



GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

ESTUDIO TÉCNICO-ECONÓMICO SOBRE LA FABRICACIÓN DE COMPONENTES INDUSTRIALES DE USO FINAL MEDIANTE LA APLICACIÓN DEL DISEÑO GENERATIVO Y LA IMPRESIÓN 3D

Autor: José Antonio Fernández-Golfín Fernández-Tresguerres

Director: Mariano Jiménez Calzado

Co-Director: Silvia Fernández Villamarín

Madrid

Junio de 2026

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título

ESTUDIO TÉCNICO-ECONÓMICO SOBRE LA FABRICACIÓN DE COMPONENTES
INDUSTRIALES DE USO FINAL MEDIANTE LA APLICACIÓN DEL DISEÑO
GENERATIVO Y LA IMPRESIÓN 3D

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

curso académico 2025/2026 es de mi autoría, original e inédito y

no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos.

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

tomada de otros documentos está debidamente referenciada.



Fdo.: José Antonio Fernández-Golfín

Fecha: 06/07/2026

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO



Fdo.: Mariano Jiménez Calzado

Fecha: 06/07/2026

EL CO-DIRECTOR DEL PROYECTO



Fdo.: Silvia Fernández Villamarín

Fecha: 06/07/2026



GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

ESTUDIO TÉCNICO-ECONÓMICO SOBRE LA FABRICACIÓN DE COMPONENTES INDUSTRIALES DE USO FINAL MEDIANTE LA APLICACIÓN DEL DISEÑO GENERATIVO Y LA IMPRESIÓN 3D

Autor: José Antonio Fernández-Golfín Fernández-Tresguerres

Director: Mariano Jiménez Calzado

Co-Director: Silvia Fernández Villamarín

Madrid

Agradecimientos

Quiero agradecer a mi director, Mariano Jiménez Calzado, por su orientación y su ayuda constante durante el desarrollo de este Trabajo de Fin de Grado.

A mi familia por su confianza e interés mostrado por mi trabajo, así como por acompañarme en todo este proceso.

Finalmente, quiero agradecer a mis compañeros y amigos por su apoyo y compañía durante estos años de carrera y por su ayuda constante durante la realización de este trabajo.

ESTUDIO TÉCNICO-ECONÓMICO SOBRE LA FABRICACIÓN DE COMPONENTES INDUSTRIALES DE USO FINAL MEDIANTE LA APLICACIÓN DEL DISEÑO GENERATIVO Y LA IMPRESIÓN 3D

Autor: Fernández-Golfín Fernández-Tresguerres, José Antonio.

Director: Jiménez Calzado, Mariano.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO

El presente Trabajo de Fin de Grado tiene como objetivo rediseñar la geometría de la tija inferior de la motocicleta del ISC Racing Team mediante técnicas de optimización topológica y simulaciones con métodos de elementos finitos. También se analiza la viabilidad técnico-económica de fabricar un componente de la motocicleta del ISC Racing Team mediante técnicas de fabricación aditiva. El resultado final del proyecto consistió en una reducción del 54% de la masa final de la tija, sin comprometer su rigidez estructural.

Palabras clave: Tija inferior, Optimización topológica, Método de elementos finitos, Impresión 3D.

1. Introducción

El objetivo de este proyecto es reducir el peso total de la tija de la motocicleta del ISC Racing Team. Se ha seguido una metodología con procesos iterativos para rediseñar la geometría de la pieza mediante tecnologías de optimización topológica y análisis de elementos finitos para obtener un resultado más eficiente. El proyecto analiza la viabilidad técnica y económica de la aplicación de tecnologías de impresión 3D y estudia el impacto medioambiental.

2. Definición del Proyecto

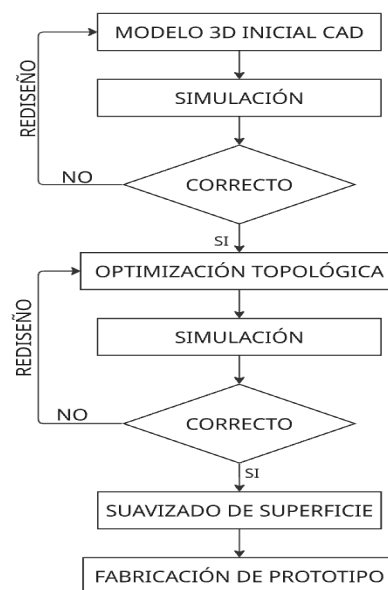


Ilustración 1: Metodología del proyecto. (fuente: propia)

3. Descripción del proyecto

Para completar el desarrollo de este proyecto, se ha partido de un modelo simplificado de la tija inferior de la motocicleta del ISC Racing Team modelado con las herramientas CAD de Solid Edge 2025.

Partiendo del modelo inicial, se realizó un estudio de las cargas aplicadas sobre la tija en el caso más crítico de una frenada brusca en una pendiente y se validó el modelo CAD inicial mediante el método de elementos finitos. Posteriormente, se realizaron múltiples estudios de optimización topológica para obtener una geometría nueva y optimizada respetando las características funcionales de la tija. Tras cada proceso de optimización se llevó a cabo una simulación FEM para verificar el correcto funcionamiento y la rigidez estructural del componente.

Una vez obtenido el resultado final, se suavizaron las superficies irregulares generadas por la optimización topológica usando el software de Altair Inspire y sus algoritmos de diseño generativo.

Finalmente, se realizó un estudio económico de la fabricación del componente aplicando distintas tecnologías de impresión 3D. También se aproximó un estudio sobre el impacto medioambiental de la fabricación del componente adaptando las tecnologías de fabricación a las características de la pieza.

4. Resultados

Como resultado del proyecto, se ha conseguido reducir 379 g del peso total de la tija inferior inicial obteniendo un prototipo final de tan solo 325 g y un volumen de 120,37 cm³ partiendo del volumen inicial de 273,92 cm³.

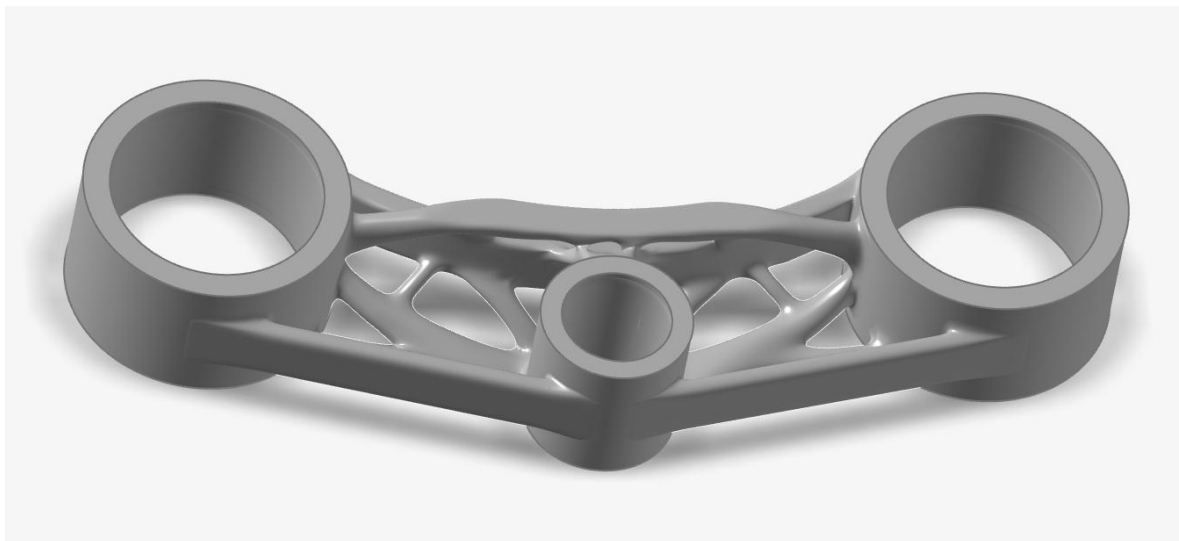


Ilustración 2: Resultado final del proyecto. (fuente: propia)

El análisis de los costes mostró que la optimización topológica logró reducir el coste de impresión en las tecnologías de SLS y SLA al reducir significativamente el material utilizado para la fabricación del componente. La reducción del precio varió entre un 22,8% para la

impresión en SLA y un 16,4% para la impresión en SLS. Aunque el precio de fabricación del prototipo final mediante técnicas de impresión en DMLS sea superior al de la fabricación de la tija original mediante tecnologías de fabricación tradicionales, la reducción del peso total del componente justifica la utilización de esta técnica de fabricación.

En cuanto al análisis de sostenibilidad, se demostró una reducción de las emisiones de CO₂ equivalentes del 12,4 %. La fabricación de la tija original mediante tecnologías de fabricación sustractiva supone una emisión de 36,62 kg de CO₂, mientras que la fabricación de la tija optimizada, adaptando las emisiones a la impresión por DMLS, supone unas emisiones de 32,08 kg de CO₂.

5. Conclusiones

En conclusión, se ha demostrado la viabilidad de aplicar la impresión 3D y el diseño generativo para rediseñar y fabricar componentes de uso final. El resultado final más significativo ha sido la reducción de peso en un 54% y la reducción del impacto medioambiental de la fabricación del prototipo de la tija inferior de la motocicleta del ISC Racing Team.

TECHNICAL AND ECONOMIC STUDY ON THE MANUFACTURE OF INDUSTRIAL COMPONENTS FOR END USE THROUGH THE APPLICATION OF GENERATIVE DESIGN AND 3D PRINTING

Author: Fernández-Golfín Fernández-Tresguerres, José Antonio

Supervisor: Jiménez Calzado, Mariano.

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

ABSTRACT

The aim of this Final Year Project is to redesign the geometry of the lower triple clamp of the ISC Racing Team's motorbike using topological optimisation techniques and finite element method simulations. It also analyses the technical and economic feasibility of manufacturing a component for the ISC Racing Team's motorbike using additive manufacturing techniques. The final result of the project was a 54% reduction in the final mass of the lower triple clamp, without compromising its structural stiffness.

Keywords: Lower triple clamp, Topological optimisation, Finite element method, 3D printing.

1. Introduction

The aim of this project is to reduce the total weight of the ISC Racing Team's motorcycle lower triple clamp. An iterative methodology has been followed to redesign the part's geometry using topological optimisation and finite element analysis technologies, in order to achieve a more efficient result. The project analyses the technical and economic feasibility of applying 3D printing technologies and assesses the environmental impact.

2. Definición del Proyecto

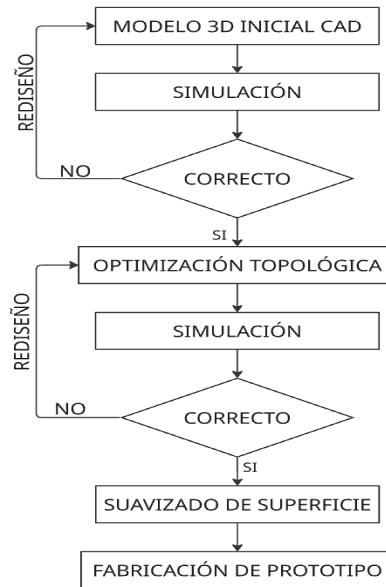


Ilustración 3: Project methodology (own source)

3. Project description

To carry out this project, it started with a simplified model of the lower clamp of the ISC Racing Team's motorbike, modelled using Solid Edge 2025 CAD tools.

Based on the initial model, a study was carried out of the loads applied to the clamp in the most critical scenario of sudden braking on a slope, and the initial CAD model was validated using the finite element method. Subsequently, multiple topological optimisation studies were carried out to obtain a new, optimised geometry whilst maintaining the functional characteristics of the clamp. Following each optimisation process, an FEM simulation was carried out to verify the component's correct functioning and structural stiffness.

Once the final result was obtained, the irregular surfaces generated by the topological optimisation were smoothed using Altair Inspire software and its generative design algorithms.

Finally, a cost analysis of the component's manufacture was carried out, applying different 3D printing technologies. An assessment of the environmental impact of the component's manufacture was also conducted, adapting the manufacturing technologies to the part's characteristics.

4. Results

As a result of the project, the total weight of the initial lower triple clamp was reduced by 379 g, resulting in a final prototype weighing just 325 g and with a volume of 120.37 cm³, starting from the initial volume of 273.92 cm³.

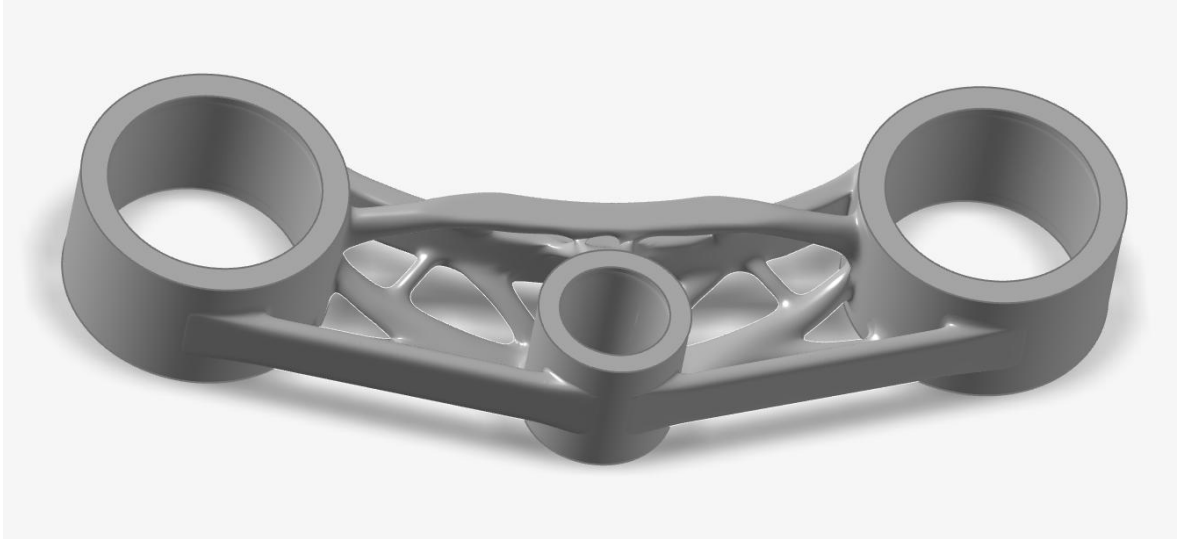


Ilustración 4: Final result of the project. (own source)

The cost analysis showed that topological optimisation succeeded in reducing printing costs for both SLS and SLA technologies by significantly reducing the amount of material used to manufacture the component. The price reduction ranged from 22.8% for SLA printing to 16.4% for SLS printing. Although the manufacturing cost of the final prototype using DMLS printing techniques is higher than that of manufacturing the original clamp using traditional manufacturing technologies, the reduction in the component's total weight justifies the use of this manufacturing technique.

Regarding the sustainability analysis, a 12.4% reduction in CO₂-equivalent emissions was demonstrated. The manufacture of the original lower clamp using subtractive manufacturing technologies results in emissions of 36.62 kg of CO₂, whilst the manufacture of the optimised clamp, with emissions adjusted for DMLS printing, results in emissions of 32.08 kg of CO₂.

5. Conclusiones

In conclusion, the feasibility of using 3D printing and generative design to redesign and manufacture end-of-use components has been demonstrated. The most significant outcome has been a 54 per cent reduction in weight and a reduction in the environmental impact of manufacturing the prototype lower clamp for the ISC Racing Team's motorbike.

Índice de la memoria

Capítulo 1. Introducción	10
1.1 Motivación del proyecto	11
1.2 Objetivos del proyecto	11
1.3 Alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible.....	12
8. Trabajo decente y crecimiento económico.....	12
9. Industria innovación e infraestructura	13
12. Producción y consumo responsable.....	13
Capítulo 2. Estado del arte	14
2.1 Impresión 3D	14
2.1.1 Etapas.....	14
2.1.2 Ventajas, limitaciones y defectología.....	15
2.1.3 Tipos	18
2.1.4 Materiales utilizados	20
2.1.5 Implementación en el mercado.....	24
2.1.6 Aplicaciones.....	27
2.2 Optimización topológica.....	30
2.2.1 Introducción.....	30
2.2.2 Etapas.....	31
2.2.3 Ventajas y limitaciones	33
2.2.4 Aplicaciones.....	33
2.3 Aplicaciones en la industria	34
2.3.1 Sector automoción.....	34
2.3.2 Sector aeroespacial	35
2.3.3 Sector médico.....	36
2.4 Competición MotoStudent.....	37
Capítulo 3. Definición del Trabajo	40
3.1 Metodología.....	40
3.2 Geometría de la pieza en la moto	41
3.3 Pieza seleccionada	46
3.4 Estudio de cargas.....	47

3.4.1 Frenada máxima.....	48
3.4.2 Frenada máxima en pendiente.....	52
3.4.3 Estado de carga más crítico	57
3.4.4 Cargas aplicadas por los tornillos.....	59
3.5 Condiciones de contorno.....	60
Capítulo 4. Desarrollo del trabajo.....	62
4.1 Prototipo 1: Modelo original.....	62
4.1.1 Obtención del modelo CAD	62
4.1.2 Validación por simulación FEM del prototipo 1	63
4.2 Prototipo 2: Modelo simplificado.....	67
4.2.1 Obtención del modelo CAD del prototipo 2	67
4.2.2 Validación por simulaciones FEM del prototipo 2	68
4.3 Prototipo 3: Optimización topológica	69
4.4 Prototipo 4: Optimización con regiones preservadas.....	79
4.5 Prototipo 5: Optimización topológica con regiones preservadas más delgadas	80
4.6 Nuevo estado de cargas.....	84
4.7 Optimización con el nuevo estado de cargas.....	84
4.8 Suavizado en Altair Inspire.....	89
4.9 Fabricación de prototipos.....	92
4.9.1 Prototipo impreso en FDM.....	93
4.9.2 Prototipo impresora en SLA	95
Capítulo 5. Análisis de resultados.....	98
5.1 Análisis de la geometría	98
5.2 Análisis del coste de fabricación	98
5.2.1 Costes de impresión en FDM	99
5.2.2 Costes de impresión en SLS.....	107
5.2.3 Comparación de costes	112
5.2.4 Presupuesto online	113
5.3 Análisis del impacto medioambiental	115
5.3.1 Consumo del material	115
5.3.2 Consumo energético	116
5.3.3 Huella de carbono	116

Capítulo 6. Conclusiones y Trabajos Futuros.....	119
6.1 Conclusiones.....	119
6.2 Trabajos futuros.....	120
Capítulo 7. Bibliografía.....	121
Anexo I: Plano de la tija.....	125
Anexo II: Test de frenada.....	127
Anexo III: Código de matlab.....	130
Anexo IV: Ficha técnica Al mini	133
Anexo V: Ficha técnica Forms 3L.....	135
Anexo VI: Ficha técnica EOS M 290	137
Anexo V: Aluminio 6082-T6.....	138
Anexo VI: AlSi10Mg	140

