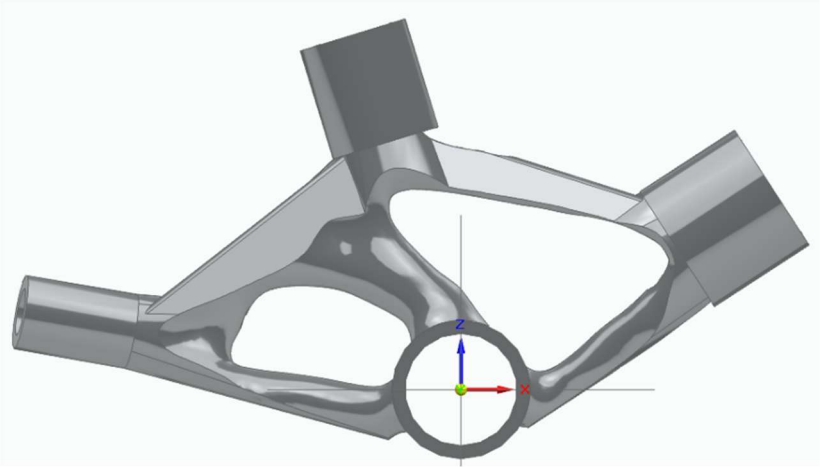


Figura 85 Geometría optimizada con reducción del 40% de masa.

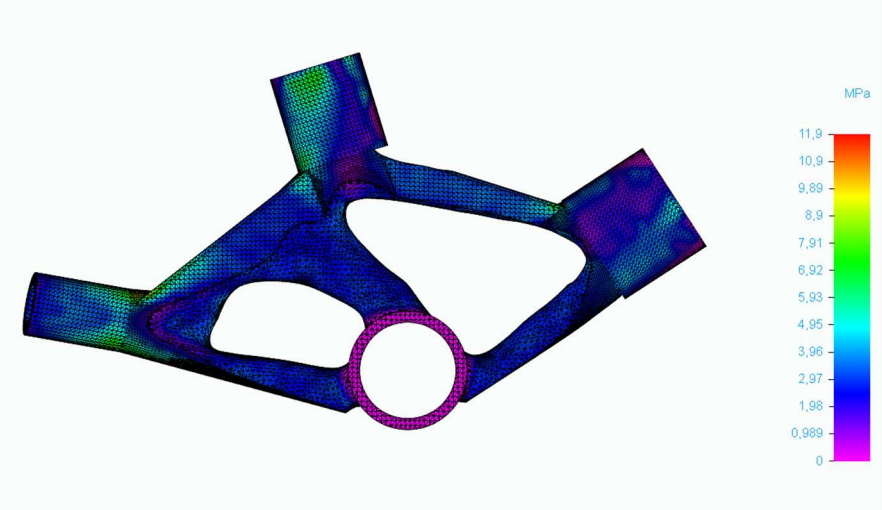


Figura 86 Distribución de tensiones de Von Mises — iteración 4 (40%).

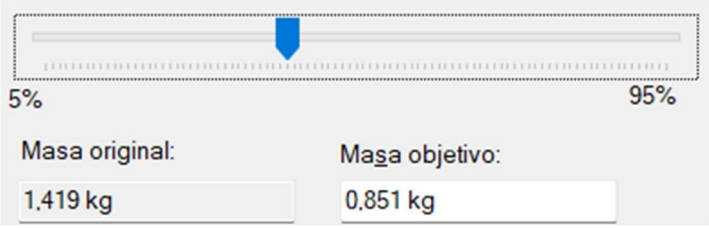


Figura 87 Masa pieza — iteración 4 (20%).

La tensión máxima alcanza 11,9 MPa, todavía por debajo del límite. Se intenta el 50%.

Iteración 5 — Reducción del 50%

Se sube el objetivo al 50%. Las zonas preservadas siguen siendo las mismas y el algoritmo tiene más margen para trabajar.

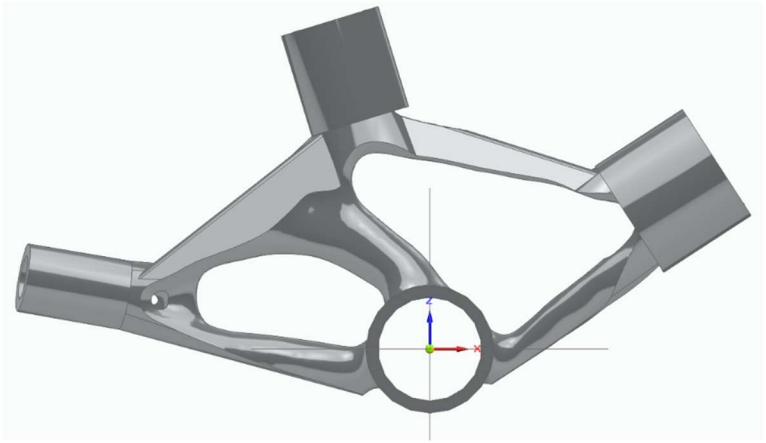


Figura 88 Geometría optimizada con reducción del 50% de masa.

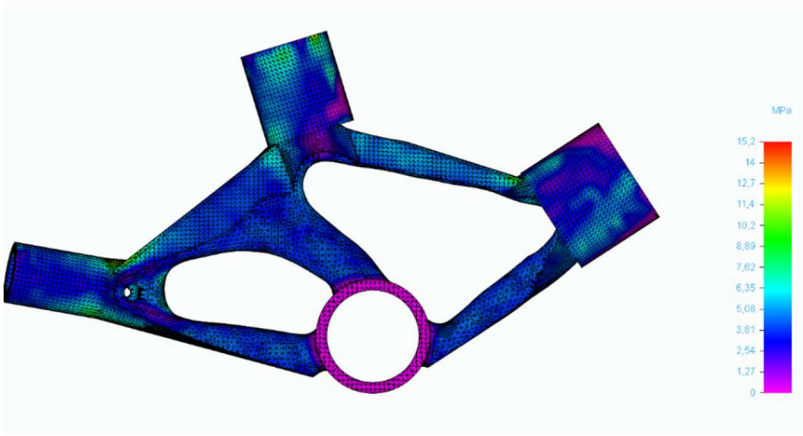


Figura 89 Distribución de tensiones de Von Mises — iteración 5 (50%).

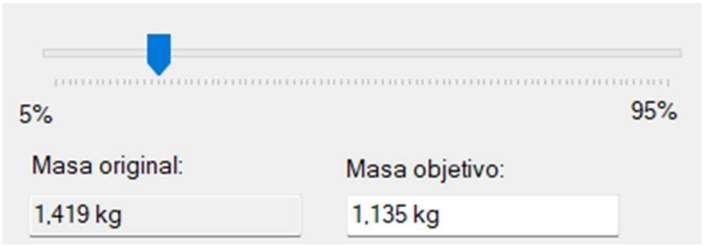


Figura 90 Masa pieza — iteración 5 (50%).

La tensión máxima sube a 15,2 MPa pero sigue siendo inferior a 55 MPa. Hay margen todavía pero se empieza a ver la geometría cada vez más depurada. Se continúa subiendo.

Iteración 6 — Reducción del 60%

Se sube el objetivo al 60%. Las zonas preservadas siguen siendo las mismas y el algoritmo tiene más margen para trabajar.

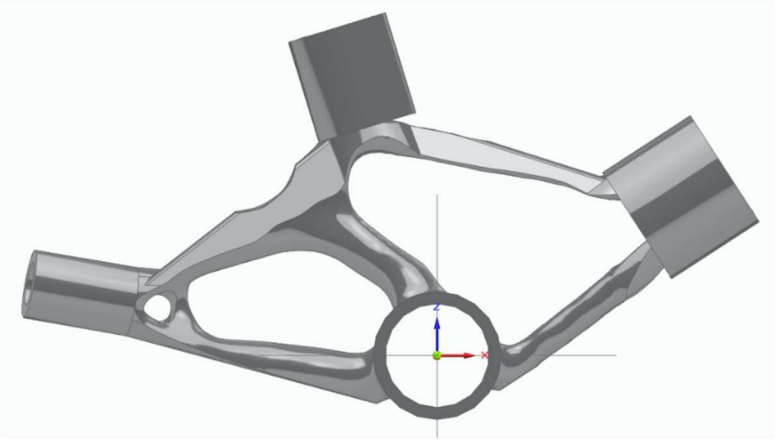


Figura 91 Geometría optimizada con reducción del 70% de masa.