Índice de ilustraciones

Ilustración 1: Metodología del proyecto. (fuente: propia).....	9
Ilustración 2: Resultado final del proyecto. (fuente: propia).....	10
Ilustración 3: Project methodology (own source).....	13
Ilustración 4: Final result of the project. (own source).....	14
Ilustración 5: Pasos de la impresión 3D. (fuente: ICAI)	15
Ilustración 6: Importancia de la orientación de impresión. (fuente: Protolabs)	17
Ilustración 7: Defectología de impresiones en 3D. (fuente: 3dnewworld).....	18
Ilustración 8:Funcionamiento de una impresora FDM. (fuente:(La impresión 3D en FDM – Academia, s. f.))	19
Ilustración 9: Funcionamiento de una impresora SLA. (fuente: GitHub)	19
Ilustración 10: Funcionamiento de una impresora de PBF. (fuente: 3DExperience)	20
Ilustración 11: Filamento PLA(fuente: Filament2Print)	21
Ilustración 12: Filamento ABS (fuente: BambuLab).	22
Ilustración 13: Filamento PETG (fuente: Filament2Print).	22
Ilustración 14: Filamento TPU (fuente: BambuLab).....	23
Ilustración 15: Resina Clear 4V.1 (fuente: Formlabs).....	24
Ilustración 16: Coste por unidad de fabricación en impresión 3D y fabricación tradicional (Busachi et al., 2017).	26
Ilustración 17:Costes de fabricación comparados con la complejidad de la pieza (fuente:Bernal-Plaza et al, 2025).	27
Ilustración 18: Aplicaciones de la impresión 3D (fuente: Temario de Tecnologías de Fabricación).....	28
Ilustración 19: Ejemplos de aplicaciones de impresión FDM. (fuente: cura 3D)	28
Ilustración 20: Ejemplo de aplicaciones de la impresión 3D en SLA en el sector médico. (fuente: CoCrea 3D)	29
Ilustración 21: ejemplos de aplicaciones de la impresión 3D en PBF. (fuente: JR3D).....	30
Ilustración 22: Ejemplo de optimización topológica.	30

Ilustración 23: Etapas de la optimización topológica. (fuente:(Prathyusha & Raghu Babu, 2022)).....	32
Ilustración 24: Pinza de freno de Bugatti (fuente: Impresoras3D.com)	35
Ilustración 25: Bisagra de un Airbus A320 optimizada topológicamente	36
Ilustración 26: estructura de un implante para pacientes que sufren atrofia maxilar.	37
Ilustración 27: Circuito de frenado (fuente: MotoStudent Regulation).....	38
Ilustración 28: Circuito de Gymkhana (fuente: MotoStudent Regulation).	38
Ilustración 29: Circuito de aceleración (fuente: MotoStudent Regulation).....	39
Ilustración 30: Metodología del trabajo. (fuente: propia).....	41
Ilustración 31: Motocicleta de la promoción 2023/2025. (fuente: ISC Racing Team)	42
Ilustración 32: Geometría de la moto. (fuente: ISC Racing Team).....	43
Ilustración 33: Medidas importantes de una moto. (fuente: ISC Racing Team)	44
Ilustración 34: Prototipo CAD de la motocicleta de la competición 2023/25 (fuente: ISC Racing Team)	45
Ilustración 35: Medidas de la horquilla de suspensión. (fuente: propia).....	45
Ilustración 36: Tija superior e inferior de la moto de ISC Racing Team. (fuente: propia) .	46
Ilustración 37: Tijas montadas sobre la moto del ISC Racing Team. (fuente: propia)	47
Ilustración 38: Circuito MotorLand de Aragón. (fuente: MotoStudent Regulation)	48
Ilustración 39: Fuerzas externas en el caso de frenada máxima. (fuente: propia).....	49
Ilustración 40: Reacciones internas de la rueda en el caso de frenada máxima. (fuente: propia).....	50
Ilustración 41: Reacciones internas en la horquilla de suspensión en el caso de frenada máxima. (fuente: propia)	52
Ilustración 42: Reacciones externas en el caso de frenada máxima en pendiente. (fuente: propia).....	53
Ilustración 43: Reacciones internas en la rueda delantera en el caso de frenada máxima con pendiente. (fuente: propia).....	55
Ilustración 44: Fuerzas aplicadas sobre la horquilla de suspensión en el caso de frenada máxima con pendiente. (fuente: propia)	56
Ilustración 45: Simulación de fuerzas del caso izquierdo. (fuente: propia)	58

Ilustración 46: Simulación de fuerzas del caso derecho. (fuente: propia).....	59
Ilustración 47: Fuerzas de apriete sobre las orejas de la tija inferior. (fuente: propia)	60
Ilustración 48: Plano de la tija de la competición 2023/2025 (Fuente: ISC Racing Team) 62	
Ilustración 49: Modelo original de la tija. (fuente: propia)	63
Ilustración 50: Datos del Aluminio 6082-T6. (fuente: propia).....	64
Ilustración 51: Fuerzas y restricciones aplicadas sobre la tija. (fuente: propia).....	64
Ilustración 52: Resultados de la simulación de tensiones del prototipo 1. (fuente: propia) 65	
Ilustración 53: Resultados de la simulación de los desplazamientos máximos del prototipo 1. (fuente: propia).....	66
Ilustración 54: Cargas y restricciones del prototipo 2. (fuente: propia)	67
Ilustración 55: Simulación de tensiones del prototipo 2. (fuente: propia).....	68
Ilustración 56: Cargas, restricciones y regiones preservadas del prototipo 3. (fuente: propia)	70
Ilustración 57: Resultado de la primera optimización topológica del prototipo 3. (fuente: propia).....	71
Ilustración 58: Segunda iteración de la optimización topológica del prototipo 3. (fuente: propia).....	73
Ilustración 59: Simulaciones FEM de la segunda iteración del prototipo 3. (fuente: propia)	73
Ilustración 60: Defectos sobre la superficie de la pieza. (fuente: propia)	74
Ilustración 61: Modelo CAD de la optimización topológica del prototipo 3. (fuente: propia)	75
Ilustración 62: Simulación de tensiones de la tercera iteración del prototipo 3. (fuente: propia).....	75
Ilustración 63: Simulación de la tercera iteración con un tamaño de malla menor. (fuente: propia).....	76
Ilustración 64: Resultado de la cuarta iteración de la optimización topológica. (fuente: propia).....	77
Ilustración 65: Vista cortada del interior de la tija. (fuente: propia)	78

Ilustración 66: Simulación de tensiones de la cuarta iteración del prototipo 3. (fuente: propia)	78
Ilustración 67: Cargas, restricciones y regiones preservadas del prototipo 4. (fuente: propia)	79
Ilustración 68: Resultado de la optimización del prototipo 4. (fuente propia)	79
Ilustración 69: Simulación de tensiones del prototipo 4. (fuente: propia)	80
Ilustración 70: Cargas, restricciones y regiones preservadas del prototipo 5. (fuente propia)	81
Ilustración 71: Resultado de la optimización del prototipo 5 al 18%. (fuente: propia)	82
Ilustración 72: Simulación del prototipo 5 reducido al 18%. (fuente: propia)	82
Ilustración 73: Resultado de la optimización del prototipo 5 al 10%. (fuente: propia)	83
Ilustración 74: Simulación del prototipo 5 reducido al 10%. (fuente: propia)	83
Ilustración 75: Resultado de la optimización reducida al 50%. (fuente: propia)	85
Ilustración 76: Resultados de la OT reducida al 50%. (fuente: propia)	86
Ilustración 77: Resultado de la OT reducida al 60%. (fuente: propia)	87
Ilustración 78: Resultados de la OT reducida al 57%. (fuente: propia)	88
Ilustración 79: Resultado de la OT reducida al 57% vista desde atrás. (fuente: propia)	88
Ilustración 80: Simulación de la OT reducida al 57%. (fuente: propia)	89
Ilustración 81: Tolerancias de conversión aplicadas al archivo .STL. (fuente: propia)	90
Ilustración 82: Botón de la polyNURBS. (fuente: propia)	91
Ilustración 83: Tija suavizada en Altair Inspire. (fuente: propia)	91
Ilustración 84: Resultado final de la tija suavizada. (fuente: propia)	92
Ilustración 85: Impresoras disponibles en ICAI. (fuente: ICAI)	93
Ilustración 86: Datos de impresión en FDM del prototipo de la tija. (fuente: propia)	94
Ilustración 87: Tija impresa en FDM en la A1 mini. (fuente: propia)	94
Ilustración 88: Prototipo impreso en FDM. (fuente: propia)	95
Ilustración 89: Tija impresa en la impresora Forms 3L. (fuente: propia)	96
Ilustración 90: Herramientas utilizadas para el postprocesado de la tija impresa en SLA. (fuente: propia)	96
Ilustración 91: Curado de la pieza. (fuente: propia)	97

Ilustración 92: Resultado de la tija impresa en SLA. (fuente: propia)	97
Ilustración 93: Datos de impresión en FDM de la pieza optimizada. (fuente: propia).....	99
Ilustración 94: Datos de impresión en FDM de la tija original. (fuente: propia)	101
Ilustración 95: Datos de la impresión en SLA de la tija optimizada. (fuente: propia)	103
Ilustración 96: Datos de impresión en SLA de la tija original. (fuente: propia)	105
Ilustración 97: Gráfico de la evolución del coste unitario en función del número de piezas impresas. (fuente: propia)	107
Ilustración 98: Datos de impresión en SLS. (fuente: propia)	108
Ilustración 99: Datos de impresión en SLS de la tija original. (fuente: propia)	111
Ilustración 100: Presupuesto de Xometry de la tija optimizada fabricada por DMLS. (fuente: propia).....	114
Ilustración 101: Presupuesto de Xometry para la fabricación de la tija original. (fuente: propia).....	115
Ilustración 102: Dimensiones de la tija inferior. (fuente: propia)	115

Índice de tablas

Tabla 1: Medidas de la moto de ISC Racing Team. (fuente: propia)	44
Tabla 2: Reacciones externas sobre la moto en el caso de frenada máxima. (fuente: propia)	50
Tabla 3: Reacciones internas en la rueda en el caso de frenada máxima. (fuente: propia) .	51
Tabla 4: Reacciones internas de las tijas en el caso de frenada máxima. (fuente: propia) ...	52
Tabla 5: Resultados de frenada máxima con pendiente. (fuente: propia)	54
Tabla 6: Reacciones en el eje de la rueda delantera en el caso de frenada máxima con pendiente. (fuente: propia).....	55
Tabla 7: Reacciones internas de las tijas en el caso de frenada máxima en pendiente. (fuente: propia).....	57
Tabla 8: Comparación de las reacciones en los dos estados de carga. (fuente: propia)	57
Tabla 9: Tabla de fuerzas y momentos en la sección izquierda y derecha. (fuente: propia)	58
Tabla 10: Comparación de la fuerza normal y la fuerza de rozamiento. (fuente: propia) ...	84
Tabla 11: Costes de impresión en FDM con la plantilla de ICAI. (fuente: propia)	100
Tabla 12: Costes de impresión en FDM con la plantilla de Bitfab. (fuente: propia).....	101
Tabla 13: Costes de impresión en FDM de la tija original. (fuente: propia)	102
Tabla 14: Costes de la impresión en SLA con la plantilla de ICAI. (fuente: propia).....	103
Tabla 15: Costes de la impresión en SLA con la plantilla de Bitfab. (fuente: propia).....	104
Tabla 16: Costes de impresión en SLA de la tija original. (fuente: propia)	106
Tabla 17: Evolución del coste unitario en función del número de piezas impresas. (fuente: propia).....	107
Tabla 18: Costes de la impresión en SLS con la plantilla de ICAI. (fuente: propia)	109
Tabla 19: Costes de la impresión en SLS con la plantilla de Bitfab. (fuente: propia)	110
Tabla 20: Costes de impresión en SLS de la tija original. (fuente: propia).....	112
Tabla 21: Comparación de precios de impresión del prototipo. (fuente: propia).....	112

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

Las empresas encargadas de la fabricación de piezas de uso final buscan optimizar los procesos de producción para que sean más eficientes y sostenibles. Gracias a los avances de los software de modelado en 3D (como SolidWorks, Fusion 360 o SolidEdge) y a la evolución de las técnicas de fabricación, las empresas son capaces de optimizar topológicamente el diseño de las piezas de forma que reduzca el tiempo y el coste de producción, así como el material utilizado.

La introducción de la fabricación aditiva (FA) en la industria de la manufactura otorga ciertas ventajas respecto a otros métodos de fabricación más tradicionales. Permite generar geometrías complejas de forma precisa y evita problemas de colabilidad y deformaciones debidas a técnicas de fabricación como la fundición en arena. Ayuda a construir de forma rápida y consistente sin incurrir en gastos adicionales, facilitando de esta forma el cálculo del impacto económico que tendría que soportar (Vicente Oliva, 2018).

Por otra parte, el desarrollo del diseño generativo permite optimizar topológicamente distintos elementos basándose únicamente en las cargas aplicadas, las superficies necesarias y el coeficiente de seguridad que se desea aplicar. Esto permite reducir al máximo el material necesario para fabricar la pieza.

El objetivo de este Trabajo de Fin de Grado (TFG) es estudiar la viabilidad técnico-económica de la optimización topológica y producción de piezas de uso final mediante la aplicación de técnicas de diseño generativo y diferentes métodos de fabricación aditiva.

Para finalizar el proyecto se estudiará el coste económico que conllevaría fabricar distintas piezas tras el proceso de optimización y se valorará su viabilidad si se busca abrir una planta de producción.

1.1 MOTIVACIÓN DEL PROYECTO

Los avances de la optimización topológica y la fabricación aditiva permiten explorar aún más los límites de los componentes de uso final en la industria para reducir el material utilizado y los costes de fabricación, manteniendo el esfuerzo mecánico de las piezas originales. Esto está mayormente relacionado con la industria del sector de vehículos tanto de uso doméstico como comercial, ya que pequeñas variaciones de peso pueden suponer grandes diferencias en cuanto a la eficiencia y costes de transporte. Desde un punto de vista económico.

Otra motivación para realizar este TFG es la posibilidad de aplicar los conocimientos adquiridos en el MotoStudent Team de ICAI. Los componentes desarrollados podrán ser utilizados para optimizar el proceso de construcción de una motocicleta real del equipo de ISC Racing de la Universidad Pontificia Comillas. El equipo competirá junto con otras universidades en un circuito de carreras y tendrá que pasar ciertas pruebas para poder clasificar y participar en la carrera final. Además, esta oportunidad permite estudiar con un ejemplo real la viabilidad técnica y económica de aplicar estas tecnologías en un proceso de fabricación real.

1.2 OBJETIVOS DEL PROYECTO

El objetivo de este TFG es la de estudiar la viabilidad técnico-económico del proceso de fabricación de componentes de uso final en la industria. Dependiendo de la dificultad de diseño y optimización de los componentes seleccionados, se analizarán entre uno y tres componentes de una motocicleta. Para la elección de dichos componentes, se estudiará el funcionamiento detallado de una moto y se analizarán qué piezas pueden ser más aptas para este proyecto. Para completar el proceso de validación técnico-económico, se estudiarán varias etapas del proceso de fabricación, sus costes y las propiedades de la pieza final.

Uno de los objetivos de este proyecto es el estudio del flujo de costes de fabricación de dichos componentes. Se estudiará los costes que supone la fabricación aditiva en cuanto a

costes de material, costes de energía, mano de obra, tiempo requerido para completar las piezas. También dada la importancia de los objetivos de desarrollo sostenible en la industria, se analizará el impacto ambiental que puede causar la fabricación en gran escala de estos componentes.

Para analizar las capacidades técnicas de los componentes, estos serán sometidos a varios ensayos de carga usando el software de SolidEdge para comprobar que cumplen con el margen de seguridad impuesto y que se pueden utilizar en la industria de la automoción. Otro factor que se debe comprobar es la posible defectología que puede surgir al usar algunos métodos de FA metálica como la fusión selectiva por láser (SLM por sus siglas en inglés) como la aparición de poros en su superficie (Balbás Calvo et al., s. f.)

1.3 ALINEACIÓN CON LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE

La Agenda 2030, impuesta por la ONU, consta de 17 objetivos que buscan promover una acción más sostenible, eficiente y justa en los ámbitos económico, social y ambiental. Para contribuir a cumplir estos objetivos de desarrollo sostenible, los proyectos deben alinearse con algunos de ellos.

8. TRABAJO DECENTE Y CRECIMIENTO ECONÓMICO

8.3 “Promover políticas orientadas al desarrollo que apoyen las actividades productivas, la creación de puestos de trabajo decentes, el emprendimiento, la creatividad y la innovación, y fomentar la formalización y el crecimiento de las microempresas y las pequeñas y medianas empresas, incluso mediante el acceso a servicios financieros” (Moran, s. f.-b)

Este TFG busca optimizar el proceso de fabricación de componentes mediante técnicas de FA promoviendo la creación de puesto de trabajo ya que se necesita mano de obra para completar el proceso de fabricación de las piezas y realizar los ensayos de calidad pertinentes para comprobar que cumple con los estándares de la industria.

9. INDUSTRIA INNOVACIÓN E INFRAESTRUCTURA

Este proyecto propone el uso de tecnologías innovadoras en la industria automotriz por lo que las pequeñas empresas pueden incorporarse a muchas industrias sin tener excesiva competencia. Además, también incentiva la inversión en nuevas infraestructuras que pueden revolucionar muchos sectores dedicados a la fabricación de componentes de uso final.

12. PRODUCCIÓN Y CONSUMO RESPONSABLE

12.5 “De aquí a 2030, reducir considerablemente la generación de desechos mediante actividades de prevención, reducción, reciclado y reutilización” (Moran, s. f.-a). Una de las ventajas más destacadas de la impresión 3D es la facilidad de fabricar piezas con un diseño más complejo lo que permite aplicar técnicas de optimización topológica para eliminar el material sobrante de diferentes elementos. Esto en cuestión reducirá el consumo de materia prima.

Capítulo 2. ESTADO DEL ARTE

2.1 IMPRESIÓN 3D

La impresión 3D (I3D), también conocida como fabricación aditiva (FA), surgió en 1983 con la invención de la estereolitografía (SLA, Stereolithography Apparatus) por parte de Chuck Hull, que, con ayuda de un láser ultravioleta, solidifica resina líquida capa por capa. También apareció la técnica SLS (Sinterización Selectiva por Láser) a mediados de 1980 con la que se imprimió la primera pieza metálica. Los avances más significativos continuaron a lo largo de la década de los 90 con la invención de la fusión selectiva por láser (SLM por sus siglas en inglés) en 1995 o la fabricación aditiva por láser (LAM) para aleaciones de titanio en 1997. Desde el año 2000, se continuó desarrollando las técnicas de impresión 3D hasta el punto en que muchos usuarios tienen acceso a impresoras de FDM (Fused Deposition Modeling) en sus casas o empresas hoy en día. (Balbás Calvo et al., s. f.; Bernal-Plaza et al., 2025a)

2.1.1 ETAPAS

La impresión 3D comienza con el diseño de un modelo CAD (Computer-Aided Design) 3D creado en un software de diseño como Solid Edge, SolidWrok o Fusion360. Una vez obtenido el diseño final, el archivo del modelo se guarda como un fichero de intercambio para abrirlo posteriormente en un laminador. Los archivos más usados son “.STL”, “.OBJ”, “.AMF” y “.3MF”, que destaca por guardar las texturas y los colores de las piezas. Para generar correctamente este archivo, se deben ajustar las tolerancias de conversión y el ángulo de la superficie para respetar la geometría del modelo inicial.

El archivo se importa en un software de laminador (slicer) como Bambu Studio, Preform u OrcaSlicer, en el que el modelo se descompone en capas y se configuran las variables de impresión. Algunas de las variables que más influyen en la calidad del resultado final son: la altura de capa, ya que una altura de capa menor mejora el acabado superficial a cambio

de un aumento del tiempo de impresión, o la configuración de los soportes cuando la geometría contiene voladizos o zonas que requieran apoyos durante la impresión.

Una vez ajustadas las variables de impresión, el software crea un archivo G-code que contiene las instrucciones de fabricación del modelo y se exporta a la impresora para comenzar la impresión.

Al finalizar la impresión, es necesario realizar una serie de operaciones de postprocesado para retirar los soportes y limpiar la pieza de posibles defectos superficiales o excedentes de material.

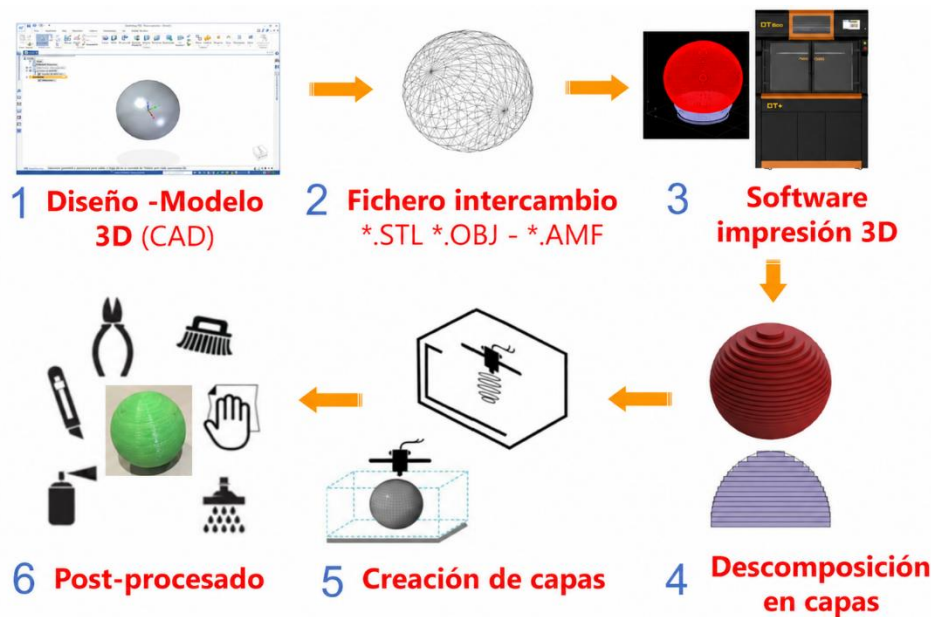


Ilustración 5: Pasos de la impresión 3D. (fuente: ICAI)

2.1.2 VENTAJAS, LIMITACIONES Y DEFECTOLOGÍA

A diferencia de técnicas de fabricación tradicionales como la fabricación substractiva (CNC, Computer Numerical Control) que elimina material para obtener la pieza final, la impresión 3D permite construir un objeto capa por capa utilizando únicamente el material estrictamente necesario. Esto es especialmente ventajoso cuando el material trabajado tiene costes elevados como el titanio. También permite generar formas complejas sin incurrir en costes

adicionales aparte de los relacionados con el volumen del material utilizado (Balbás Calvo et al., s. f.). Respecto a la fabricación por conformado, como la fundición o la forja, las tecnologías de I3D permiten fabricar piezas personalizadas, adaptables a las necesidades de cada cliente sin las inversiones necesarias para adquirir los útiles precisos (Korta, s. f., Article Women in 3D Printing). Otra ventaja que tiene la impresión 3D respecto a otros métodos de fabricación tradicionales es que permite aprovechar mejor los avances de la optimización topológica.

Sin embargo, existen algunos criterios de impresión y diseño que limitan el proceso de fabricación. Estos criterios se recogen bajo el concepto de “Diseñar para la fabricación aditiva” (DfAM, por sus siglas en inglés), que define pautas para adaptar el diseño a las limitaciones de la fabricación aditiva.

Todo modelo debe ser un cuerpo cerrado, ya que no se puede trabajar con una superficie sin espesor. En muchas tecnologías de fabricación se recomienda evitar voladizos o partes colgantes con un ángulo inferior a 45° respecto de la horizontal, ya que se requieren estructuras de soporte adicionales. El uso de soportes aumenta el uso de material, el tiempo de fabricación y el tiempo de postprocesado. También pueden generar defectos estéticos en las superficies de la pieza.

Otros factores a tener en cuenta al diseñar el modelo CAD son los grosores mínimos recomendados por cada tecnología y las tolerancias requeridas para las partes móviles para garantizar un movimiento suave y sin fricción excesiva. Además, el diseño de las piezas debe entrar dentro de las dimensiones máximas permitidas por el volumen de impresión y, si se imprimen múltiples diseños en el mismo espacio de trabajo, los modelos no pueden entrar en contacto entre sí. (Prismacim, 2019)

También es importante tener en cuenta la orientación de impresión según las cargas aplicadas sobre el modelo impreso. Si se aplican cargas cortantes sobre la pieza y las líneas de capas son paralelas a la carga, estas van a ceder y el modelo se rompe, por lo que, ante cargas cortantes, la dirección de las líneas de impresión debe ser perpendicular a la carga para

ofrecer una mayor resistencia. En cuanto a fuerzas normales, la dirección óptima es paralela a la dirección de las fuerzas aplicadas.

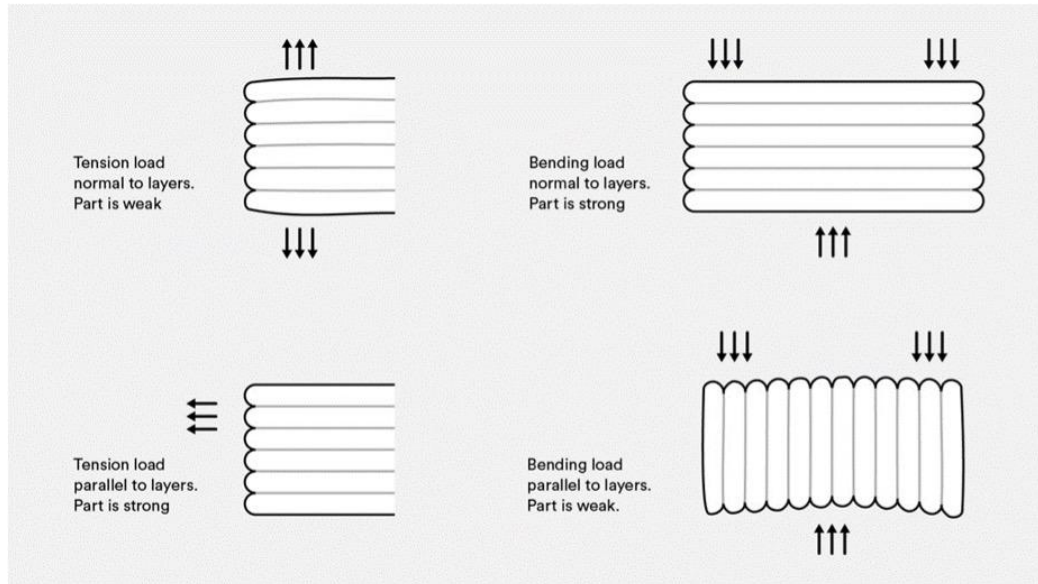


Ilustración 6: Importancia de la orientación de impresión. (fuente: Protolabs)

Al igual que otros métodos de fabricación, existe la posibilidad de que aparezcan defectos en el resultado final. Estos problemas dependen de factores como: el material utilizado, la orientación de la pieza o los parámetros de impresión y puede perjudicar la rigidez estructural de la pieza.

La primera capa de impresión es importante para asegurar que el modelo se adhiera correctamente y evitar desplazamientos durante la impresión. Una mala adhesión a la cama caliente puede resultar en superficies desplazadas o una impresión fallida. Sin embargo, esto se puede prevenir calibrando el nivel de la cama y manteniéndola libre de suciedad.

Otro tipo de defectos que pueden surgir son los problemas de extrusión. La extrusión de material sobrante o sobreextrusión deja rebabas sobre el prototipo final y una superficie rugosa y con poco detalle, aumentando el tiempo requerido de postprocesado final. También es perjudicial el caso contrario de subextrusión, ya que al no depositar el material necesario puede crear una estructura más frágil o, en casos extremos, puede dejar de imprimir. Para

solucionar estos problemas, se debe calibrar el flujo de extrusión de la boquilla (o hotend) y limpiarla regularmente.

También pueden aparecer defectos superficiales debido a la aparición de hilos, manchas y huecos debido a una mala configuración de los ajustes de temperatura o velocidad de retracción del material. Otro factor que influye en el acabado superficial es el uso de material de soporte. Cuando un modelo contiene voladizos o zonas colgantes, es necesario añadir soportes para apoyar el material mientras se imprime y evitar que se caiga. Sin embargo, las superficies que entran en contacto con el material de soporte tienen un acabado superficial de menor calidad y requieren de operaciones de postprocesado. Para evitar este problema, en las impresoras que permiten imprimir con múltiples materiales, es posible imprimir la pieza y los soportes utilizando materiales diferentes de forma que no se adhieran mutuamente. También es posible utilizar un material soluble en agua para imprimir los soportes y facilitar su eliminación en el postprocesado.

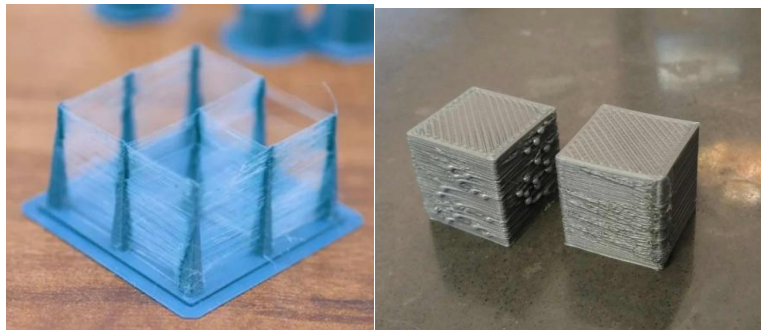


Ilustración 7: Defectología de impresiones en 3D. (fuente: 3dnewworld)

2.1.3 TIPOS

Las tecnologías de impresión más comunes en la industria son las siguientes:

Modelado por Deposición Fundida (FDM): utiliza materiales termoplásticos como PLA, ABS, PETG, nailon o CF (filamento con base de plástico mezclada con pequeñas partículas de fibra de carbono). El material se extrae a través de una boquilla metálica caliente y se deposita material capa por capa. Destaca por su fácil uso y bajo coste de impresión.

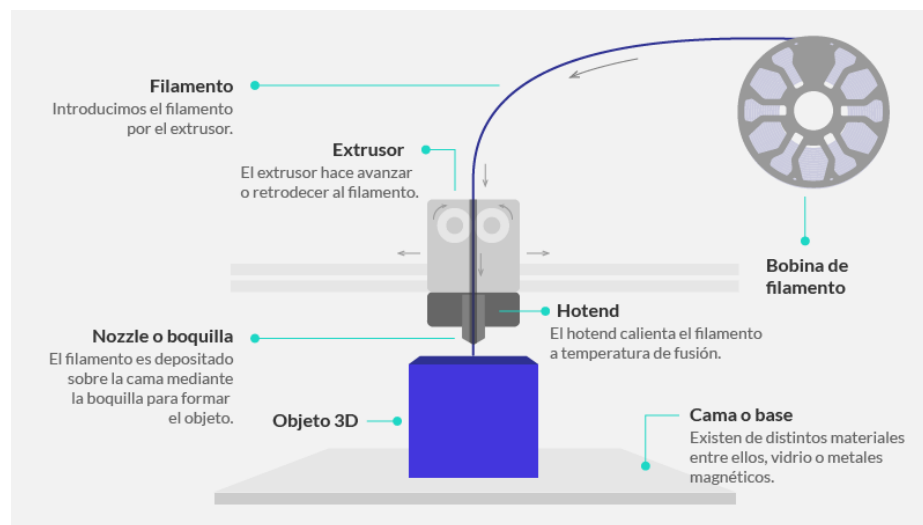


Ilustración 8: Funcionamiento de una impresora FDM. (fuente: (La impresión 3D en FDM – Academia, s.f.))

Esterolitografía (SLA): utiliza un rayo de luz ultravioleta para solidificar, capa por capa, una resina líquida fotosensible. Permite imprimir geometrías muy complejas y con mayor calidad que las impresoras FDM.

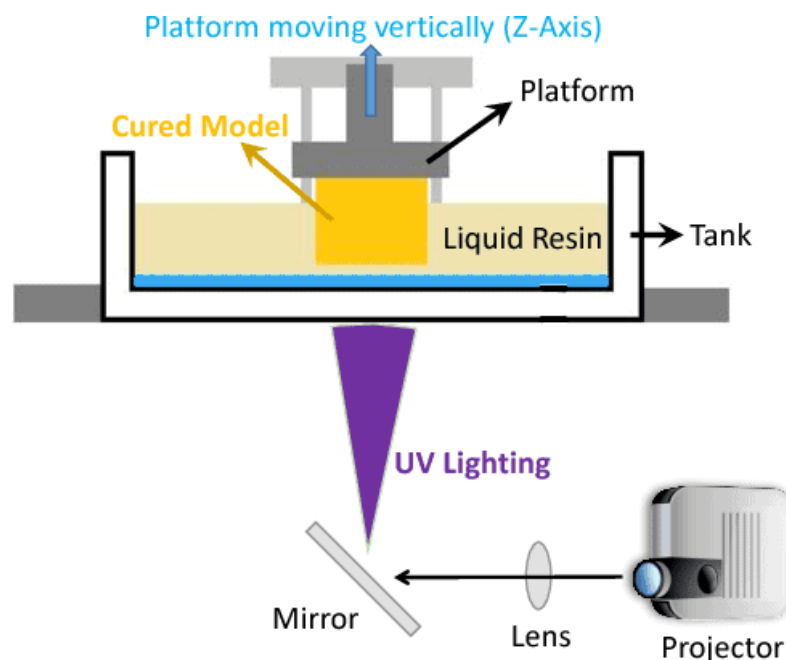


Ilustración 9: Funcionamiento de una impresora SLA. (fuente: GitHub)

Fusión Lecho de Polvo (PBF): es compatible con materiales metálicos, plásticos y cerámicos. La técnica de impresión por PBF engloba las tecnologías que utilizan polvo

como: SLM (Fusión Láser Selectiva) o DMLS (Direct Metal Laser Sintering) para partículas de metal, SLS (Sinterizado Selectivo por Láser) o MJF (Multi Jet Fusion) para partículas de plástico. La impresión más utilizada es la impresión con metales y aleaciones como titanio, acero inoxidable, aluminio e Inconel (familia de superaleaciones compuestas principalmente de níquel y cromo). En esta técnica de impresión, un rodillo extiende una pequeña capa de material y con un láser o un haz de electrones, se sinterizan las partículas de la capa de polvo correspondiente al diseño del modelo. El proceso se repite hasta completar la pieza y al terminar, se encuentra cubierta por el polvo de material no utilizado que actúa como soporte natural. Esta técnica tiene un acabado rugoso y requiere una limpieza profunda.

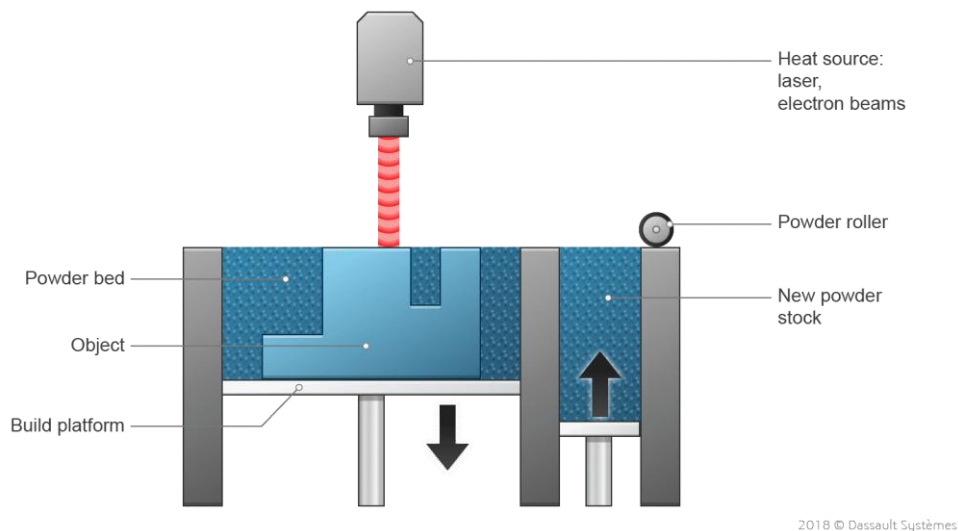


Ilustración 10: Funcionamiento de una impresora de PBF. (fuente: 3DExperience)

2.1.4 MATERIALES UTILIZADOS

Las propiedades mecánicas de la pieza final no dependen únicamente de la geometría de la pieza, sino también de las tecnologías de fabricación aditiva empleadas y del material seleccionado. Además, no todos los materiales son compatibles con todos los procesos de fabricación aditiva.

2.1.4.1 Materiales en impresión FDM

Las impresoras FDM, o impresoras de modelado por deposición fundida, utilizan filamentos termoplásticos que, con la ayuda de una boquilla caliente, se funden y se depositan capa por capa sobre una cama caliente. Esta tecnología permite imprimir con una gran variedad de materiales; cada uno con sus propiedades y características.

Los materiales termoplásticos más comunes son:

- PLA (ácido poliláctico): es el material más común y fácil de imprimir. Es rígido y fuerte, pero frágil y con menor resistencia al calor y a los productos químicos. Bajo las condiciones correctas, es un plástico biodegradable y tiene un origen vegetal (formlabs, s. f.).



Ilustración 11: Filamento PLA(fuente: Filament2Print)

El precio de una bobina de filamento de 1 kg ronda los 10 a 30€ dependiendo del color, las propiedades del PLA y el proveedor de filamento (*Filament2Print | Tienda online de impresión 3D profesional*, s. f.).

- ABS (acrilonitrilo butadieno estireno): es un material que destaca por su tenacidad y por ser muy duradero y resistente a golpes y al calor. Sin embargo, este material requiere de una buena ventilación durante la impresión, ya que libera COV (compuestos orgánicos volátiles) que pueden ser perjudiciales para la salud y es propenso a deformarse durante el proceso de enfriamiento. Este filamento se suele utilizar para fabricar prototipos funcionales.



Ilustración 12: Filamento ABS (fuente: BambuLab).

En BambuLab, 1 kg de filamento de ABS cuesta en torno a 22€

- PETG (tereftalato de polietileno glicolizado): Destaca por su resistencia y durabilidad. Es más resistente a la humedad y a los productos químicos que el PLA y se considera como un material intermedio entre el PLA y el ABS. Una limitación que presenta este tipo de filamento es el exceso de hilos durante la impresión. Si no se calibra correctamente la extrusión del material, el filamento tiende a gotear y deja hilos de plástico colgando sobre las piezas. Gracias a su versatilidad, este material se utiliza en muchas aplicaciones industriales (formlabs, s. f.).



Ilustración 13: Filamento PETG (fuente: Filament2Print).

El precio de un carrete de 1 kg de PETG es de 23€ en la página de BambuLab o de 33€ si se escoge el filamento PETG-CF. El PETG-CF es un filamento compuesto por una base de PETG y está reforzado con pequeñas fibras de carbono que aportan rigidez adicional al filamento.

- TPU (poliuretano termoplástico): su principal propiedad destacable es su flexibilidad y capacidad de estiramiento. Por esta razón, su principal aplicación es fabricar prototipos flexibles como juntas o fundas.



Ilustración 14: Filamento TPU (fuente: BambuLab).

El precio de una bobina de 1 kg de filamento TPU ronda los 30€, pero depende del proveedor.

2.1.4.2 Materiales en impresión SLA

Las impresoras de estereolitografía utilizan resinas líquidas fotosensibles y una luz ultravioleta para curar o solidificar la resina en las partes necesarias del modelo. Existen muchos tipos de resinas disponibles para el uso en impresoras SLA, sin embargo, las más utilizadas son:

- Resinas de uso general: son las más utilizadas en impresiones 3D por SLA y destacan por ofrecer gran detalle y un buen acabado superficial. Se suele utilizar para fabricar prototipos de diseño y piezas pequeñas con un alto nivel de detalle (*TIPOS DE RESINAS EN IMPRESIÓN 3D SLA*, s. f.). Existen múltiples resinas de uso general dependiendo de las aplicaciones, el grosor de capa deseado o la impresora utilizada.
- Clear Resin: Es un material completamente transparente y permite generar una alta resolución. El tipo de resina compatible con las impresoras Forms 3 y Forms 3L es Clear Resin V4. Tiene un módulo de tracción de 2300 MPa y una resistencia a la rotura por tracción de 53 MPa.