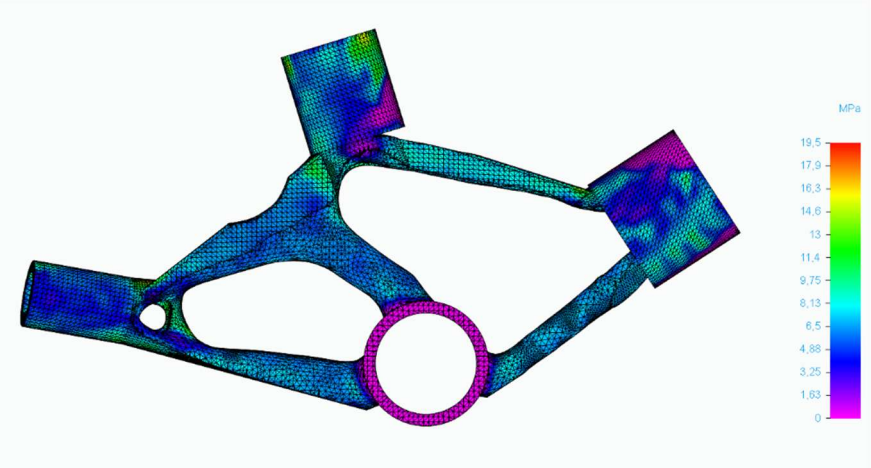


Figura 92 Distribución de tensiones de Von Mises — iteración 7 (70%).

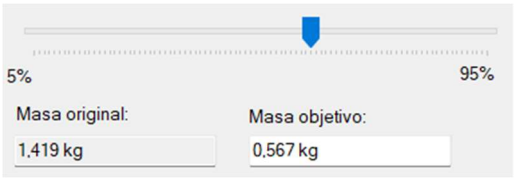


Figura 93 Masa pieza — iteración 6 (60%).

La tensión máxima sube a 19,5 MPa pero sigue siendo inferior a 55 MPa. Hay margen todavía, la geometría cada vez es más agesiva. Se continúa subiendo.

Iteración 7 — Reducción del 70% (fallo)

Al intentar el 70% el software no puede cumplir a la vez la restricción de tensión y el objetivo de reducción de masa. La iteración se descarta y se pasa a la fase de refinamiento.

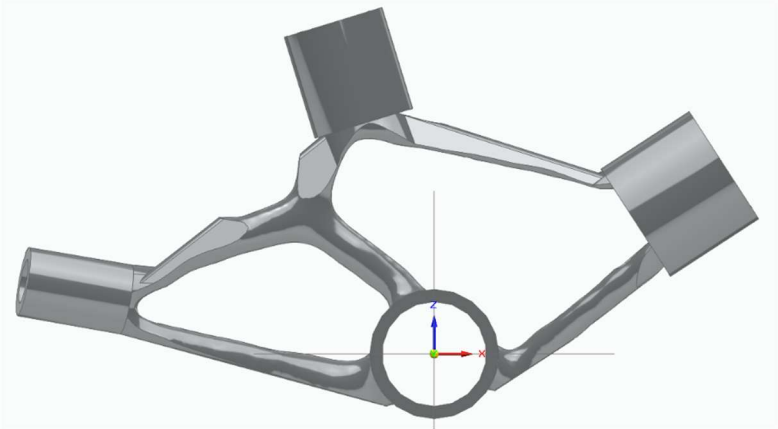


Figura 94 Geometría optimizada con reducción del 70% de masa.

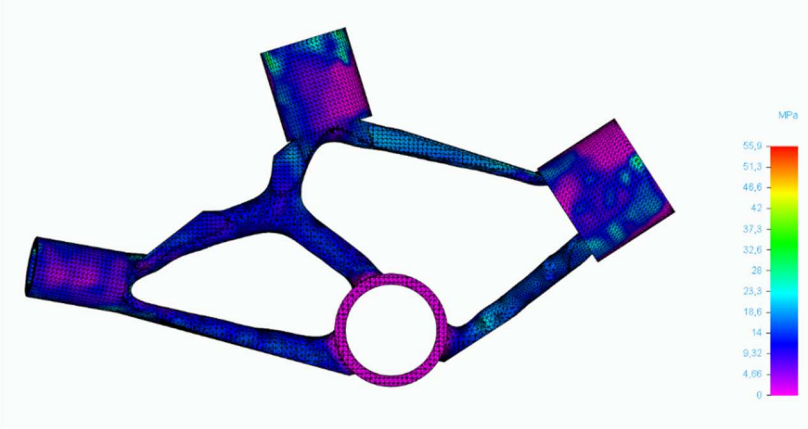


Figura 95 Distribución de tensiones de Von Mises — iteración 7 (70%).

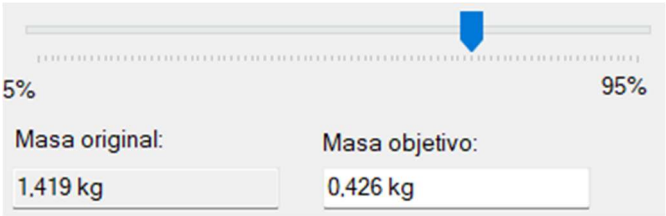


Figura 96 Masa pieza — iteración 7 (70%).

La tensión máxima sube a 55,9 MPa, superior a 55 MPa. El diseño no cumple. El fallo en el 70% acota el óptimo entre el 60% y el 70%. Se pasa a la búsqueda del óptimo.

4.3.3 Fase 2: refinamiento por búsqueda

Con el rango acotado entre 60% y 70%, se aplica la búsqueda para encontrar el máximo porcentaje entero que cumple la restricción de tensión. Converge en pocas iteraciones.

Iteración 8 — Reducción del 69%

Se prueba el punto del rango: 69%. Las zonas preservadas se mantienen igual que en las iteraciones

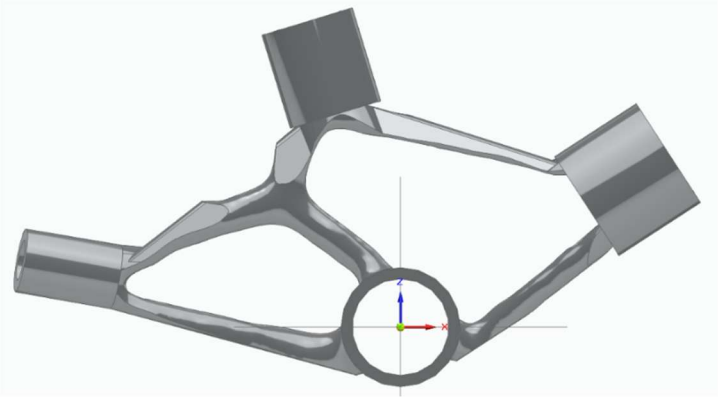


Figura 97 Geometría optimizada con reducción del 69% de masa.

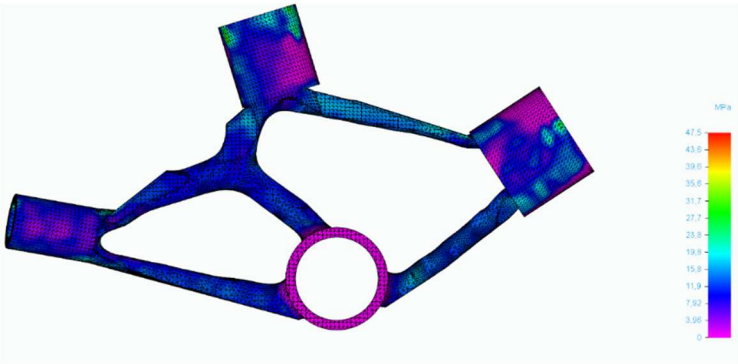
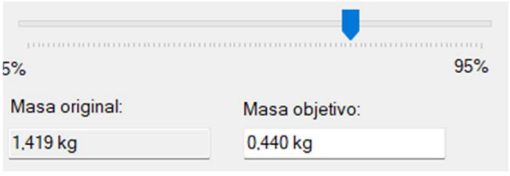


Figura 98 Distribución de tensiones de Von Mises — iteración 8 (69%).