En la página oficial de FormLabs, 1L va desde 169,40€ (*Clear Resin V4.1*, s. f.).



Ilustración 15: Resina Clear 4V.1 (fuente: Formlabs)

2.1.4.3 Materiales en impresión PBF

Esta tecnología de fabricación permite imprimir componentes a partir de una amplia variedad de materiales en forma de polvo, entre los que se incluyen materiales termoplásticos y metálicos.

En el caso de los materiales poliméricos, el nylon (PA11) o poliamida es uno de los materiales más extendidos debido a sus propiedades mecánicas, su estabilidad dimensional y su baja densidad. El nylon 11 Powder tiene un precio de 845,79 € un paquete de 6 kg de polvo en la página oficial de Formlabs.

En cuanto a la fabricación aditiva metálica mediante la tecnología DLMS, dispone de una gran variedad de materiales en los que se incluyen: el titanio, acero inoxidable, aluminio y aleaciones de níquel. Para este estudio, es relevante el material ALSi10Mg ya que es uno de los materiales más empleados en los procesos de fabricación aditiva. Su baja densidad y sus propiedades mecánicas lo hacen un material idóneo para fabricar componentes en los que se ha aplicado un proceso de optimización topológica.

2.1.5 IMPLEMENTACIÓN EN EL MERCADO

A pesar de ser una tecnología relativamente reciente, varios estudios han empezado a analizar la viabilidad técnico-económica y sus beneficios en la industria. En 2023, el mercado de la impresión 3D con metales y polímeros, junto con los servicios de fabricación de piezas, se valoró en 10.500 millones de euros y las previsiones indican que en 2028 los

ingresos de esta industria alcanzarán los 20.000 millones de euros (*Additive Manufacturing market 2024 – AMPOWER Report on Additive Manufacturing*, s. f.).

Un factor que impulsa el desarrollo de la FA es la posibilidad de eliminar varios escalones de la cadena de producción al fabricar los componentes cerca del punto de consumo o incluso en las propias instalaciones del cliente, lo que reduce los costes de transporte, embalaje y distribución. Esto también reduce la necesidad de mantener un inventario amplio y permite adoptar una estrategia más eficiente impulsada por la demanda, disminuyendo costes de almacenamiento y gestión de logística.

Sin embargo, la integración de esta tecnología en el mercado presenta algunas limitaciones. Fabricar componentes mediante técnicas de impresión 3D supone altos costes energéticos, especialmente si se trata de técnicas de impresión metálicas (Vicente Oliva, 2018). Esto supone una desventaja económica para grandes volúmenes de producción, pues las técnicas de fabricación tradicionales resultan más rentables (Bernal-Plaza et al., 2025b). Por un lado, la FA por impresión 3D ofrece un coste por unidad constante independientemente del tamaño de lote de producción. Por el otro lado, el coste por unidad de los elementos fabricados mediante técnicas de fabricación tradicionales disminuye al aumentar el volumen de producción gracias al principio de economías de escala.

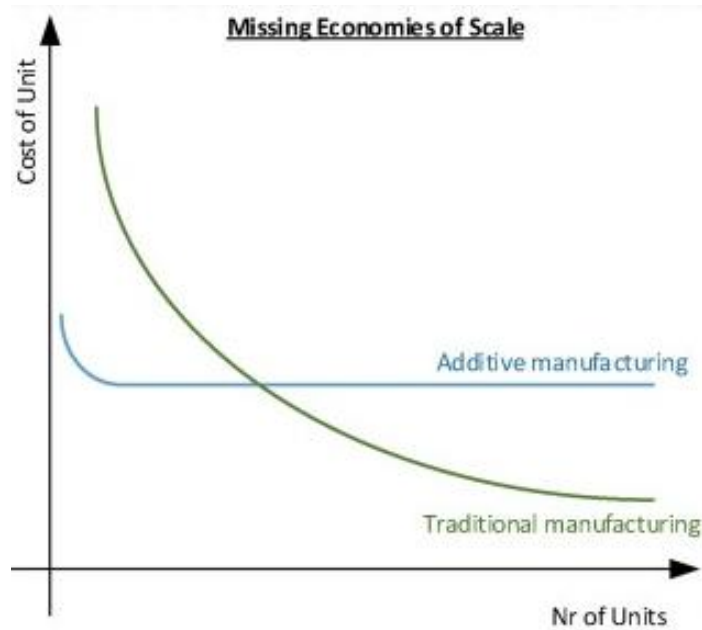


Ilustración 16: Coste por unidad de fabricación en impresión 3D y fabricación tradicional (Busachi et al., 2017).

Sin embargo, a diferencia de los procesos de fabricación convencionales, en los que el aumento de la complejidad implica un incremento significativo en los costes de producción, en la FA la complejidad geométrica tiene poca influencia en el coste final. Como se muestra en la Ilustración 16, para tamaños de lotes reducidos, entre 1 y 3000, las técnicas de fabricación aditiva resultan especialmente ventajosas en componentes con geometrías más complejas.

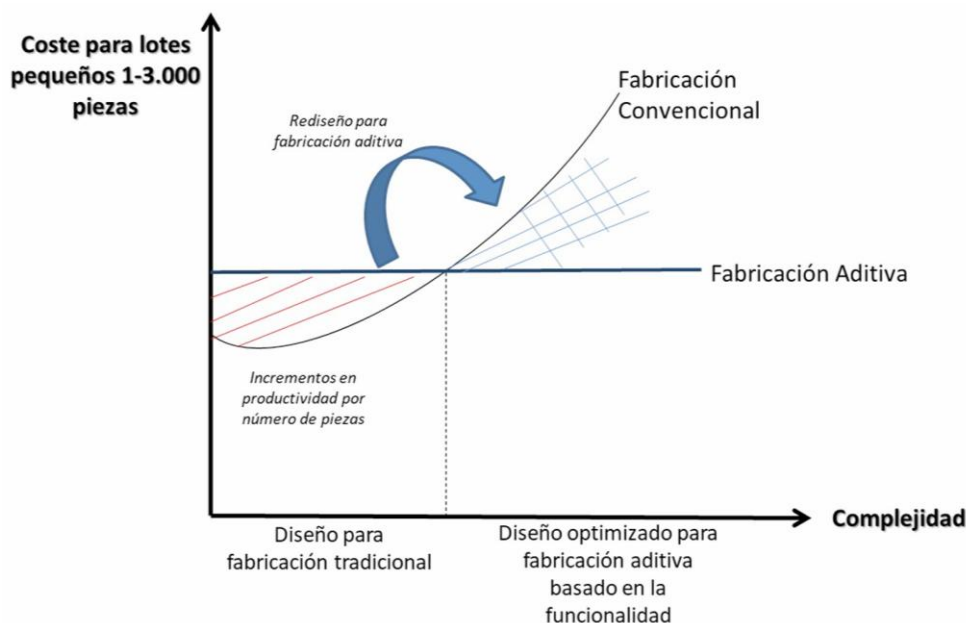


Ilustración 17: Costes de fabricación comparados con la complejidad de la pieza (fuente: Bernal-Plaza et al, 2025).

Para analizar la viabilidad económica de una pieza fabricada por impresión 3D, es necesario considerar las diferentes fuentes de costes. Los costes más relevantes son: el coste de filamento utilizado, el tiempo de impresión, el consumo energético, el mantenimiento de la máquina y su amortización, el proceso de preparación del archivo de impresión y el postprocesado de la pieza final.

2.1.6 APLICACIONES

Importantes empresas de las industrias automovilísticas, aeroespaciales o médicas ya han empezado a aplicar la impresión 3D para mejorar la fabricación frente a la tradicional (Bernal-Plaza et al., 2025a). La gran diversidad que proporciona la impresión 3D en cuanto a formas y materiales utilizados permite adaptarse al diseño de piezas más complejas y atender a las necesidades de los clientes.

					
Desarrollo de productos	Automoción (repuestos...)	Medicina-quirúrgico	Arquitectura	Aeronáutica	Alimentación
					
Producción	Joyería	Arte y Patrimonio	Textil-Moda	Juguetes-videojuegos	Deportes

Ilustración 18: Aplicaciones de la impresión 3D (fuente: Temario de Tecnologías de Fabricación)

La impresión con técnicas FDM se utiliza principalmente para el desarrollo de productos y la fabricación de herramientas o prototipos. Gracias a su bajo coste y facilidad de uso, permite adaptarse a numerosos sectores de la industria como el sector de arquitectura ya que permite generar plantillas o el sector de la automoción para fabricar piezas ligeras o soportes de elementos no estructurales. Algunos ejemplos de aplicaciones reales son: un soporte de sensores de aparcamiento, rejillas de ventilación del habitáculo o abrazaderas para fijar tubos o conductos.

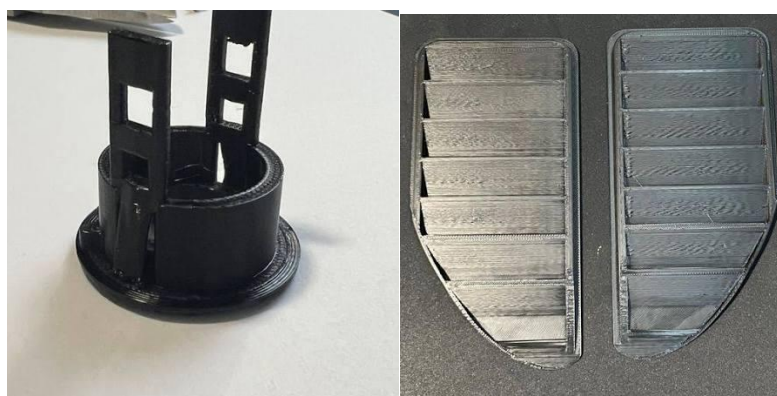


Ilustración 19: Ejemplos de aplicaciones de impresión FDM. (fuente: cura 3D)

En cuanto a la impresión mediante tecnologías de SLA, estas se utilizan principalmente cuando se necesita una alta precisión con un excelente acabado superficial y un alto nivel de

detalles. Estas tecnologías se pueden utilizar en el sector sanitario para modelos dentales o guías quirúrgicos personalizadas a cada paciente.



Ilustración 20: Ejemplo de aplicaciones de la impresión 3D en SLA en el sector médico. (fuente: CoCrea 3D)

Otros sectores que están aplicando estas tecnologías de impresión 3D son el sector de la joyería para crear prototipos de anillos, colgantes o pendientes o el sector de la investigación para crear micro prototipos para laboratorios o prototipos de dispositivos experimentales.

Por otra parte, la impresión por fusión de lecho de polvo con materiales metálicos presenta un amplio abanico de aplicaciones distintas gracias a su versatilidad. Los ejemplos de aplicaciones más comunes son el sector aeroespacial para fabricar soportes estructurales ligeros, el sector sanitario para crear prótesis personalizadas o implantes de titanio o el sector energético para fabricar componentes de turbinas.

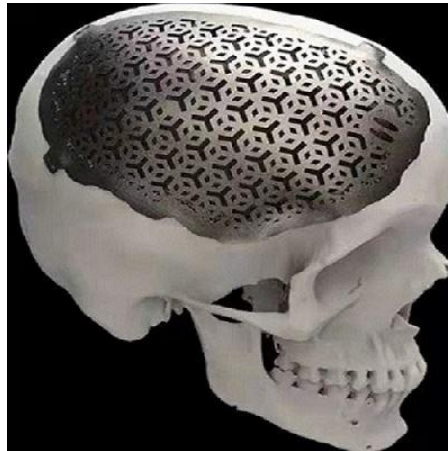


Ilustración 21: ejemplos de aplicaciones de la impresión 3D en PBF. (fuente: JR3D)

2.2 OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA

2.2.1 INTRODUCCIÓN

La optimización topológica (OT) es una técnica de diseño que aplica algoritmos matemáticos y físicos para diseñar una estructura óptima bajo los requisitos y restricciones impuestos por el usuario. El objetivo de esta tecnología es el de reducir el material utilizado mientras se conserva la integridad estructural de la pieza bajo el criterio de cargas establecido. (Ballesteros & Calzado, s. f.)



Ilustración 22: Ejemplo de optimización topológica.

La optimización topológica y el diseño generativo (DG) son dos herramientas de reducción de peso similares, pero con algunas características distintas. Por un lado, los algoritmos matemáticos y las simulaciones físicas de la OT proporcionan un resultado más preciso antes de las restricciones y los criterios establecidos, pero pueden generar geometrías irregulares y difíciles de fabricar. Sin embargo, la tecnología de diseño generativo se basa en algoritmos de inteligencia artificial para crear diseños alternativos que se adapten a las necesidades del usuario, proporcionando soluciones más eficientes y estéticas. (García García, Ignacio, 2014)

Actualmente existen múltiples herramientas de optimización topológica y diseño generativo que ofrecen resultados precisos y eficientes para mejorar el diseño de piezas. Los softwares más empleados actualmente son: ANSYS, Fusion 360, SolidWorks y plataformas de Siemens como Solid Edge y Altair Inspire.

2.2.2 ETAPAS

Los pasos a seguir para el proceso de optimización topológica de las piezas de estudio son los siguientes:

Obtención de un modelo 3D inicial. Este modelo sirve como base del estudio topológico y debe cumplir con las restricciones mecánicas del estado de carga establecido. Partiendo de este modelo, se sustrae material mediante el software de optimización topológica.

Reducción de masa. En este paso se determinan los parámetros deseados para el proceso de optimización topológica. Los parámetros que se deben establecer en el software de Solid Edge 2025 son: la calidad de estudio y el porcentaje de reducción de masa. La calidad de estudio es un ajuste que establece la precisión del estudio, el tamaño de malla utilizado para el análisis FEM (método de elementos finitos). Este parámetro se encuentra en un rango entre 1 y 300. Cuanto mayor es la calidad de estudio, más fina es la malla y el resultado final es más liso. Sin embargo, un estudio demasiado preciso consume muchos recursos de memoria RAM y lleva un tiempo de cálculo mayor. En cuanto al parámetro de reducción de masa, es el porcentaje de masa total eliminado del modelo original. También es necesario

definir el estado de cargas aplicadas y conservar las regiones funcionales de la pieza mediante restricciones volumétricas.

Validación del modelo optimizado. En este paso, se debe comprobar la resistencia mecánica ante los esfuerzos aplicados sobre la pieza. Mediante simulaciones FEM, se estudian la tensión máxima y las deformaciones de la pieza. Si este paso no es válido, se debe volver al paso anterior y ajustar los parámetros de la optimización topológica. En el caso en el que la simulación FEM sea válida, se puede continuar con el proceso de suavizado para obtener un modelo final.

Suavizado final: Una vez se haya obtenido el modelo final que satisfaga las restricciones y las cargas establecidas, se procede al suavizado de la superficie para obtener una geometría más uniforme.

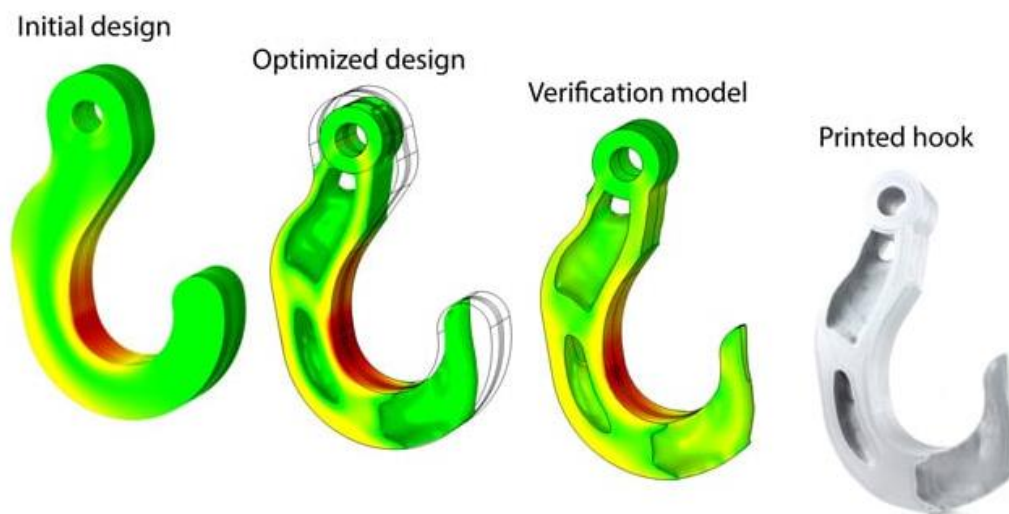


Ilustración 23: Etapas de la optimización topológica. (fuente: (Prathyusha & Raghu Babu, 2022))

En el caso de este proyecto, se ha utilizado el programa de Solid Edge para el diseño del modelo CAD inicial y para el proceso iterativo de la optimización, ya que permite optimizar y simular las cargas. Sin embargo, para la operación final de suavizado, se ha utilizado el software de Altair Inspire.

2.2.3 VENTAJAS Y LIMITACIONES

La implementación de la optimización topológica como herramienta de diseño de modelos 3D supone una serie de ventajas y limitaciones que se deben tener en cuenta a la hora de analizar la viabilidad de su uso para el diseño de la pieza final. Esta técnica de diseño resulta especialmente beneficiosa si se combina con tecnologías de fabricación aditiva.

El beneficio más destacado es la eliminación del material que no aporta resistencia estructural en las zonas menos cargadas, consiguiendo reducir el peso sin comprometer la rigidez estructural de la pieza. En algunos casos, se ha logrado reducir el peso hasta un 24% en piezas de unión mecánica (Meza et al., 2014). También puede mejorar el rendimiento estructural de algunos componentes al concentrar el material en las zonas más críticas, como en el caso de una manivela de Formula Student en la que se consiguió aumentar la rigidez estructural en un 32%(Mesicek et al., 2019). Otra ventaja es la optimización de los recursos y la reducción del impacto medioambiental.

Sin embargo, esta tecnología también tiene una serie de desventajas y limitaciones que se tienen que tener en cuenta. La optimización topológica requiere de procesos iterativos para cumplir con las condiciones establecidas por el usuario, por lo que la demanda computacional y el tiempo de desarrollo y rediseño son muy elevados. Además, las geometrías irregulares y complejas dificultan la fabricación de los componentes mediante técnicas de fabricación convencionales y dependen en gran parte de la impresión 3D. Además, esta dependencia limita el diseño de las geometrías, pues hay que tener en cuenta las limitaciones y los criterios de diseño de la FA.

2.2.4 APLICACIONES

El desarrollo y la mejora de las herramientas de optimización topológica han facilitado su expansión y asentamiento en múltiples sectores de la industria; sobre todo en aquellos en los que el principal objetivo es la mejora de la eficiencia y la reducción de los costes.

Algunas empresas en el sector aeroespacial y aeronáutico están empezando a implementar la OT como instrumento de diseño de componentes, ya que el peso de la aeronave está

directamente relacionado con el consumo de combustible. Por esta razón, la reducción de peso contribuye tanto a la disminución de los costes como a la reducción del impacto ambiental debido a las emisiones asociadas al consumo de combustible. Algunos casos destacados de esta tecnología son la reducción del 64% de masa de las bisagras de los Airbus A230 o el diseño de las costillas de las alas del Airbus A380. (Meza et al., 2014; Shi et al., 2020)

Otro de los sectores en los que ha implementado esta tecnología es el sector de la automoción. Un ejemplo de ello se encuentra en la competición de Formula Student en la que, con el uso de la optimización topológica, se logró reducir hasta un 7% el peso de un bell crank y aumentar su rigidez estructural en un 32% (Mesicek et al., 2019). De igual forma, en la industria de la bicicleta de montaña se consiguió reducir la masa de un componente de 410 g hasta 160 g sin comprometer sus propiedades estructurales (Zeleny & Cadek, 2015).

2.3 APLICACIONES EN LA INDUSTRIA

2.3.1 SECTOR AUTOMOCIÓN

La fabricación aditiva y la optimización topológica son dos tecnologías que se complementan entre sí. Mientras que la optimización topológica permite diseñar componentes más ligeros y con formas complejas, la FA facilita el proceso de fabricación.

Estas tecnologías han sido utilizadas en múltiples sectores de la industria, incluido el sector de la automoción. La conocida empresa de Bugatti experimentó con estas tecnologías en 2018.

Tradicionalmente, las pinzas de freno del coche superdeportivo Chiron se forjan a partir de una aleación de aluminio de alta resistencia. Sin embargo, la nueva pinza de freno está diseñada para ser impresa en 3D con una aleación de titanio y tiene un peso de 2,9 kg comparado con los 4,9 kg de la pieza original. Esto supone una reducción de casi el 41% de

la masa y no compromete la rigidez estructural de la pieza, sino que proporciona una resistencia mayor ante los esfuerzos aplicados (impresoras3d.com, 2018).



Ilustración 24: Pinza de freno de Bugatti (fuente: Impresoras3D.com)

2.3.2 SECTOR AEROESPACIAL

El sector aeroespacial es uno de los sectores que más se beneficia de la tecnología de optimización topológica, ya que la reducción de peso implica un ahorro importante en cuanto al combustible consumido durante un vuelo.

La empresa Airbus aplicó esta tecnología en un soporte de bisagra del avión Airbus A320 en el que consiguió reducir el peso total de dicho componente de 918 g de la pieza original a tan solo 326 g. Esto supone una reducción del 64% respecto a la pieza original y demuestra el potencial que tiene esta tecnología en futuras aplicaciones en el sector (Tomlin & Meyer, s. f.).

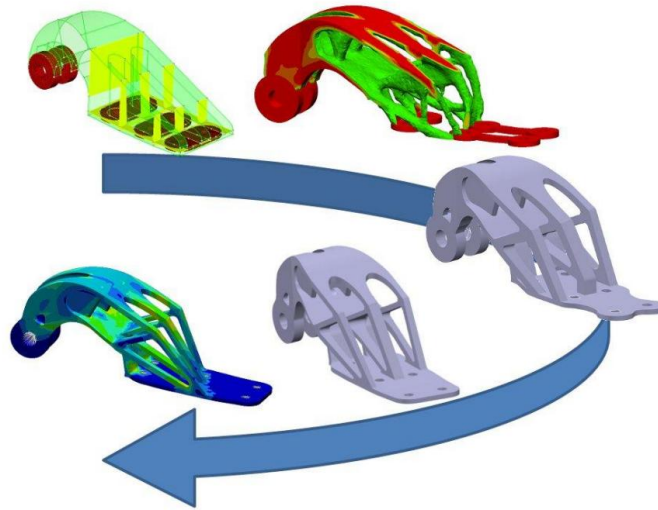


Ilustración 25: Bisagra de un Airbus A320 optimizada topológicamente

Otro ejemplo satisfactorio en el que se logró reducir la masa de un componente fue el de un soporte de conexión entre equipos en el que se redujo el peso en un 37% y fue fabricado mediante tecnologías de FA en una aleación de titanio (Chen et al., 2021).

2.3.3 SECTOR MÉDICO

Otro sector en el que se aplican estas tecnologías es el sector médico. Un grupo de investigadores lograron aplicar la optimización topológica junto con la fabricación aditiva para mejorar el diseño de implantes para pacientes con atrofia maxilar severa (Carnicero et al., 2021). En este trabajo, los investigadores lograron reducir la masa del modelo en un 25% sin comprometer su integridad mecánica ante los esfuerzos aplicados. El nuevo modelo fue fabricado mediante FA en una aleación de titanio y gracias a la OT se redujo el trauma quirúrgico sufrido por los pacientes. Además de esto, lograron reducir los tiempos de recuperación y minimizar los costes de producción y la complejidad de la operación, haciéndolo más accesible para aquellos que sufren este problema.

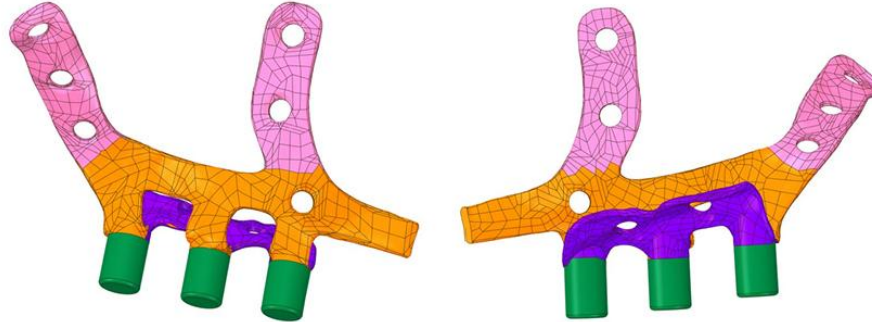


Ilustración 26: estructura de un implante para pacientes que sufren atrofia maxilar.

2.4 COMPETICIÓN MOTOStudent

La competición de MotoStudent es una competición internacional que se lleva a cabo cada dos años cuyo objetivo es el de diseñar y construir una moto partiendo desde cero. Se celebra en el circuito de MotorLand en Aragón dónde se reúnen equipos de universidades de España, Alemania, India, Canadá etc. La competición está dividida en dos categorías: MotoStudent eFuel y MotoStudent Electric (MotoStudent, 2026, p. 8) y ambas reflejan su compromiso por la sostenibilidad.

Dentro de la competición, se diferencian la fase MS1 centrada en las capacidades de ingeniería, organización y administración del equipo y la fase MS2 en el que se realizan las pruebas dinámicas y de rendimiento de la moto.

La primera fase de la competición (MS1) está dividida en siete hitos que se deben de seguir para garantizar la coordinación y organización del equipo y para facilitar la transición a la segunda fase (MotoStudent, 2026, p. 129)

La segunda fase (MS2) consiste en las pruebas dinámicas diseñadas para demostrar el rendimiento de la moto y evaluar su comportamiento. Cada equipo tiene dos intentos para completar una serie de pruebas dinámicas que se deben realizar.

El primer test consiste en el test de frenado en el que el piloto debe alcanzar una velocidad mínima de 80 km/h en un tiempo máximo de 10 segundos y se mide la distancia total de frenado como se muestra en la Ilustración 27. Si durante el tiempo de aceleración no se llega a alcanzar la velocidad mínima, el equipo es penalizado con las sanciones correspondientes.

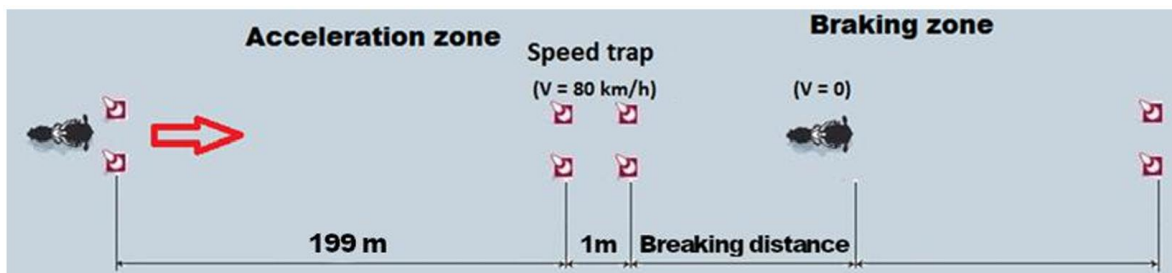


Ilustración 27: Circuito de frenado (fuente: MotoStudent Regulation).

La segunda prueba es el test de “Gymkhana”, mostrado en la Ilustración 28, y consiste en un circuito corto creado para medir la agilidad de las maniobras de la motocicleta y su capacidad de aceleración. Se mide el tiempo transcurrido entre el comienzo y el final de la prueba y se añaden las penalizaciones correspondientes si no se ha cumplido con las normas de la prueba o si el piloto ha tirado un cono.

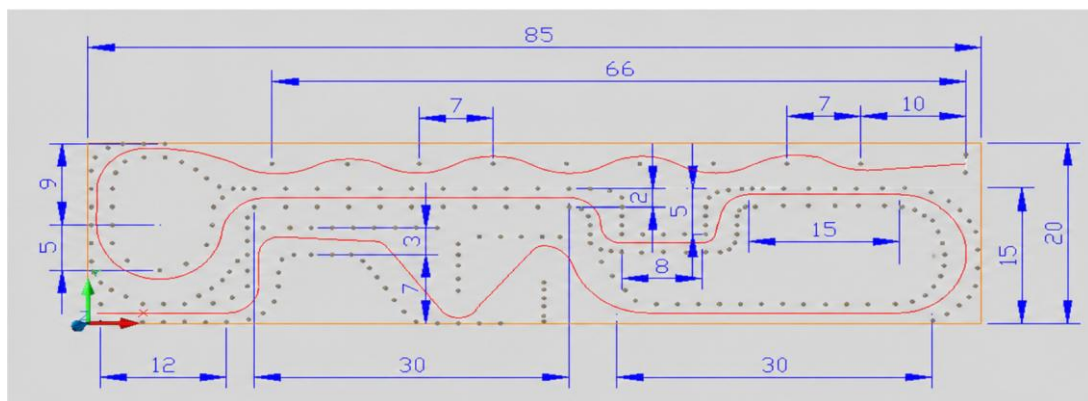


Ilustración 28: Circuito de Gymkhana (fuente: MotoStudent Regulation).

La tercera prueba es la prueba de aceleración en la que se mide la aceleración del prototipo de la motocicleta en una línea recta en un tramo de 150 m, representado en la Ilustración 29. En este test, se mide el tiempo transcurrido entre el inicio de la prueba y el momento en el que la motocicleta atraviesa la marca de los 150 m y se calcula la aceleración.

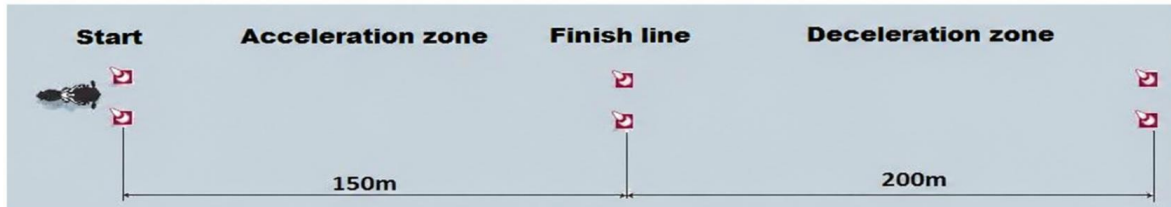


Ilustración 29: Circuito de aceleración (fuente: MotoStudent Regulation).

El test 5 mide la consistencia del prototipo y del piloto calculada con el tiempo de vuelta en una sesión inicial de calentamiento. Mientras que los tests 6 y 7 miden el rendimiento de la moto comparando la posición final durante la sesión de clasificación oficial y el tiempo de la mejor vuelta.

Los resultados de las primeras 3 pruebas de la competición de la VIII edición de MotoStudent están recogidos en el Anexo II: Test de frenada.

Capítulo 3. DEFINICIÓN DEL TRABAJO

3.1 METODOLOGÍA

La realización de este trabajo siguió los pasos establecidos por la metodología presentada en la Ilustración 30. Partiendo de un modelo CAD inicial de la tija, se validó mediante simulaciones en Solid Edge aplicando el estado de carga seleccionado sobre la pieza. Posteriormente se optimizó topológicamente y se iteró para hallar la reducción de volumen máxima que permitía resistir las cargas aplicadas. Finalmente se llevó a cabo una operación de suavizado para obtener una geometría más suave y sin irregularidades. Una vez obtenido el modelo CAD final, se fabricó un prototipo de la pieza con distintas técnicas de impresión 3D.

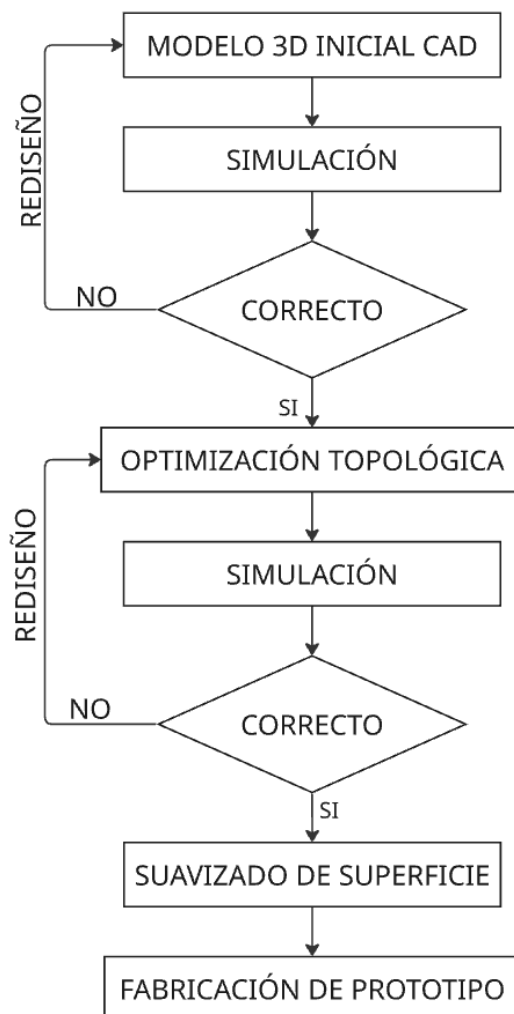


Ilustración 30: Metodología del trabajo. (fuente: propia)

3.2 GEOMETRÍA DE LA PIEZA EN LA MOTO

Para la realización de este trabajo, se contó con acceso a la información de la moto de las últimas 3 competiciones, por lo que el estudio se realizó con los datos y la geometría de la moto de la promoción 2023/2025 mostrada en la Ilustración 31.



Ilustración 31: Motocicleta de la promoción 2023/2025. (fuente: ISC Racing Team)

En la Ilustración 32 se muestra un esquema general de la geometría de la motocicleta, incluyendo algunas cotas y medidas importantes. Las medidas más características de una moto se encuentran marcadas en la Ilustración 33, en la que se destacan la distancia entre ejes, el *rake angle* o ángulo de lanzamiento y el offset. La Tabla 1 recopila todas las medidas importantes de la moto del ISC Racing Team y una aproximación del peso de la moto, del piloto y de otros componentes importantes para el cálculo de las fuerzas aplicadas sobre la tija.

La distancia entre ejes es una cota muy importante que mide la distancia entre el eje de la rueda delantera y el eje de la rueda trasera. Cuanto mayor sea esta distancia, mejor será la estabilidad de la moto en línea recta a altas velocidades, pero será menos ágil en curvas y en zonas más lentas. Se puede observar en la Ilustración 32 que la distancia entre ejes es de 1400 mm.

Por otro lado, el ángulo de lanzamiento es el ángulo que forma la horquilla de suspensión delantera con una vertical imaginaria que parte del eje de la rueda frontal. En el caso de la

moto del ISC Racing Team, este ángulo mide 23° , lo cual se considera un ángulo bajo, aunque las motos deportivas suelen estar entre los 22° y los 29° . Este parámetro afecta de forma indirecta a la estabilidad de la moto, ya que influye en la distancia de avance de la horquilla delantera o Front Ground Trail. A mayor ángulo de lanzamiento, la moto será más estable pero más lenta en las curvas (Herrero, 2021; Marcos, 2024).

Otro factor que afecta a la distancia de avance es el offset o desplazamiento. El offset es la distancia perpendicular entre el eje de la dirección y los agujeros de la horquilla de suspensión y afecta al movimiento de la dirección y la fuerza que debe hacer el piloto para girarla (Gancedo, 2024).

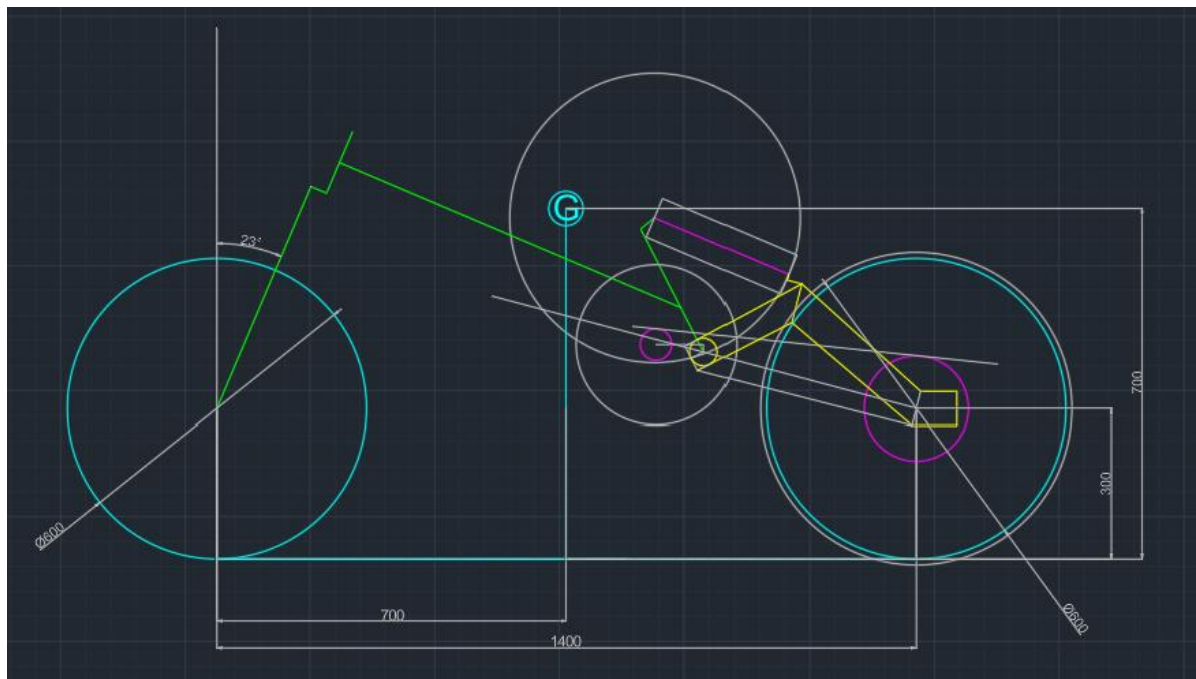


Ilustración 32: Geometría de la moto. (fuente: ISC Racing Team)

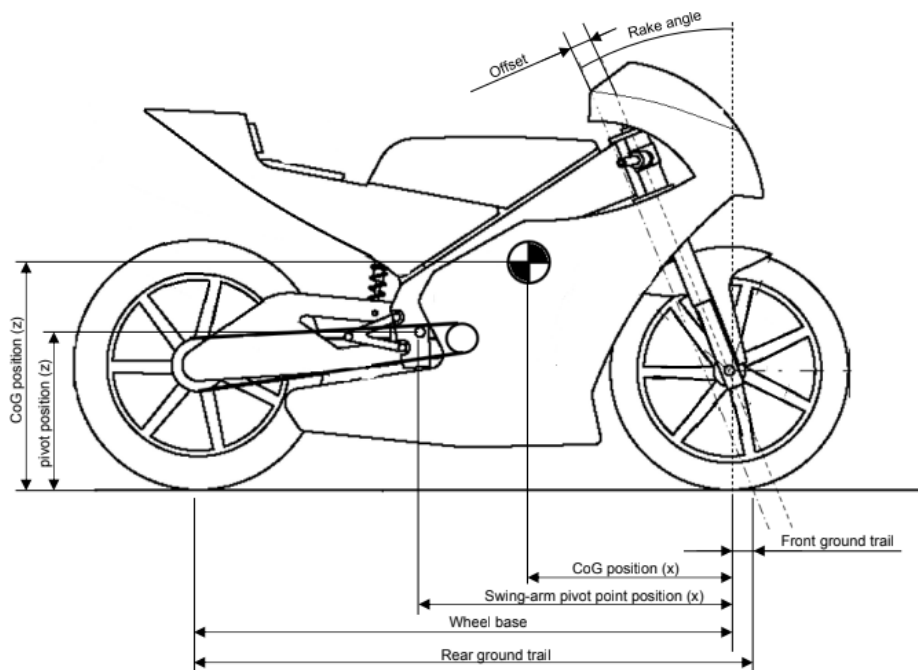


Ilustración 33: Medidas importantes de una moto. (fuente: ISC Racing Team)