1

Figura 99 Masa pieza — iteración 8 (69%).

Tensión máxima de 47,5 MPa, válida.

4.3.4 Resumen de iteraciones y selección de la geometría óptima

La Tabla 13 recoge el resumen de todas las iteraciones con el porcentaje de reducción, la tensión máxima y el resultado de cada una.

Iteración	Reducción (%)	Tensión máx. (MPa)	σ_adm = 55 MPa	Resultado
1	10	10.5	≤ 55 MPa	✓ Válida
2	20	10,7	≤ 55 MPa	✓ Válida
3	30	11	≤ 55 MPa	✓ Válida
4	40	11,9	≤ 55 MPa	✓ Válida
5	50	15,2	≤ 55 MPa	✓ Válida
6	60	19,5	≤ 55 MPa	✓ Válida
7	70	55,9	≥ 55 MPa	✗ Fallo
8	69	47,5	≤ 55 MPa	✓ Válida

Tabla 14 Resumen de iteraciones del proceso de optimización topológica.

La geometría óptima es la de la iteración 8, con una reducción del 69% respecto al macizo inicial. Dicho de otra forma, el racor optimizado pesa aproximadamente el 31% de lo que pesaba el sólido de partida, un ahorro significativo sin comprometer en ningún punto el criterio de fatiga.

Ahora bien, la geometría que devuelve el algoritmo tiene un aspecto facetado y rugoso, con transiciones bruscas entre las zonas que conserva y las que elimina. Aunque estructuralmente es correcta, no está lista para imprimir directamente. Por eso el apartado 4.4 se dedica a refinarla con la herramienta PolyNURBS de Altair Inspire, transformándola en una superficie suave y continua apta para la fabricación aditiva.

4.4 Refinamiento geométrico con PolyNURBS

La geometría que devuelve el algoritmo de optimización topológica en el apartado 4.3 es estructuralmente válida pero geométricamente incompatible: sus superficies tienen aristas vivas entre las zonas conservadas y las eliminadas, y sus transiciones no son suaves. Esta geometría, tal y como sale del software, no es apta para la fabricación aditiva por dos

razones. La primera es que el slicer necesita una superficie continua y bien definida para generar las trayectorias de impresión. La segunda es que las aristas agudas son concentradores de tensión que degradarían el comportamiento a fatiga que es precisamente el criterio que hemos intentado optimizar.

Para resolver esto se emplea la herramienta PolyNURBS de Altair Inspire, que permite trazar superficies NURBS suaves sobre la geometría facetada del resultado del algoritmo [41], respetando su forma general pero eliminando las discontinuidades. El proceso consiste en ir colocando cajas de control PolyNURBS sobre las distintas regiones de la geometría optimizada y ajustar su forma hasta que la superficie resultante se aproxima al resultado del algoritmo sin perder las propiedades estructurales que lo hacen válido.

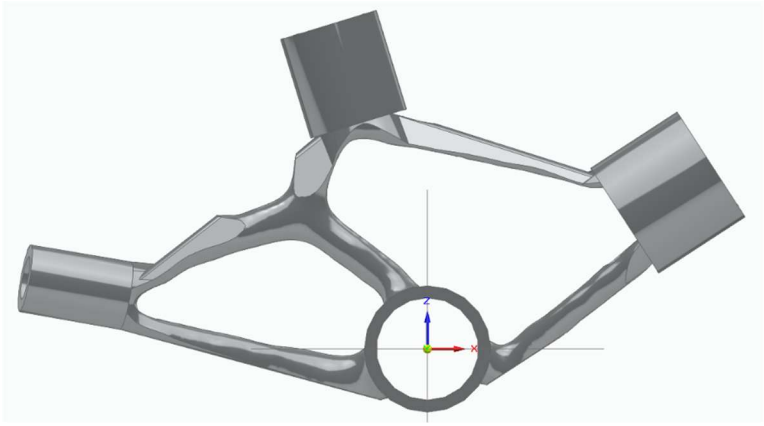


Figura 100 Geometría optimizada antes del refinamiento con PolyNURBS.

El criterio seguido durante el refinamiento es conservador: en las zonas donde hay dudas sobre si la superficie refinada recoge suficiente material respecto a la geometría optimizada, se opta siempre por el lado que añade material. Esto garantiza que la pieza refinada es al menos tan resistente como la geometría óptima calculada, aunque pueda tener una masa ligeramente superior. Una vez terminado el refinamiento, se exporta la geometría como archivo STEP para su uso en las fases de fabricación y verificación FEM final.

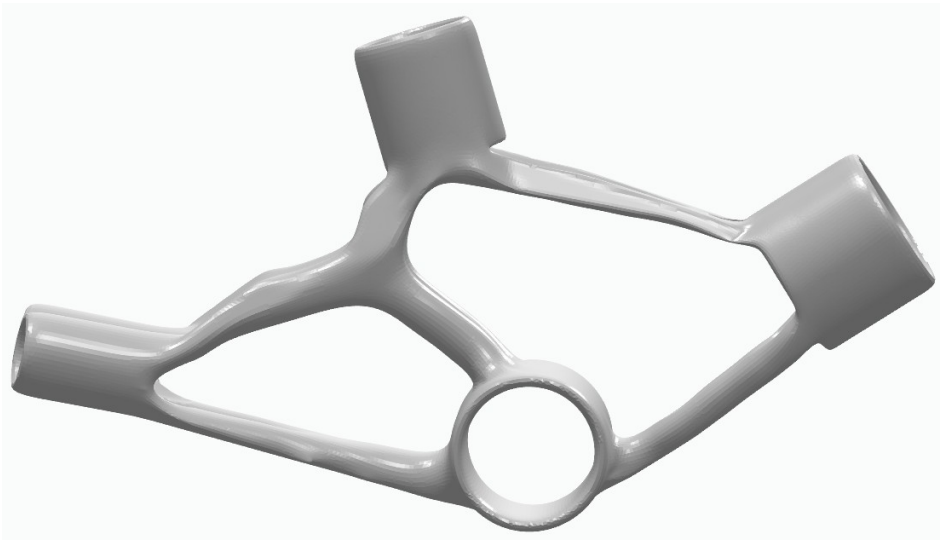


Figura 101 Geometría del racor tras el refinamiento con PolyNURBS (I)

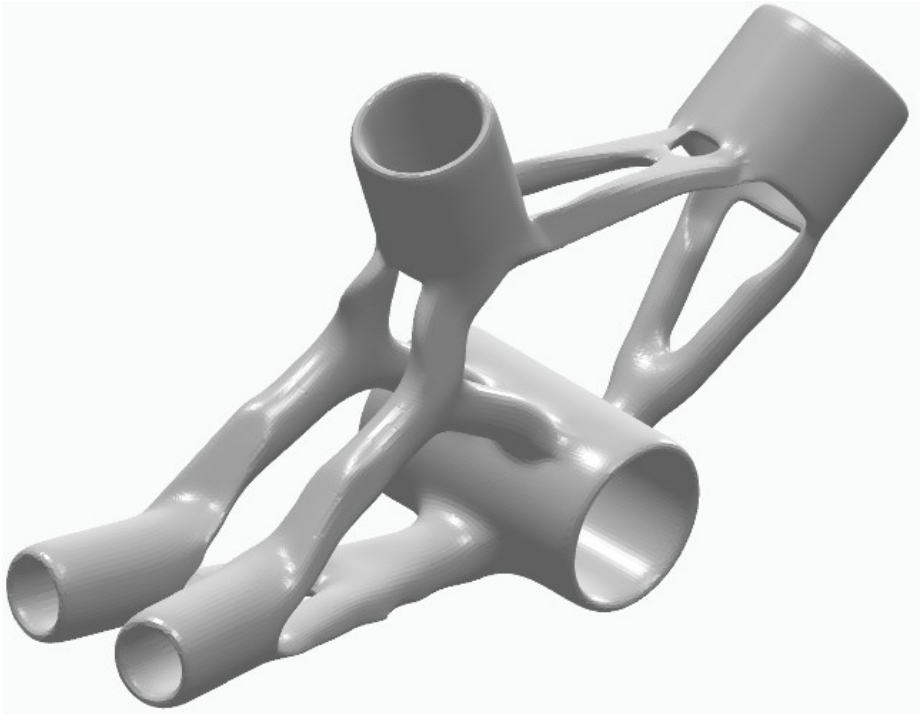


Figura 102 Geometría del racor tras el refinamiento con PolyNURBS (II)