Batalla de la moto (distancia entre la rueda trasera y delantera).	1400 mm
Distancia del centro de gravedad al eje trasero.	700 mm
Offset	34 mm
Ángulo de lanzamiento	23°
Masa de la moto	130 kg
Masa del piloto	80 kg
Masa de la rueda	3,5 kg
Masa de la horquilla	4 kg

Tabla 1: Medidas de la moto de ISC Racing Team. (fuente: propia)

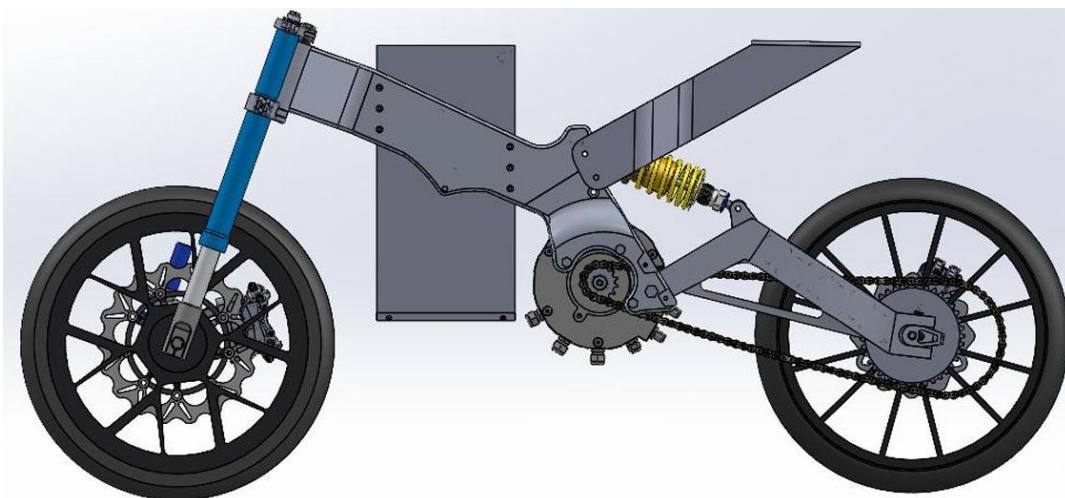


Ilustración 34: Prototipo CAD de la motocicleta de la competición 2023/25 (fuente: ISC Racing Team)

Otras medidas relevantes para el desarrollo de este trabajo son las medidas de las longitudes de la horquilla de la suspensión, como se muestra en la Ilustración 35, medidas sobre el prototipo de la motocicleta de la Ilustración 34: Prototipo CAD de la motocicleta de la competición 2023/25 (fuente: ISC Racing Team).

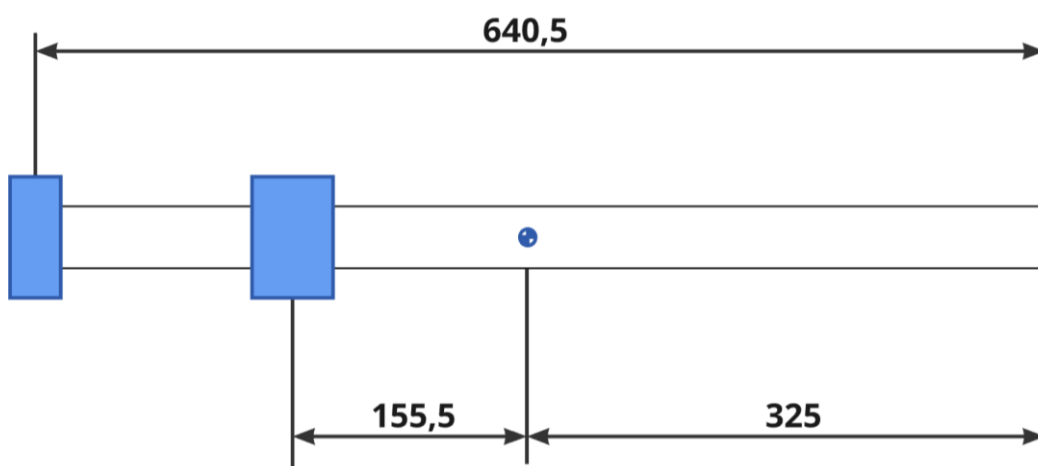


Ilustración 35: Medidas de la horquilla de suspensión. (fuente: propia)

3.3 PIEZA SELECCIONADA

La pieza seleccionada para este estudio se trata de la tija inferior de la moto del ISC Racing Team de ICAI. Las motos convencionales poseen dos tijas, la tija superior y la inferior, situadas en la suspensión del tren delantero de la moto.



Ilustración 36: Tija superior e inferior de la moto de ISC Racing Team. (fuente: propia)

La tija inferior se encuentra por debajo de la tija superior y va unida al eje de dirección y apoyada sobre dos rodamientos de forma que permite el giro del manillar. Para el correcto funcionamiento del sistema de suspensión, los agujeros de los laterales, por donde pasan los tubos telescópicos de la horquilla de suspensión, deben estar alineados con los agujeros correspondientes de la tija superior.



Ilustración 37: Tijas montadas sobre la moto del ISC Racing Team. (fuente: propia)

Como norma general, la tija inferior es más gruesa que la superior y tiene un sistema de abrazaderas para asegurar que se ejerce presión sobre los tubos de suspensión y se impide el movimiento.

La geometría de la tija es un factor clave que afecta el manejo, la estabilidad y la velocidad de la moto tanto en rectas como en curvas. La medida más importante de la tija es el offset, ya que afecta de forma directa a la distancia de avance de una moto. El prototipo de tija de la moto de la edición 2023/2025 fija esta distancia en 34 mm.

3.4 ESTUDIO DE CARGAS

La competición de MotoStudent se lleva a cabo en el circuito de Motorland en Aragón. Este circuito presenta curvas cerradas, rectas donde se alcanzan velocidades máximas y zonas donde se debe aplicar una frenada brusca.

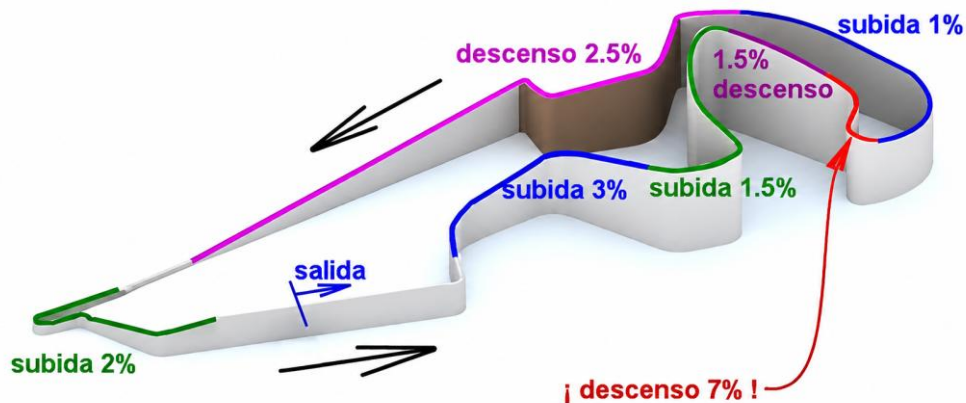


Ilustración 38: Circuito MotorLand de Aragón. (fuente: MotoStudent Regulation)

Las zonas más críticas en el circuito son: la zona de color rosado, con un descenso del 2,5%, ya que se alcanza la velocidad máxima durante este tramo; seguida de esto, la zona coloreada en verde oscuro también es una zona muy crítica, ya que se debe frenar al máximo para poder tomar la curva tan cerrada. Sin embargo, la zona más crítica del circuito que se ha utilizado como base del estudio de este TFG es la zona representada por el color rojo, ya que presenta la pendiente de mayor descenso en todo el circuito con un descenso del 7,2%

Para la realización de este apartado se han aproximado algunas medidas relevantes para el cálculo de las fuerzas aplicadas sobre la moto. Se ha asumido un peso del piloto de 80 kg y un peso de la moto de 130 kg creando una masa total del conjunto de moto más piloto de 210 kg. También se han aproximado el peso de la horquilla y de la rueda a 4 y 3,5 kg respectivamente.

3.4.1 FRENADA MÁXIMA

En la fase MS2 se realizan varias pruebas dinámicas en las que se evalúa el rendimiento de la motocicleta. Estas pruebas incluyen un test de frenada máxima en el que se debe alcanzar una velocidad de más de 80 km/h y se mide la distancia total de frenado. Si no se alcanza dicha velocidad, el equipo es penalizado acorde con el reglamento. (*MS2425_MotoStudent Regulations_Motorland Aragón.pdf*, s. f., pp. 131-132)

El valor de la deceleración máxima se calculó a partir de la distancia de frenado obtenida en la competición de octubre de 2023. En la última prueba de frenada máxima, el equipo de ISC Racing Team UPC alcanzó una distancia de frenado de 34,1 m al frenar con máxima potencia, alcanzando 76,923 km/h (21,3675 m/s). Estos datos están recopilados en el Anexo II: Test de frenada en el que se muestran todos los resultados obtenidos por las universidades que participaron en esta competición.

Con estos datos y derivando las leyes de la cinemática, se calculó la deceleración asociada a una frenada máxima.³

$$E. 1 \quad a = \frac{v_f^2 - v_i^2}{2 \cdot d} = \frac{0^2 - 21,3675^2}{2 \cdot 34,1} = -6,695 \text{ m/s}^2$$

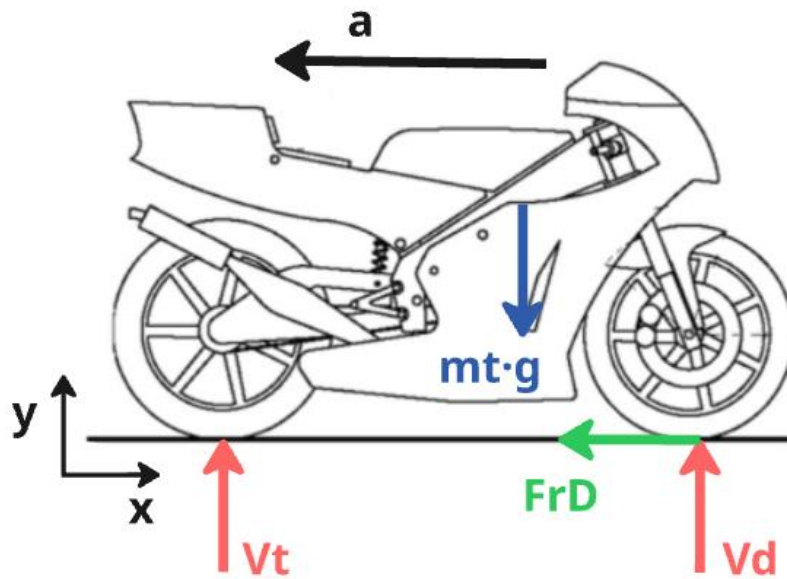


Ilustración 39: Fuerzas externas en el caso de frenada máxima. (fuente: propia)

Para los cálculos de las reacciones en la moto se ha asumido la hipótesis en la que la rueda trasera se eleva. Esta hipótesis proporciona un estado de cargas más crítico sobre las tijas ya que si se asume que no se eleva la rueda trasera, la fuerza normal se distribuye entre ambas ruedas, reduciendo el esfuerzo que deben soportar las tijas de la moto.

Partiendo de la Ilustración 39 y aplicando el principio de equilibrio de fuerzas, se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$E. 2 \quad V_T = 0$$

$$E. 3 \quad \sum F_H = m_T \cdot a \rightarrow -F_{rD} = -m_T \cdot a$$

$$E. 4 \quad \sum F_V = 0 \rightarrow V_T + V_D - m_T \cdot g = 0$$

Sustituyendo los datos y operando, se obtienen los resultados de las reacciones externas de la moto en el caso de frenada máxima recopilados en la Tabla 2.

Reacciones	Resultado (N)
F_{rD}	1405,86
V_D	2060,10
V_T	0

Tabla 2: Reacciones externas sobre la moto en el caso de frenada máxima. (fuente: propia)

A continuación, se analizan las reacciones internas en la rueda delantera con los resultados obtenidos en el paso anterior. La Ilustración 40 muestra las reacciones en el eje de la rueda, la dirección de la aceleración y las fuerzas externas aplicadas sobre la rueda.

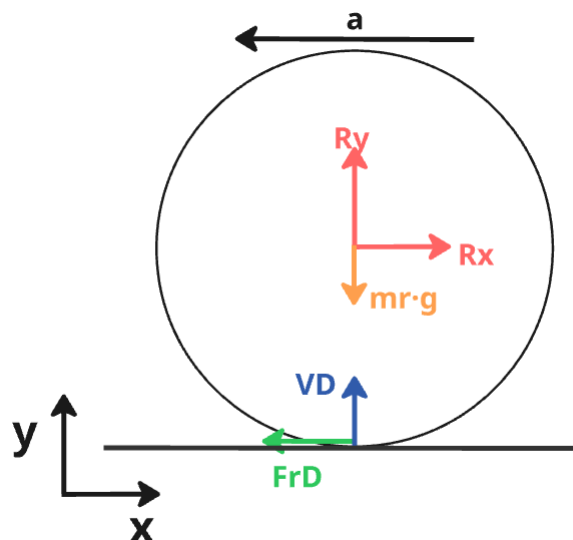


Ilustración 40: Reacciones internas de la rueda en el caso de frenada máxima. (fuente: propia)

Aplicando el equilibrio de fuerzas, se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$E. 5 \quad \sum F_H = -m_T \cdot a \rightarrow R_x - F_{rD} = -m_T \cdot a$$

$$E. 6 \quad \sum F_V = 0 \rightarrow R_y + V_D - m_r \cdot g = 0$$

Resolviendo, se obtienen los resultados recopilados en la tabla xx.

Reacciones	Resultados (N)
R_x	1382,43
R_y	-2025,77

Tabla 3: Reacciones internas en la rueda en el caso de frenada máxima. (fuente: propia)

En el siguiente paso, se calcula el equilibrio de fuerzas en la horquilla de suspensión delantera. La

Ilustración 41 muestra el conjunto de fuerzas aplicadas sobre la suspensión incluidas las reacciones internas de la rueda con la misma magnitud, pero sentido contrario.

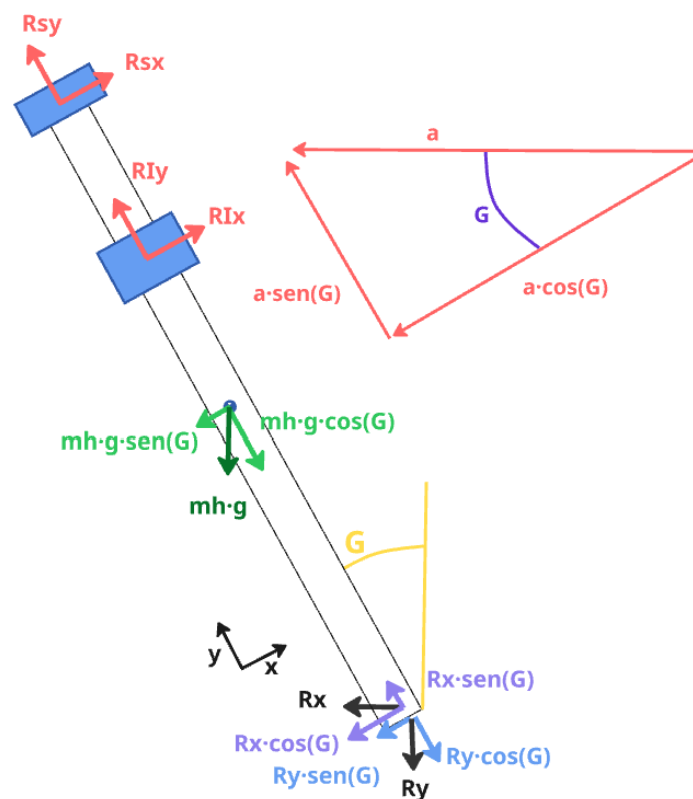


Ilustración 41: Reacciones internas en la horquilla de suspensión en el caso de frenada máxima. (fuente: propia)

Partiendo del diagrama presentado en la Ilustración 41, se obtienen las siguientes ecuaciones:

Sumatorio de las fuerzas horizontales:

$$E. 7 \quad \sum F_H = -m_h \cdot a \cdot \cos(\gamma) \rightarrow R_{Sx} + R_{Ix} - m_h \cdot g \cdot \sin(\gamma) - R_y \cdot \sin(\gamma) - R_x \cdot \cos(\gamma) = -m_h \cdot a \cdot \cos(\gamma)$$

Sumatorio de las fuerzas verticales:

$$E. 8 \quad \sum F_V = m_h \cdot a \cdot \sin(\gamma) \rightarrow R_{Sy} + R_{Iy} - m_h \cdot g \cdot \cos(\gamma) - R_y \cdot \cos(\gamma) + R_x \cdot \sin(\beta) = m_h \cdot a \cdot \sin(\gamma)$$

Equilibrio de los momentos flectores tomando el origen desde la posición de la tija inferior:

$$E. 9 \quad \sum M_I = 0 \rightarrow -R_{Sx} \cdot 160 - m_h \cdot g \cdot \sin(\gamma) \cdot 155,5 - R_x \cdot \cos(\gamma) \cdot 480,5 - R_y \cdot \sin(\gamma) \cdot 480,5 = 0$$

Los resultados están recopilados en la Tabla 4 a continuación:

Reacciones	Resultados (N)
R_{Sx}	-3831,53
R_{Sy}	-1179,15
R_{Ix}	4303,22
R_{Iy}	-1179,15

Tabla 4: Reacciones internas de las tijas en el caso de frenada máxima. (fuente: propia)

3.4.2 FRENADA MÁXIMA EN PENDIENTE

Al igual que en el apartado anterior, se supuso el caso límite en el que la rueda trasera perdió contacto con el suelo. Además, se supone que se realizó la frenada máxima en la parte del

circuito de mayor pendiente descendente. Como se observó en la Ilustración 38, la mayor pendiente del circuito es de 7.2%.

El cálculo para calcular los grados de la pendiente es el siguiente:

$$E. 10 \quad \text{pendiente} = \arctan\left(\frac{7.2}{100}\right) = 4,12^\circ$$

El cálculo de las fuerzas aplicadas sobre la tija inferior se realizó teniendo en cuenta una serie de aproximaciones. Se aproximó el peso de la moto, la rueda y la horquilla de suspensión delantera. El procedimiento del cálculo de las fuerzas internas de la tija se realizó siguiendo la metodología propuesta por un estudio similar de la Universidad de Cantabria (Martin Ahedo, 2025).

El primer paso supone el cálculo de las reacciones externas del conjunto de la motocicleta.

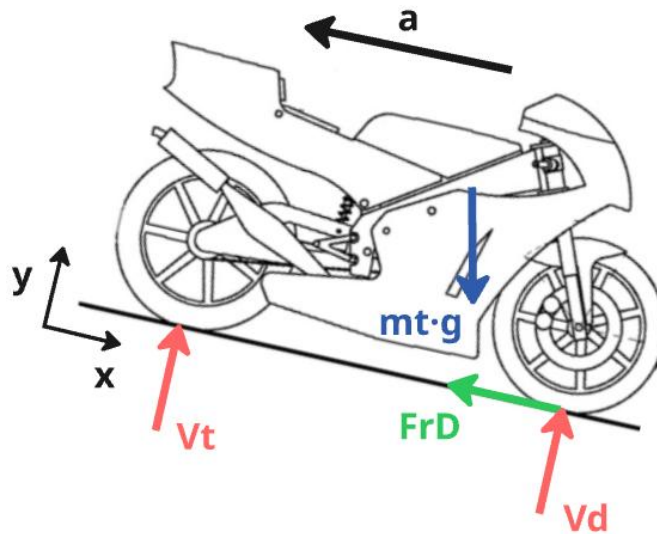


Ilustración 42: Reacciones externas en el caso de frenada máxima en pendiente. (fuente: propia)

En la Ilustración 42, se representa la aceleración de la moto en sentido negativo, ya que se trabajará con el módulo de esta y se representa el signo negativo con el sentido de la flecha en los diagramas. En el diagrama también se incluyen; V_T , la reacción vertical de la rueda trasera, V_D , la reacción vertical de la rueda delantera y F_{rD} , la fuerza de rozamiento de la rueda delantera con el suelo.

Como en este estudio se supone el caso en el que la rueda trasera pierde contacto con el suelo, la reacción normal de esta es nula.

$$E. 11 \quad \sum F_H = m_T \cdot a \rightarrow -F_{rD} + m_T \cdot g \cdot \sin(\alpha) = -m_T \cdot a$$

$$E. 12 \quad \sum F_V = 0 \rightarrow V_T + V_D - m_T \cdot g \cdot \cos(\alpha) = 0$$

De estas ecuaciones se obtienen los valores de la fuerza de rozamiento de la rueda delantera y la reacción vertical ejercida por el suelo. Como se ha supuesto que este estudio se realiza en el caso límite en el que la rueda trasera no está en contacto con el suelo, la reacción vertical de esta es nula.

Resolviendo las ecuaciones, se obtienen los resultados resumidos en la Tabla 5.

<i>Reacciones</i>	<i>Resultados (N)</i>
F_{rD}	1553,87
V_D	2054,78
V_T	0

Tabla 5: Resultados de frenada máxima con pendiente. (fuente: propia)

A continuación, se calculan las reacciones internas en el eje de la rueda.

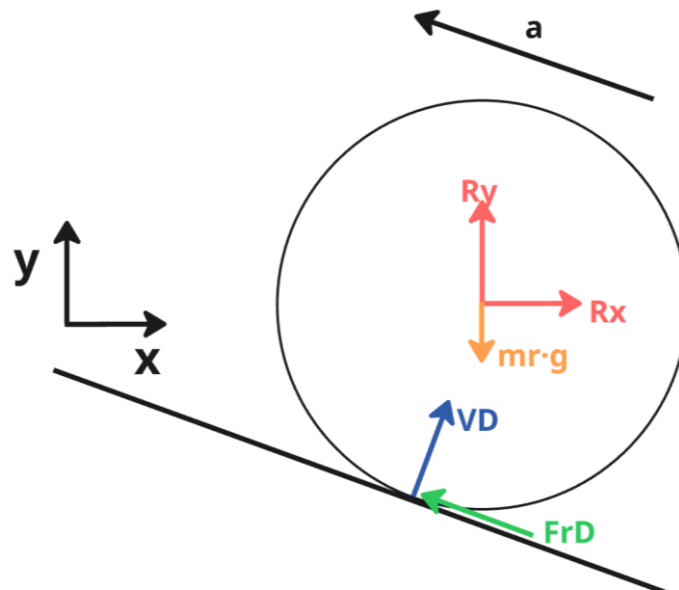


Ilustración 43: Reacciones internas en la rueda delantera en el caso de frenada máxima con pendiente.

(fuente: propia)

En las siguientes ecuaciones, m_r representa la masa de la rueda que se estima que pesa 3,5 kg.

$$E. 13 \quad \sum F_x = m_r \cdot (-a) \cdot \cos(\alpha) \rightarrow R_x + V_D \cdot \sin(\alpha) - F_{rD} \cdot \cos(\alpha) = -m_r \cdot a \cdot \cos(\alpha)$$

$$E. 14 \quad \sum F_y = m_r \cdot a \cdot \sin(\alpha) \rightarrow R_y + V_D \cdot \cos(\alpha) + F_{rD} \cdot \sin(\alpha) - m_r \cdot g = m_r \cdot a \cdot \sin(\alpha)$$

Resolviendo las ecuaciones de sumatorios de fuerzas en los ejes x e y, se obtienen los siguientes resultados recopilados en la Tabla 6.

Reacciones	Resultados (N)
Rx	1378,86
Ry	-2125,09

Tabla 6: Reacciones en el eje de la rueda delantera en el caso de frenada máxima con pendiente. (fuente: propia)

A continuación, en la Ilustración 44 se puede observar el diagrama de equilibrio de fuerzas de la horquilla de suspensión en el caso de frenada máxima en pendiente.

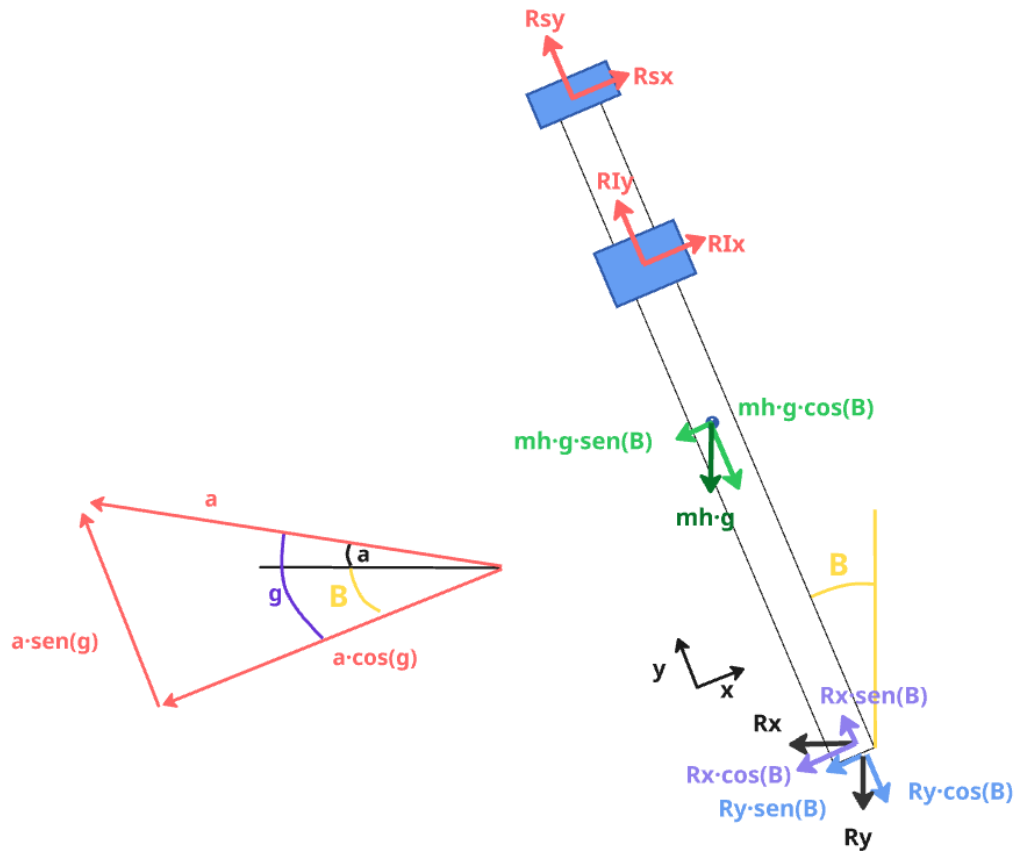


Ilustración 44: Fuerzas aplicadas sobre la horquilla de suspensión en el caso de frenada máxima con pendiente. (fuente: propia)

Las siguientes ecuaciones se basan en el equilibrio de fuerzas y momentos para obtener las fuerzas normales y cortantes y el momento flector aplicado a lo largo de la horquilla de suspensión de la motocicleta.

Sumatorio de las fuerzas horizontales:

$$E. 15 \quad \sum F_H = -m_h \cdot a \cdot \cos(\gamma) \rightarrow R_{Sx} + R_{Ix} - m_h \cdot g \cdot \sin(\beta) - R_y \cdot \sin(\beta) - R_x \cdot \cos(\beta) = -m_h \cdot a \cdot \cos(\gamma)$$

Sumatorio de las fuerzas verticales:

$$E. 16 \quad \sum F_V = m_h \cdot a \cdot \sin(\gamma) \rightarrow R_{Sy} + R_{Iy} - m_h \cdot g \cdot \cos(\beta) - R_y \cdot \cos(\beta) + R_x \cdot \sin(\beta) = m_h \cdot a \cdot \sin(\gamma)$$

Equilibrio de los momentos flectores tomando el origen desde la posición de la tija inferior:

$$E. 17 \quad \sum M_I = 0 \rightarrow -R_{Sx} \cdot 160 - m_h \cdot g \cdot \sin(\beta) \cdot 155,5 - R_x \cdot \cos(\beta) \cdot 480,5 - R_y \cdot \sin(\beta) \cdot 480,5 = 0$$

Como la tija inferior está unida con la tija superior mediante el eje de dirección, se ha asumido que R_{Sy} y R_{Iy} eran de igual valor.

Reacciones en la tija	Resultados (N)
R_{Sx}	-3926,14
R_{Sy}	-1204,67
R_{Ix}	4531,21
R_{Iy}	-1204,67

Tabla 7: Reacciones internas de las tijas en el caso de frenada máxima en pendiente. (fuente: propia)

3.4.3 ESTADO DE CARGA MÁS CRÍTICO

Dados ambos estados de carga propuestos, se debe seleccionar el caso más crítico para el estudio de tensiones sobre la tija de la motocicleta. En la Tabla 8 se recopilan los resultados de las reacciones aplicadas sobre las tijas de la horquilla de suspensión y se aprecia que las fuerzas son ligeramente superiores en el caso de una frenada brusca en una pendiente.

Reacciones	Resultados en el caso de frenada máxima (N)	Resultados en el caso de frenada máxima en pendiente (N)
R_{Sx}	-3831,53	-3926,14
R_{Sy}	-1179,15	-1204,67
R_{Ix}	4303,22	4531,21
R_{Iy}	-1179,15	-1204,67

Tabla 8: Comparación de las reacciones en los dos estados de carga. (fuente: propia)

Se ha realizado el estudio de fuerzas axiales y cortantes y momentos flectores internos de la horquilla de suspensión. En el punto donde se sitúa la tija inferior, las fuerzas internas tienen

distintos valores a ambos lados de la sección, por lo que hay que diferenciar entre el lado izquierdo y el lado derecho.

<i>Fuerzas internas en la tija inferior</i>	<i>Izquierda</i>	<i>Derecha</i>
N (N)	-1204,67	-2405,34
Q (N)	3926,14	-605,07
M _f (Nm)	-628,18	-628,18

Tabla 9: Tabla de fuerzas y momentos en la sección izquierda y derecha. (fuente: propia)

Para definir el estado de cargas más crítico, se ha realizado una simulación de la distribución de cargas de Von Mises en ambos casos y se ha seleccionado las fuerzas del lado cuya tensión máxima era mayor. Comparando la Ilustración 45 e Ilustración 46 se aprecia que el caso más crítico es el del lado izquierdo con una tensión máxima de 88,9 MPa.

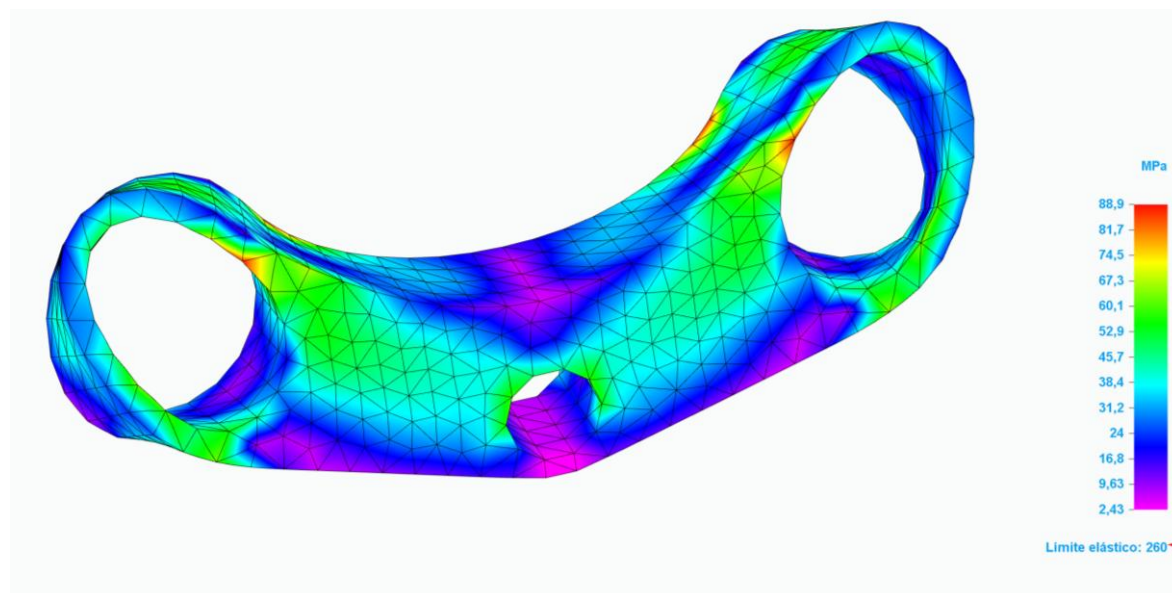


Ilustración 45: Simulación de fuerzas del caso izquierdo. (fuente: propia)

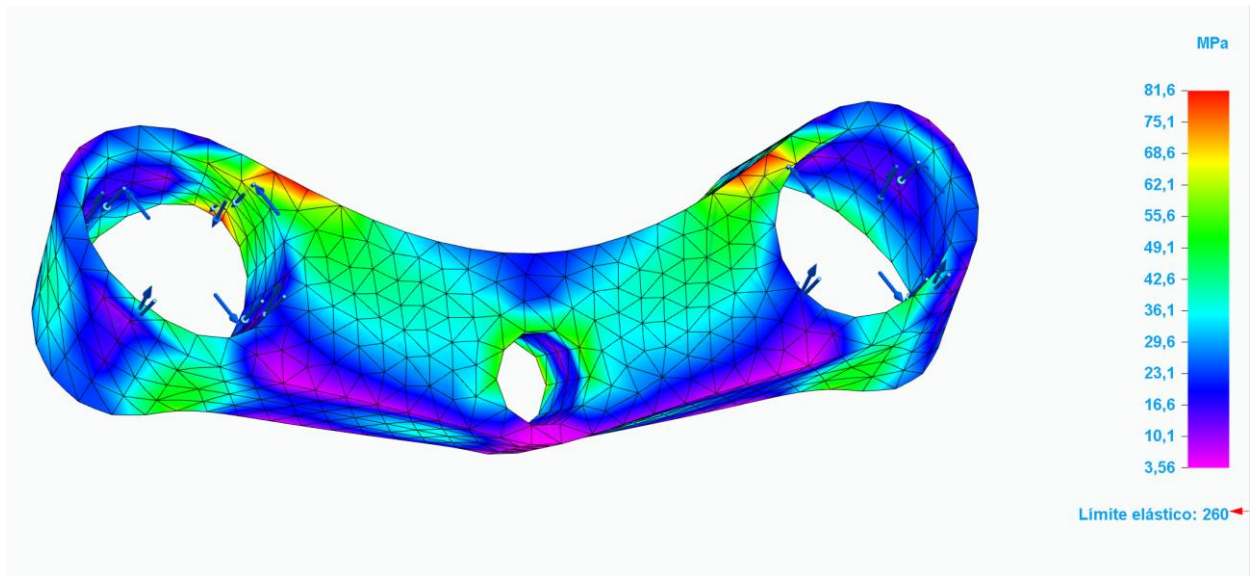


Ilustración 46: Simulación de fuerzas del caso derecho. (fuente: propia)

3.4.4 CARGAS APLICADAS POR LOS TORNILLOS

Las tijas poseen unas orejas con agujeros de 8 mm de diámetro para roscar tornillos, cuyo propósito es apretar el tubo de suspensión y evitar su desplazamiento durante el transcurso de las pruebas técnicas y durante la carrera.

El par de apriete suele variar según la aplicación del tornillo, el material, la lubricación, etc. Sin embargo, se recomienda apretar los tornillos de la tija inferior con un par entre 10 y 15 Nm (motoiservices, 2025). Apretar de más un tornillo puede causar varios problemas como: romper el tornillo, dañar las piezas y en este caso, puede deformar el tubo de la suspensión y perjudicar su funcionamiento.

La fórmula aplicada para el cálculo del par de apriete es la siguiente:

$$E. 18 \quad T = k \cdot F \cdot d$$

Donde “ T ” es el par de apriete, “ k ” es el coeficiente de fricción (entre 0,18 y 0,22), F la fuerza de apriete y “ d ” el diámetro del tornillo.

Se utilizó un coeficiente de fricción igual a 0,20 ya que es el valor estándar más utilizado cuando se trabaja con tornillos de acero sin lubricar y un par de apriete de 12,5 Nm. Reordenando y resolviendo la fórmula de par de apriete, se obtuvo que la fuerza de apriete necesaria era de 7812,5 N.

Los tornillos aplican una fuerza axial entre los agujeros alineados con la dirección de los ejes. Por ello, para simular esta fuerza de apriete, se incluyeron dos fuerzas iguales y opuestas en cada oreja de la tija como se puede observar en la Ilustración 47.

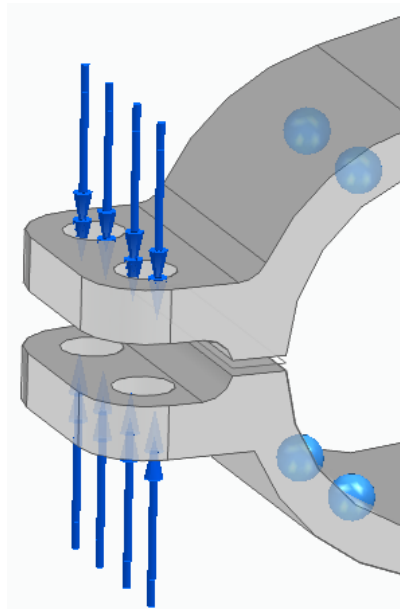


Ilustración 47: Fuerzas de apriete sobre las orejas de la tija inferior. (fuente: propia)

3.5 CONDICIONES DE CONTORNO

Las restricciones son necesarias para una correcta simulación, ya que afectan al comportamiento de la pieza al aplicar las cargas. Dependiendo del comportamiento de la pieza, se debe poner un tipo de restricciones u otro. Existen algunos trabajos de investigación sobre la optimización de las tijas de suspensión de motos deportivas en el que se simulan ambas tijas simultáneamente. Las tijas están unidas por el eje de dirección y los tubos de suspensión que fueron simulados como cilindros sólidos (*Empresa – BeOn Automotive,*

s. f.). Sin embargo, dado el alcance de este trabajo, se estudiaron únicamente las cargas sobre la tija inferior, por lo que se realizaron varias simplificaciones con el objetivo de reducir la complejidad del estudio y los tiempos de simulación.