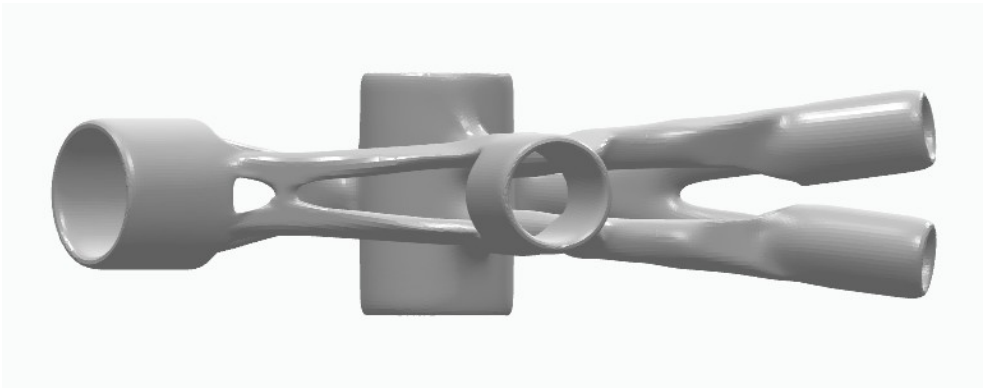


Figura 103 Geometría del racor tras el refinamiento con PolyNURBS (III)

El resultado del refinamiento es una pieza que mantiene la estructura de la geometría optimizada (conservando material donde las tensiones son altas y siendo más esbelta donde el algoritmo identificó poco aprovechamiento) pero con una superficie suave y fabricable. Esta es la geometría que se llevará a fabricación en el apartado siguiente

Capitulo 5 Fabricación del prototipo

Con la geometría del racor refinada y exportada en formato STEP, el último paso del proyecto es su fabricación. El proceso se articula en dos fases con objetivos claramente diferenciados: en primer lugar, la fabricación de un prototipo en polímero cuya única función es verificar la corrección dimensional de la geometría antes de comprometer el presupuesto de la pieza metálica; en segundo lugar, la fabricación del componente final en AlSi10Mg mediante DMLS, tecnología y material definidos en el Capítulo 3 como los adecuados para una pieza estructural sometida a cargas reales de pedaleo.

5.1 Necesidad del prototipo de verificación dimensional

Antes de proceder a la fabricación del componente final en metal, es necesario verificar que la geometría refinada es dimensionalmente correcta: que los tetones encajan dentro de los tubos de aluminio y que el alojamiento del pedalier admite correctamente la caja de pedalier BSA.

Esta verificación previa resulta indispensable por una razón económica de peso: el presupuesto del componente final fabricado en AlSi10Mg mediante DMLS es muy alto. Un error dimensional en esta pieza implicaría repetir íntegramente el proceso de fabricación metálica, con el coste económico y temporal que ello conlleva. Detectar y corregir cualquier error en un prototipo de polímero, cuyo coste es órdenes de magnitud inferior, es por tanto una decisión técnica y económicamente justificada antes de comprometer el presupuesto de la pieza metálica.

5.2 Selección de tecnología para el prototipo

Dado que el prototipo tiene una función exclusivamente dimensional y no estructural, los criterios de selección de tecnología son el coste, el tiempo de fabricación y la precisión dimensional, descartando desde el inicio cualquier consideración sobre propiedades mecánicas del material. El laboratorio de Fabricación Aditiva de la ETSI-ICAI dispone de tres tecnologías de impresión 3D en polímero: FDM (Bambu X1C), SLA (Formlabs Form 3L) y MJF (HP Jet Fusion 580). Los costes de cada opción se han calculado aplicando el

método ICAI de análisis de costes, basado en la amortización de la máquina, el coste del material y la mano de obra del técnico analista.

Tecnología	Coste (€)	Tiempo	Precisión	Idoneidad
FDM — Bambu X1C / PLA	19,36 €	8 h 11 min	Suficiente	✓ Adecuada
SLA — Formlabs Form 3L /	102,29 €	12 h	Alta	✗ Excesiva
MJF — HP 580 / PA12	174,27 €	—	Alta	✗ Excesiva

Tabla 15 Comparativa de tecnologías disponibles para el prototipo.

COMILLAS UNIVERSIDAD PONTIFICIA ICAI

ANALISIS DE COSTES PARA PROTOTIPADO DE PIEZAS EN IMPRESORA 3D -FDM		
DATOS AMORTIZACIÓN MÁQUINA		
Precio máquina (€)	1.325	
Coste mantenimiento anual (€)	133	
Años de amortización	2	
Amortización (h/año) - 223 días-año / 8 horas-día	1784	
Precio Hora máquina-amortización (€/h)	**0,48**	
Precio Hora venta-público (€/h)	**0,72**	
DATOS COSTE MATERIAL		
Coste material modelo: filamento PLA (€/cc) (18,20€-750 cc)	0,02	
Coste material soporte: filamento PLA (€/cc) (20€-750 cc)	0,00	
Coste material bandeja (€/Ud.): (20€-100 uds.)	0,20	
DATOS COSTE TÉCNICO ANALISTA		
Coste técnico analista del modelo - inc. desmoldeo (€/h)	30	
DATOS TÉCNICOS DE DEPOSICIÓN		
~~*Tipo de modelo*~~	***Malla***	***Sólido***
~~Tasa de deposicion (cc/h)~~		
~~Precio hora máquina deposición (€/h)~~		

PIEZA monica-lucia4-maxilar - Orientación HORIZONTAL		
CONCEPTOS PRESUPUESTADOS	**Opción Solido**	**Costes parciales**
Material modelo (cc)	180,00	4,37 €/ud
Soporte modelo (cc)	26,36	0,00 €/ud
Tiempo modelo (h)	8,00	5,79 €/ud
Piezas por bandeja (ud)	1,00	0,20 €/ud
Tiempo técnico-analista (h)	0,3	9,00 €
Cantidad de piezas	1,00	
Coste unitario (€) en ICAI + IVA	**19,36 €/Ud**	
Coste total (€) en ICAI + IVA	**19,36 €**	

Figura 104 Hoja de cálculo ICAI para el prototipo en PLA (FDM).

ANALISIS DE COSTES PARA PROTOTIPADO DE PIEZAS EN IMPRESORA 3D -FDM		
DATOS AMORTIZACIÓN MÁQUINA		
Precio máquina (€)	20.000	
Coste mantenimiento anual (€)	2.000	
Años de amortización	5	
Amortización (h/año) - 223 días-año / 12 horas-día	1784	
Precio Hora máquina-amortización (€/h)	**2,91**	
Precio Hora venta-público (€/h)	**4,37**	
DATOS COSTE MATERIAL		
Coste material modelo: filamento abs (€/cc) (150€-950 cc)	0,21	
DATOS COSTE TÉCNICO ANALISTA		
Coste técnico analista del modelo - inc. desmoldeo (€/h)	20	
DATOS TÉCNICOS DE DEPOSICIÓN		
Tipo de modelo	***Malla***	***Sólido***
Tasa de deposicion (cc/h)	22,4	16
Precio hora máquina-deposición (€/h)	4,74	

PIEZA PU RIGID - Orientación HORIZONTAL		
CONCEPTOS PRESUPUESTADOS	**Opción Solido**	**ostes parciale**
Material modelo (cc)	142,00	29,82 €/ud
Soporte modelo (cc)	79,00	16,59 €/ud
Tiempo modelo (h)	12,00	52,47 €/ud
Piezas por bandeja (ud)	1,00	0,00 €/ud
Tiempo técnico-analista (h)	1,00	20,00 €
Cantidad de piezas	1,00	
Coste unitario (€) en ICAI + IVA	**102,29 €/Ud**	
Coste total (€) en ICAI + IVA	**102,29 €**	

Figura 105 Hoja de cálculo ICAI para el prototipo en resina (SLA).

COMILLAS UNIVERSIDAD PONTIFICIA ICAI

ANALISIS DE COSTES PARA PROTOTIPADO DE PIEZAS EN IMPRESORA 3D -HP 580		
DATOS AMORTIZACIÓN MÁQUINA		
Precio máquina (€)	80.000	
Coste mantenimiento anual (€)	2.000	
Años de amortización	5	
Días impresión/año	249	
Impresiones/día	0,5	
Precio impresión (€)	**147,53**	
Precio Impresión venta-público (€)	**147,53**	
DATOS COSTE MATERIAL		
Coste material: (€/kg)	141,00	
Coste material: (€/cc)	0,15	
Volumen Total (cc)	1560,00	
Densidad de Empaquetado	10,00%	
DATOS COSTE TÉCNICO ANALISTA		
Coste técnico analista del modelo - inc. limpieza (€/h)	20	
PIEZA monica-lucia4-maxilar - Orientación HORIZONTAL		
CONCEPTOS PRESUPUESTADOS	Opción Solido	Costes parciales
Material modelo (cc)	141,00	20,93 €/ud
Impresión		133,34 €/ud
Tiempo técnico-analista (h)	0,50	10,00 €/ud
Tiempo Limpieza (h)	0,50	10,00 €/ud
Cantidad de piezas	1,00	
Coste unitario (€) en ICAI + IVA	**174,27 €/Ud**	
Coste total (€) en ICAI + IVA	**174,27 €**	

Figura 106 Hoja de cálculo ICAI para el prototipo en PA12 (MJF).

Los resultados muestran que la tecnología FDM es la opción más económica con diferencia: su coste de 19,36 € es aproximadamente 5 veces inferior al de la SLA (102,29 €) y 9 veces inferior al de la MJF (174,27 €). Además, la precisión dimensional del FDM es suficiente para verificar el ajuste de los tetones y el alojamiento BSA, que son las únicas comprobaciones que se requieren. Las tecnologías SLA y MJF ofrecen una precisión superior que, si bien sería deseable en una pieza de uso final, resulta excesiva para un prototipo de verificación dimensional. Se selecciona por tanto la tecnología FDM con material PLA como la opción óptima para esta fase del proyecto.

5.3 Fabricación del prototipo en PLA

El archivo STEP del racor refinado se importa en Bambu Studio, el software de laminado de la impresora Bambu X1C del laboratorio de Fabricación Aditiva de la ETSI-ICAI. Dado que el prototipo es exclusivamente para verificación dimensional y no para ensayo estructural, se configura con una densidad de relleno reducida del 20% y altura de capa de 0,2 mm, parámetros adecuados para obtener una geometría fiel sin necesidad de maximizar propiedades mecánicas ni calidad superficial. Los parámetros de laminado obtenidos se recogen en la tabla siguiente.

Parámetro	Valor
Software de laminado	Bambu Studio
Impresora	Bambu X1C
Material	PLA
Altura de capa	0,2 mm
Densidad de relleno	20 %
Material modelo	223,28 g (180,06 cc)
Material soporte	32,69 g (26,36 cc)
Total material	255,96 g
Tiempo de impresión	8 h 11 min

Tabla 16 Parámetros de laminado del prototipo en PLA obtenidos con Bambu Studio.

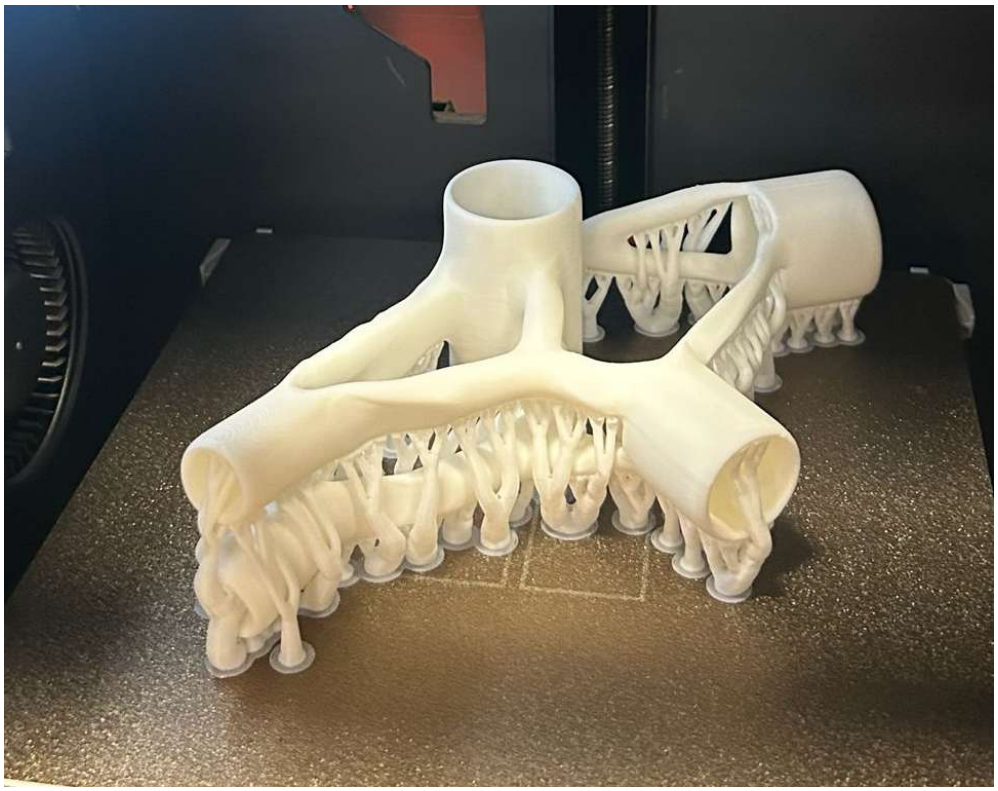


Figura 107 Impresión del prototipo en PLA en la Bambu X1C



Figura 108 Prototipo impreso en PLA antes del postprocesado.

5.4 Postprocesado del prototipo

Una vez finalizada la impresión, se procede al postprocesado del prototipo. En primer lugar se retiran manualmente las estructuras de soporte generadas durante la impresión, prestando especial atención a las zonas de los tetones. A continuación se lija la superficie de la pieza para eliminar las marcas dejadas por los soportes y mejorar el acabado superficial general, obteniendo una geometría limpia y apta para la verificación dimensional.



Figura 109 Prototipo impreso en PLA tras el postprocesado.

5.5 Componente final en AlSi10Mg por DMLS

Con la geometría dimensional verificada mediante el prototipo en PLA, se procede a la fabricación del componente final en AlSi10Mg mediante DMLS (Direct Metal Laser Sintering). Esta tecnología, descrita en el apartado 2.5.2, fusiona polvo metálico de AlSi10Mg capa a capa con un láser de alta potencia, obteniendo piezas con propiedades mecánicas comparables a las de fundición o forja y con total libertad geométrica para reproducir la forma orgánica del racor optimizado.

La fabricación se encarga a Protolabs Germany GmbH a través de su plataforma de fabricación bajo demanda, dado que el laboratorio de la ETSI-ICAI no dispone de máquina DMLS metálica. El presupuesto se obtuvo cargando el archivo STEP del racor en la

plataforma y seleccionando DMLS con material AlSi10Mg y acabado estándar. Los parámetros de fabricación se recogen en la tabla siguiente.

Parámetro	Valor
Material	AlSi10Mg (polvo EOS o equivalente)
Tecnología	DMLS (Direct Metal Laser Sintering)
Espesor de capa	30–50 µm
Condición de entrega	As-built (sin tratamiento térmico)
Acabado superficial	Shot peening en zonas de tetones
Tolerancia dimensional	±0,1 mm en zonas funcionales
Dimensiones pieza	245 × 67 × 135 mm
Proveedor	Protolabs Germany GmbH

Tabla 17 Parámetros de fabricación del componente final en AlSi10Mg.

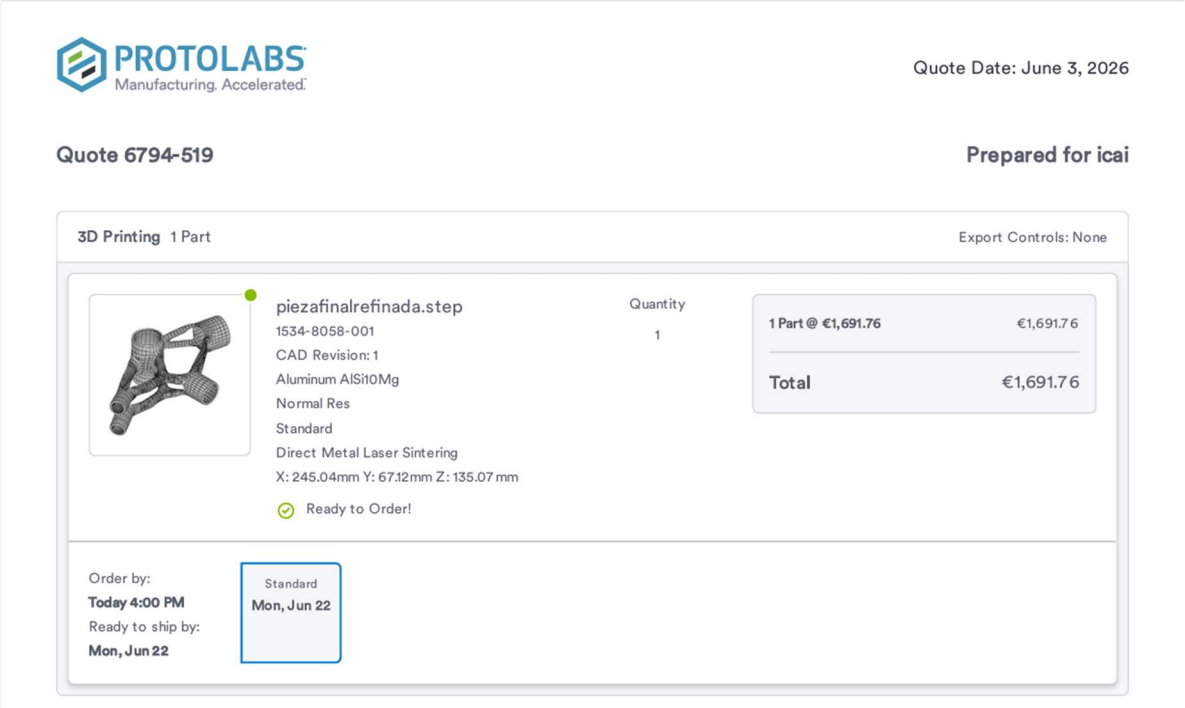


Figura 110 Presupuesto de Protolabs para el racor en AlSi10Mg por DMLS.

5.6 Resumen de costes de fabricación

La siguiente tabla recoge el resumen de costes de las dos fases de fabricación del proyecto. El coste total de fabricación asciende a 1.711,12 €, correspondiendo el 98,9 % al componente final en DMLS y únicamente el 1,1 % al prototipo de verificación en PLA. Esta distribución subraya la eficacia económica de la estrategia adoptada: invertir 19,36 € en verificar la geometría antes de comprometer los 1.691,76 € de la pieza metálica es una decisión plenamente justificada.

Fase	Tecnología / Material	Coste (€)
Prototipo de verificación	FDM — Bambu X1C / PLA	19,36 €
Componente final	DMLS — Protolabs / AlSi10Mg	1.691,76 €
COSTE TOTAL DE FABRICACIÓN	—	1.711,12 €

Tabla 18 Resumen de costes de fabricación del proyecto.

Con el componente fabricado y verificado dimensionalmente, el proceso completo queda cerrado: desde la definición del estado de cargas y las especificaciones de diseño del Capítulo 3, pasando por el modelado CAD, la validación FEM, las iteraciones de optimización topológica y el refinamiento geométrico con PolyNURBS, hasta la materialización física del racor en el material y la tecnología de fabricación previstos desde el inicio del proyecto

Capitulo 6 Conclusiones y líneas futuras de trabajo

6.1 Conclusiones

El presente Trabajo de Fin de Grado ha demostrado la viabilidad técnica de diseñar, optimizar y fabricar un racor de pedalier para un cuadro de bicicleta construido con tubos reciclados, empleando diseño generativo, simulación por elementos finitos y fabricación aditiva metálica.

El proceso de optimización topológica ha permitido reducir la masa del racor en un 69% respecto al sólido de partida, sin superar en ningún punto la tensión admisible de fatiga de 55 MPa establecida en las especificaciones de diseño. La validación mediante FEM ha confirmado que la geometría optimizada y refinada con PolyNURBS es estructuralmente válida bajo las cargas reales de pedaleo, con un factor de seguridad adecuado en todas las iteraciones aceptadas.

La fabricación aditiva, y en concreto el DMLS en AlSi10Mg, se ha revelado como la única tecnología capaz de materializar la geometría orgánica resultante de la optimización. La libertad geométrica del proceso, su ausencia de utillaje específico y su compatibilidad con el AlSi10Mg lo convierten en la solución técnica y económicamente justificada para este caso de uso, donde cada pieza es única e irrepetible al adaptarse a la geometría variable de los tubos reciclados.

La estrategia de fabricación en dos fases, prototipo de verificación en PLA (19,36 €) seguido del componente final en DMLS (1.691,76 €), ha demostrado ser un enfoque eficiente: la inversión en el prototipo polimérico, que representa únicamente el 1,1% del coste total, permite detectar y corregir errores dimensionales antes de comprometer el presupuesto de la pieza metálica.

Por último, la combinación de tubos de aluminio reciclados con un proceso de fabricación que minimiza el desperdicio de material representa una alternativa más sostenible a la fabricación de cuadros convencionales, alineada con los principios de economía circular y los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

6.2 Líneas futuras de trabajo

Los resultados obtenidos abren diversas vías de desarrollo que podrían ampliar y mejorar el trabajo realizado.

En primer lugar, la optimización del coste de fabricación en DMLS. El presupuesto actual de 1.691,76 € corresponde a una pieza única fabricada de forma aislada. Una línea de trabajo futura consistiría en estudiar estrategias de reducción de coste, como la optimización de la orientación de impresión para minimizar soportes o la reducción del volumen mediante un vaciado interior controlado.

En segundo lugar, la extensión del concepto a otros nudos del cuadro. El proceso metodológico desarrollado en este TFG es directamente transferible a otras uniones estructurales como la dirección o las vainas traseras, lo que permitiría diseñar una bicicleta completamente personalizada y optimizada a partir de tubos reciclados.

Por último, la automatización del flujo de trabajo mediante escaneo 3D. Actualmente la caracterización geométrica de los tubos se realiza de forma manual. Desarrollar un flujo automatizado que, a partir del escaneo 3D de los tubos disponibles, genere directamente el modelo CAD del racor adaptado reduciría significativamente el tiempo de diseño y eliminaría la intervención manual en las fases de medición y modelado.

Capitulo 7 Bibliografía

[1] United Nations, *Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development*, A/RES/70/1. New York: United Nations, 2015. https://sdgs.un.org/2030agenda

[2] D. V. Herlihy, *Bicycle: The History*. New Haven: Yale University Press, 2004. https://yalebooks.yale.edu/book/9780300120479/bicycle/

[3] D. G. Wilson y J. Papadopoulos, *Bicycling Science*, 3.ª ed. Cambridge: MIT Press, 2004. https://mitpress.mit.edu/9780262731546/bicycling-science/

[4] M. Brandt, *Handmade Bicycle Frames*. San Francisco: Van der Plas Publications, 2010.

[5] CONEBI, *European Bicycle Market: Industry and Market Profile 2022*. Brussels: CONEBI, 2023. https://www.conebi.eu/market-data/

[6] M. F. Ashby y D. R. H. Jones, *Engineering Materials 1: An Introduction to Properties, Applications and Design*, 4.ª ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2011. https://www.sciencedirect.com/book/9780080966656/engineering-materials-1

[7] J. R. Davis, Ed., *Aluminum and Aluminum Alloys*. Materials Park, OH: ASM International, 1993. https://www.asminternational.org/products/publication/10396G/

[8] J. G. Kaufman, *Introduction to Aluminum Alloys and Tempers*. Materials Park, OH: ASM International, 2000. https://www.asminternational.org/products/publication/06180G/

[9] C. Leyens y M. Peters, Eds., *Titanium and Titanium Alloys: Fundamentals and Applications*. Weinheim: Wiley-VCH, 2003. https://doi.org/10.1002/3527602119

[10] P. K. Mallick, *Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing, and Design*, 3.ª ed. Boca Raton: CRC Press, 2007. https://doi.org/10.1201/9781420005981

[11] Ellen MacArthur Foundation, *Towards a Circular Economy: Business Rationale for an Accelerated Transition*. Cowes: Ellen MacArthur Foundation, 2015. https://www.ellenmacarthurfoundation.org/towards-a-circular-economy-business-rationale-for-an-accelerated-transition

[12] European Commission, *Circular Economy Action Plan: For a Cleaner and More Competitive Europe*. Brussels: EC, 2020. https://environment.ec.europa.eu/strategy/circular-economy-action-plan_en

[13] M. F. Ashby, *Materials and the Environment: Eco-Informed Material Choice*, 2.ª ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2012. https://www.sciencedirect.com/book/9780123859716/materials-and-the-environment

[14] European Aluminium Association, *Aluminium Recycling: Facts and Figures*. Brussels: EAA, 2022. https://european-aluminium.eu/resource/aluminium-recycling-facts-and-figures/

[15] CONEBI, *European Bicycle Market Report 2023*. Brussels: CONEBI, 2024. https://www.conebi.eu/market-data/

[16] J. M. Allwood y J. M. Cullen, *Sustainable Materials with Both Eyes Open*. Cambridge: UIT Cambridge, 2012. https://www.withbotheyesopen.com/

[17] M. P. Bendsøe y O. Sigmund, *Topology Optimization: Theory, Methods, and Applications*. Berlin: Springer, 2003. https://doi.org/10.1007/978-3-662-05086-6

[18] M. P. Bendsøe y N. Kikuchi, "Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 71, n.º 2, pp. 197–224, 1988. https://doi.org/10.1016/0045-7825(88)90086-2

[19] O. Sigmund y K. Maute, "Topology optimization approaches," *Structural and Multidisciplinary Optimization*, vol. 48, n.º 6, pp. 1031–1055, 2013. https://doi.org/10.1007/s00158-013-0978-6

[20] D. Brackett, I. Ashcroft y R. Hague, "Topology optimization for additive manufacturing," en *Proc. Solid Freeform Fabrication Symposium*, Austin, TX, 2011. https://repositories.lib.utexas.edu/handle/2152/88435

[21] C. W. Hull, "Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography," Patente EE. UU. US4575330A, 11 mar. 1986. https://patents.google.com/patent/US4575330A

[22] I. Gibson, D. Rosen y B. Stucker, *Additive Manufacturing Technologies*, 2.ª ed. New York: Springer, 2015. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2113-3

[23] Wohlers Associates, *Wohlers Report 2024: 3D Printing and Additive Manufacturing Global State of the Industry*. Fort Collins, CO: Wohlers Associates, 2024. https://wohlersassociates.com/products/wohlers-report/

[24] H. Lipson y M. Kurman, *Fabricated: The New World of 3D Printing*. Hoboken: Wiley, 2013. https://www.wiley.com/en-us/Fabricated%3A+The+New+World+of+3D+Printing-p-9781118350638

[25] EOS GmbH, *EOS Aluminium AlSi10Mg Material Data Sheet*. Krailling: EOS GmbH, 2023. https://www.eos.info/en/additive-manufacturing/3d-printing-metal/eos-metal-material-portfolio/aluminium-al

[26] GE Aviation, "GE Aviation's 3D Printed Fuel Nozzle," General Electric Company, Cincinnati, OH, 2016. https://www.ge.com/news/reports/the-faa-cleared-the-first-3d-printed-part-to-fly-in-a-commercial-jet-engine-from-ge

[27] Autodesk, "Airbus and Autodesk Partner to Create Bionic Aircraft Partition," Autodesk Inc., San Rafael, CA, 2015. https://www.autodesk.com/customer-stories/airbus-generative-design

[28] General Motors y Autodesk, "GM and Autodesk Reinvent Iconic Seat Bracket with Generative Design," General Motors Company, Detroit, MI, 2018. https://www.autodesk.com/customer-stories/general-motors-generative-design

[29] Urwahn Bikes, "Platzhirsch: Generative Design Meets Urban Mobility," Urwahn Engineering GmbH, Magdeburg, 2022. https://www.urwahnbikes.com/

[30] Renishaw, "First metal 3D printed bicycle frame manufactured by Renishaw for Empire Cycles," Renishaw plc, Wotton-under-Edge, 2014. https://www.renishaw.com/en/first-metal-3d-printed-bicycle-frame-manufactured-by-renishaw-for-empire-cycles--24154

[31] F. Véle, M. Ackermann, J. Macháček y J. Šafka, "Case Study of Additively Manufactured Mountain Bike Stem," *Materials*, vol. 16, n.º 13, p. 4717, 2023. https://doi.org/10.3390/ma16134717

[32] M. Petot, *ROCKRIDER BABEL_ // Master Thesis*. Behance, 2023. https://www.behance.net/gallery/182419975/ROCKRIDER-BABEL_-Master-Thesis

[33] ISO 4210, *Cycles — Safety Requirements for Bicycles*. Geneva: International Organization for Standardization, 2023. https://www.iso.org/standard/82714.html

[34] ISO 4210-2, *Cycles — Safety Requirements for Bicycles — Part 2: Requirements for city and trekking, young adult, mountain and racing bicycles*. Geneva: International Organization for Standardization, 2023. https://www.iso.org/standard/82716.html

[35] ISO 4210-3, *Cycles — Safety Requirements for Bicycles — Part 3: Common test methods*. Geneva: International Organization for Standardization, 2023. https://www.iso.org/standard/82717.html

[36] ISO 4210-6, *Cycles — Safety Requirements for Bicycles — Part 6: Frame and fork test methods*. Geneva: International Organization for Standardization, 2023.

https://www.iso.org/standard/82720.html

[37] P. D. Soden y B. A. Adeyefa, "Forces applied to a bicycle during normal cycling," *Journal of Biomechanics*, vol. 12, n.º 7, pp. 527–541, 1979. https://doi.org/10.1016/0021-9290(79)90041-1

[38] R. D. Adams, Ed., *Adhesive Bonding: Science, Technology and Applications*. Cambridge: Woodhead Publishing, 2005. https://doi.org/10.1533/9781845690755

[39] E. M. Petrie, *Handbook of Adhesives and Sealants*, 2.ª ed. New York: McGraw-Hill, 2007. https://www.mhprofessional.com/handbook-of-adhesives-and-sealants-second-edition-9780071479165-usa

[40] Siemens Digital Industries Software, *Solid Edge 2025: User Guide and Reference Manual*. Plano, TX: Siemens, 2025. https://docs.sw.siemens.com/en-US/product/290038240/doc/PL20231107143913203.solid_edge_help

[41] Altair Engineering, *Altair Inspire 2024: User Guide*. Troy, MI: Altair Engineering, Inc., 2024. https://2024.help.altair.com/2024/inspire/en_us/index.htm

Capitulo 8 Anexos

8.1 Presupuesto Protolabs

PROTOLABS
Manufacturing. Accelerated.

Quote Date: 3 June 2026

Quote 6794-519

Prepared for icai

3D Printing 1 Part — Export Controls: None



piezafinalrefinada.step
1534-8058-001
CAD Revision: 1
Aluminum AlSi10Mg
Normal Res
Standard
Direct Metal Laser Sintering
X: 245.04mm Y: 67.12mm Z: 135.07 mm
Ready to order!

Quantity
1

1 Part @ €1,691.76	€1,691.76
Total	€1,691.76

Order by:
Today 16:00
Ready to ship by:
Mon 22 Jun

Standard
Mon 22 Jun

Shipping to
28060

Shipping Options
No carrier account

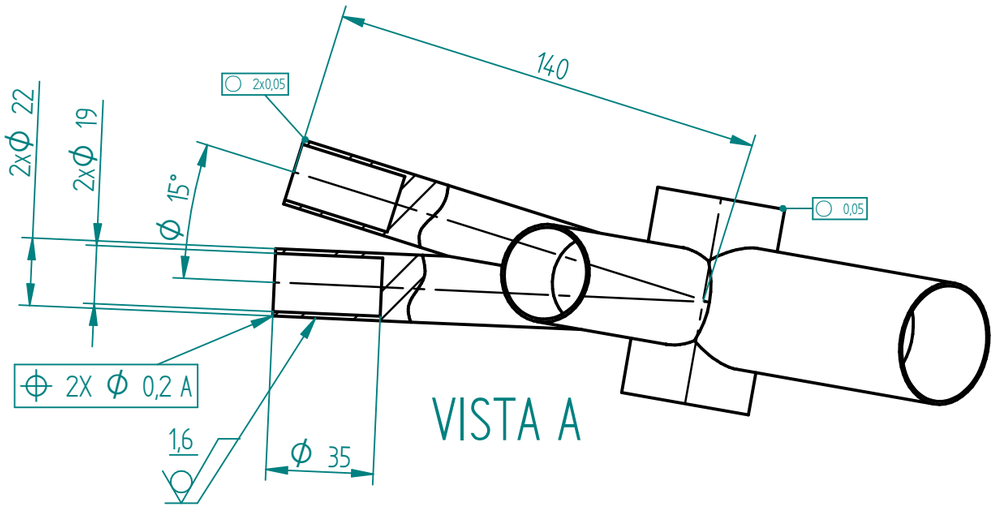
Order Summary

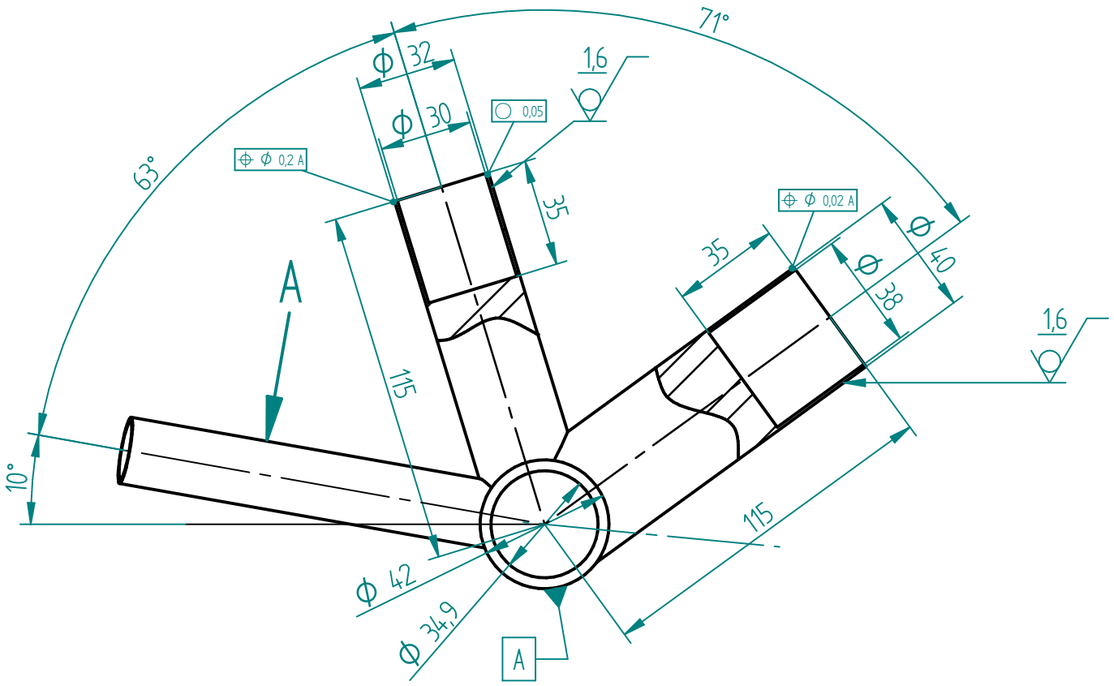
Subtotal	€1,691.76
Shipping	Invalid Address
VAT	TBD
Total	€1,691.76

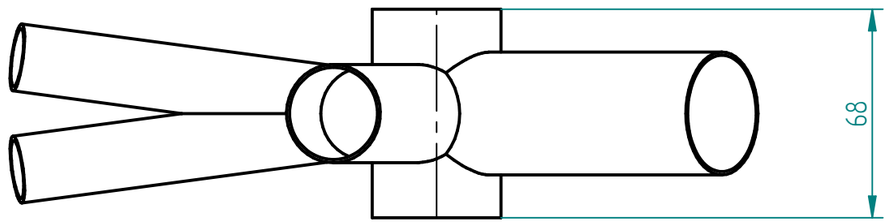
Protolabs Germany GmbH Hermann-Oberth-Straße 21 85640 Putzbrunn Germany
Terms and Conditions of Sale

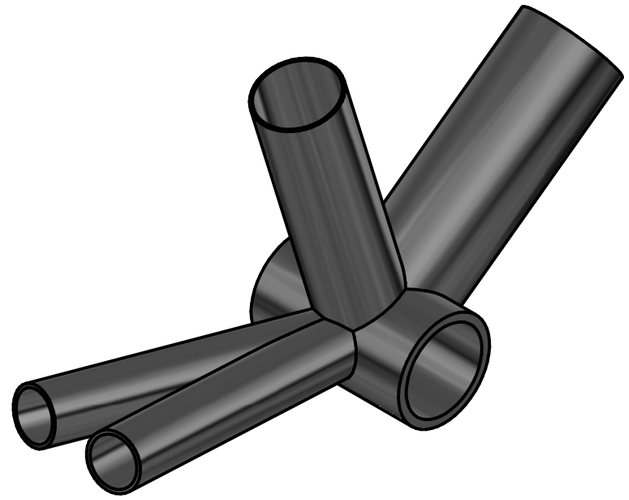
Thank you for the opportunity to quote your parts.
Contact Customer Service at +44 (0) 1952 683047 or customerservice@protolabs.co.uk

8.2 Plano pieza









Tolerancia medidas lineales	Desviaciones admisibles respecto al nominal (en mm)				
Designación	0,51 hasta 3	más de 3 hasta 6	más de 6 hasta 30	más de 30 hasta 120	más de 120 hasta 400
m (media)	± 0,1	± 0,1	± 0,2	± 0,3	± 0,5

12,5 1,6 ( )

MATERIAL	ALSi10Mg	FORMATO		TÍTULO SUPLEMENTARIO	REV.
TOLERANCIA	ISO 2768 – m	A3		TRABAJO DE FIN DE GRADO	1
	NOMBRE		FECHA	TÍTULO	
DIBUJADO	LTG		25/05/26	TUBOS UNIÓN PEDALIER	
COMPROBADO					
ESCALA: 1:2	FIRMA			COMILLAS UNIVERSIDAD PONTIFICIA ICAI	CÓDIGO

SOLID EDGE ACADEMIC COPY