El apoyo en el eje de dirección se modeló mediante una restricción anclada que permite la rotación alrededor del eje, pero restringiendo los desplazamientos traslacionales. Con esto, se busca simular una versión simplificada del movimiento de la tija en cualquier situación.

Para considerar el efecto de los tubos de suspensión en las simulaciones iniciales se incluyeron restricciones cilíndricas en los agujeros correspondientes que impiden el crecimiento y la compresión de los mismos.

El modelo CAD se obtuvo extruyendo un boceto del contorno de la tija, incluyendo las orejas de apriete y la separación entre ellas. Posteriormente, se realizaron los agujeros de los tornillos en las orejas de apriete y los redondeos de las esquinas mediante una operación de vaciado. Todas estas operaciones se realizaron respetando las medidas del plano inicial.

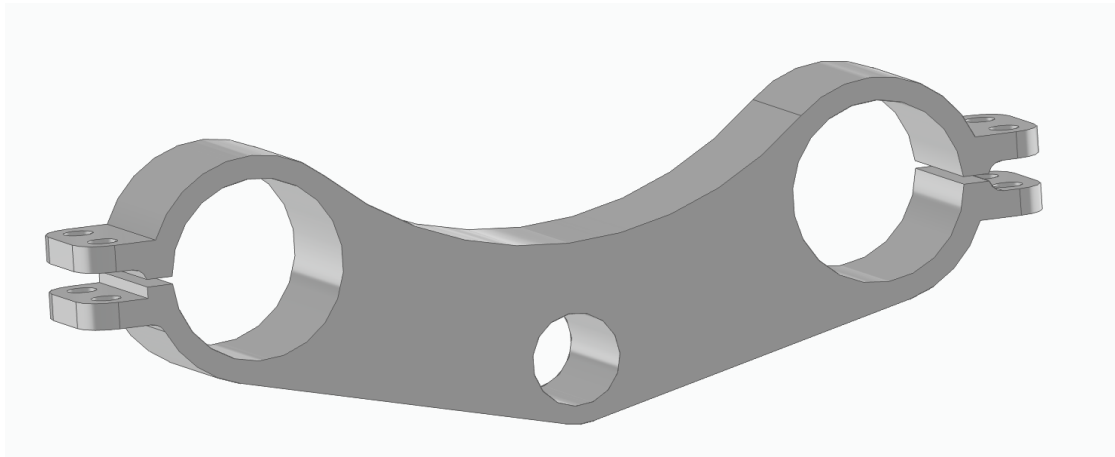


Ilustración 49: Modelo original de la tija. (fuente: propia)

4.1.2 VALIDACIÓN POR SIMULACIÓN FEM DEL PROTOTIPO 1

Se procede a la validación del modelo inicial mediante el método de elementos finitos (FEM). Este paso es esencial para determinar si el modelo original de la pieza cumple con la resistencia mecánica necesaria para aguantar los esfuerzos sin sobrepasar el límite elástico del material. Se simuló el caso de frenada máxima en pendiente para determinar el comportamiento de la tija inferior en una situación de carreras real.

Las simulaciones de los esfuerzos se realizaron en el apartado de simulaciones de Solid Edge 2025. En primer lugar, se definió la geometría de estudio y se seleccionó el material de la pieza, Aluminio 6082-T6. Como la biblioteca de materiales de Solid Edge es limitada, ese material no se encontraba en la lista de materiales disponibles, por lo que hubo que cargar los parámetros mostrados en la Ilustración 50 con los datos correspondientes a las propiedades del material seleccionado (recopilados en el Anexo VII: Aluminio 6082-T6).

Propiedades	
Nombre de propiedad	Valor
Densidad	2700,000 kg/m ³
Coeficiente de expansión térmica	0,0000 /C
Conductividad térmica	0,172 kW/m-C
Calor específico	900,000 J/kg-C
Módulo de elasticidad	70000,000 MPa
Coeficiente de Poisson	0,330
Límite elástico	260,000 MPa
Tensión de rotura	315,000 MPa
Elongación %	0,000

Ilustración 50: Datos del Aluminio 6082-T6. (fuente: propia)

A continuación, se aplicaron las cargas del caso de frenada máxima en pendiente y las restricciones definidas en el apartado de Condiciones de contorno como se muestra en la Ilustración 51.

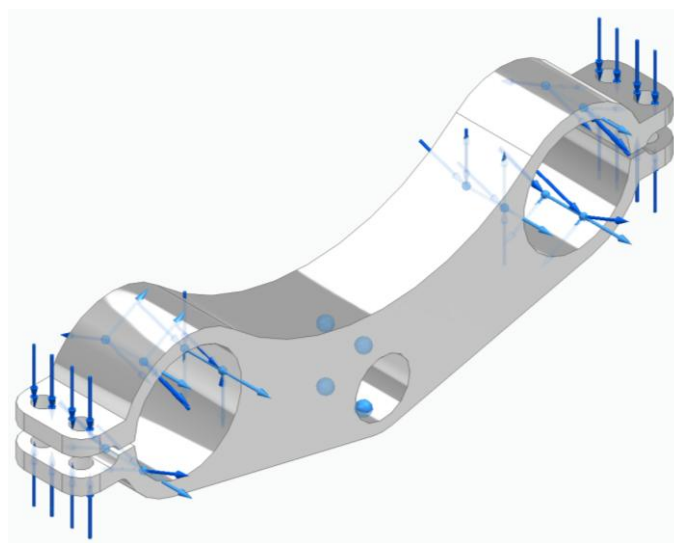


Ilustración 51: Fuerzas y restricciones aplicadas sobre la tija. (fuente: propia)

Finalmente se generó una malla de elementos finitos con un tamaño subjetivo de malla de 10 mm y se resolvió la simulación, obteniendo los resultados mostrados en las Ilustración 52 e Ilustración 53.

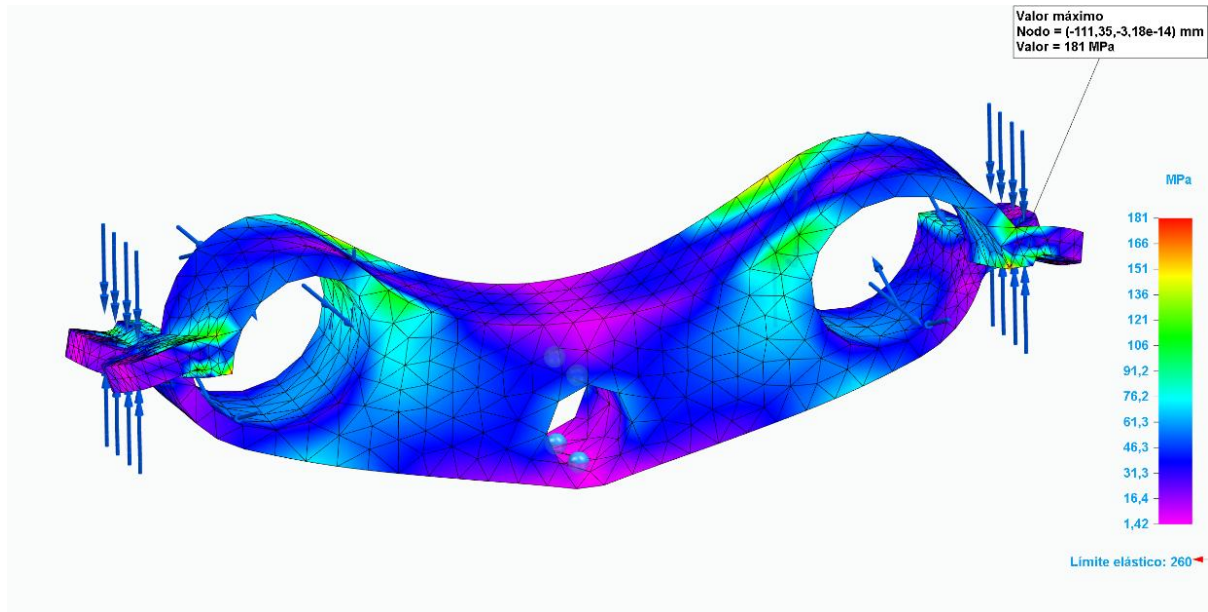


Ilustración 52: Resultados de la simulación de tensiones del prototipo 1. (fuente: propia)

La Ilustración 52 muestra la distribución de las tensiones de Von Mises sobre la pieza al aplicar el estado de cargas. La tensión máxima es de 101 MPa, inferior al límite elástico del material seleccionado (260 Mpa) por lo que la pieza es válida para el estudio de cargas y se no sufrirá deformaciones plásticas.

La tensión máxima se localiza en la oreja de apriete, concretamente en una esquina recta donde se concentra las tensiones. De todas formas, la tensión obtenida se mantiene por debajo de la tensión límite admisible y la pieza presenta un factor de seguridad (FS) de aproximadamente 2,57.

$$E. 19 \quad FS = \frac{\sigma_{\text{limite}}}{\sigma_{\text{max}}} = \frac{260}{101} = 2,57$$

La Universidad de Lisboa realizó un estudio similar del diseño y optimización de las tijas de una motocicleta. Este estudio tuvo como base de datos los proporcionados por BeOn automotive, una compañía española especializada en el diseño y fabricación de motocicletas de carrera de alto rendimiento (*Empresa – BeOn Automotive, s. f.*). Se estimó que el factor de seguridad utilizado por la empresa oscilaba entre 1,5 y 2 y se aproximó a un valor promedio de 1,82 (Alexandre Rodrigues da Silva Bicho Vicente, 2021). Sin embargo, este

estudio realizó el análisis sobre el conjunto de la suspensión delantera, incluyendo ambas tijas, la horquilla de suspensión y el eje de dirección, por lo que la distribución de cargas entre los distintos componentes es más realista.

En este trabajo, se estudia únicamente la tija inferior en un caso desfavorable. Dado el carácter conservador de esta simplificación, se considera adecuado utilizar un factor de seguridad inferior. El factor de seguridad empleado en este estudio se mantiene en el rango de 1,4 y 2; permitiendo un margen para aplicar la optimización topológica, pero manteniendo un margen de seguridad para no alcanzar la zona plástica del material.

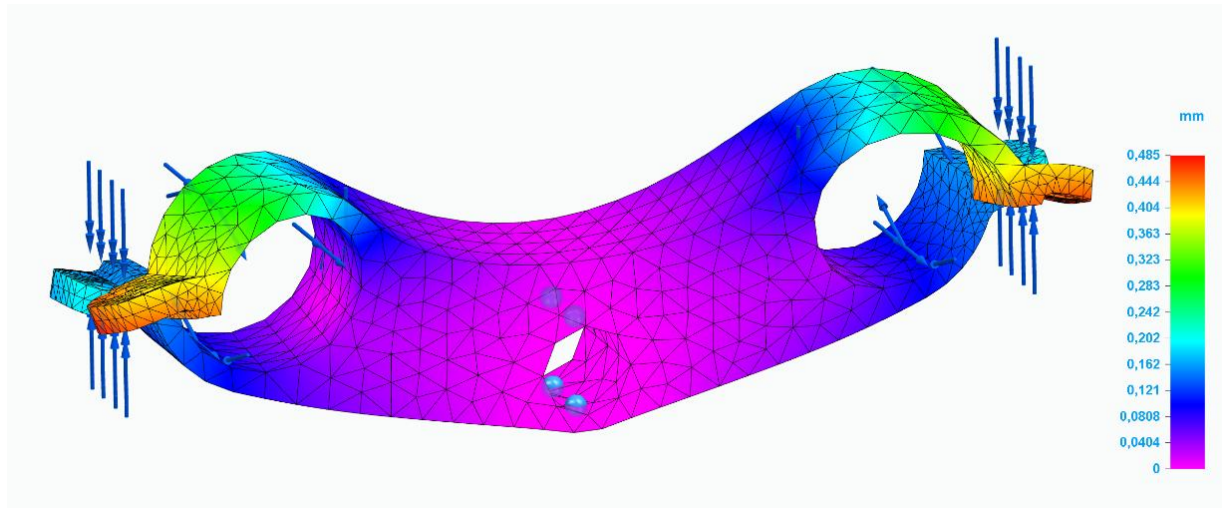


Ilustración 53: Resultados de la simulación de los desplazamientos máximos del prototipo 1. (fuente: propia)

La simulación representada en la Ilustración 53 muestra que los desplazamientos máximos, indicados en rojo, se sitúan en las orejas de apriete y el valor máximo es de 0,484 mm. En un estudio real, estos desplazamientos se verán limitados por la presencia de los tornillos y por el contacto entre ambas orejas.

4.2 PROTOTIPO 2: MODELO SIMPLIFICADO

4.2.1 OBTENCIÓN DEL MODELO CAD DEL PROTOTIPO 2

Dado la importancia de la geometría de las orejas de apriete para su correcto funcionamiento, estas se preservan en el estudio de la optimización topológica. Por este motivo y con el objetivo de simplificar la geometría y el proceso de simulación, se trabajó con un modelo simplificado de la tija en el que únicamente se consideró su geometría principal.

La Ilustración 54 muestra el modelo CAD del segundo prototipo de la tija en el que se elimina las orejas de apriete. Sobre este modelo se aplicaron las mismas condiciones de carga que en el caso anterior exceptuando las fuerzas debidas al apriete de los tornillos.

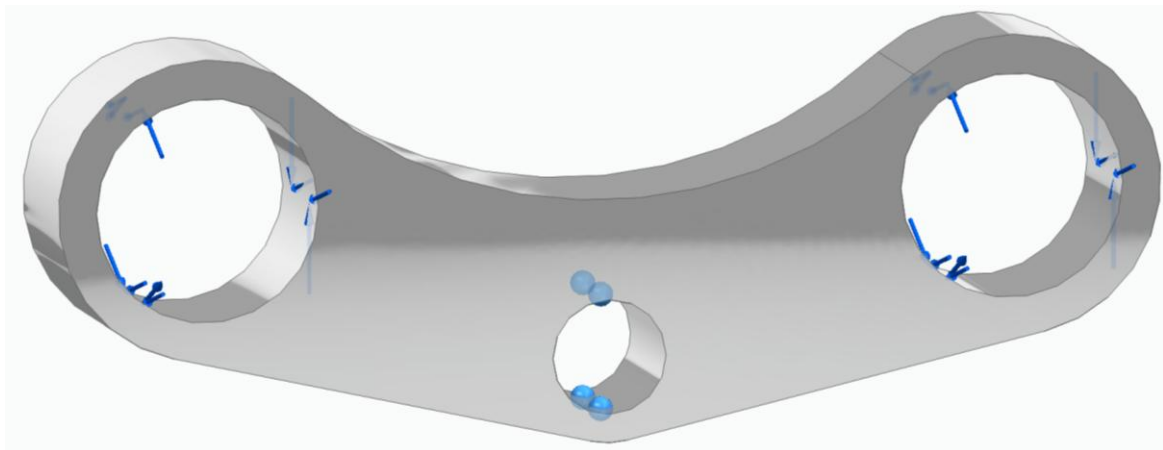


Ilustración 54: Cargas y restricciones del prototipo 2. (fuente: propia)

Otra simplificación que se ha tenido en cuenta es la eliminación de la condición de cilindricidad de los agujeros de los tubos telescópicos. En el prototipo anterior esta restricción era importante para limitar el desplazamiento máximo de las orejas de apriete, pero, al simplificar el modelo, se asume que las orejas están en contacto y la deformación de los cilindros es debida a la carga aplicada.

4.2.2 VALIDACIÓN POR SIMULACIONES FEM DEL PROTOTIPO 2

Dado que el modelo original cumplía con la rigidez estructural necesaria para soportar las fuerzas, el modelo simplificado también será capaz de mantener soportar las mismas fuerzas. De todas formas, se procedió con la simulación del estado de cargas para observar la tensión máxima del prototipo 2 y analizar la distribución de las tensiones de Von Mises.

La simulación del prototipo 2 siguió el mismo procedimiento que el establecido anteriormente y se aplicó el mismo tamaño de malla (10 mm).

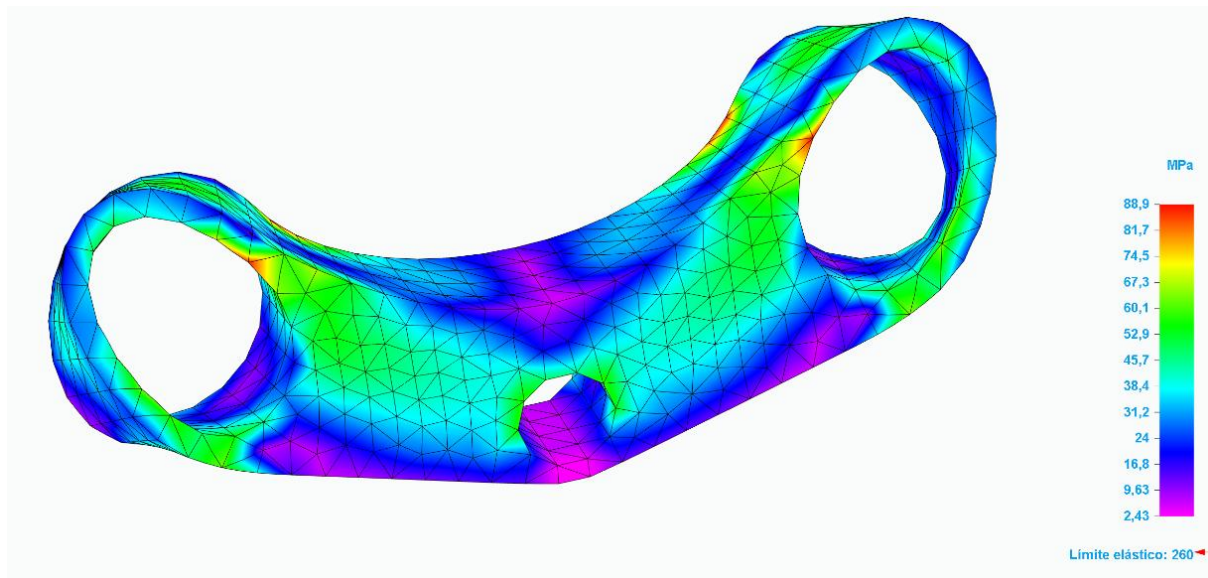


Ilustración 55: Simulación de tensiones del prototipo 2. (fuente: propia)

Como era de esperar, la tensión máxima de la tija es inferior a la tensión máxima del caso anterior gracias a que no existe la acumulación de tensiones en las orejas de apriete. Este nuevo prototipo proporciona un factor de seguridad de 2,92, muy superior al mínimo establecido anteriormente.

Analizando la distribución de tensiones, se observa que las caras superiores e inferiores de la pieza están coloreadas de color violeta y azul oscuro. Esto indica que la tensión que soportan estas regiones es menor que la que soporta la estructura central de la tija coloreada en verde. En este caso, las tensiones máximas se encuentran en el borde de las caras interiores

de los agujeros del tubo telescópico, pero no suponen un problema real ya que la tensión máxima está muy por debajo de la tensión máxima admisible, 260 MPa o 173 MPa al aplicar un factor de seguridad de 1,5.

4.3 PROTOTIPO 3: OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA

Tras comprobar que no se supera el límite elástico del aluminio 6082-T6, se procede a optimizar topológicamente la tija inferior de la moto. El primer paso previo a la optimización consiste en establecer los criterios de diseño necesarios para asegurar el correcto funcionamiento de la tija. Estos criterios se basan en establecer las cargas aplicadas sobre el prototipo e identificar las regiones funcionales de la misma.

Al igual que en el caso anterior, se aplicaron las fuerzas calculadas para la frenada máxima en pendiente sobre los agujeros de los tubos telescópicos y la restricción de unión articulada sobre el eje de dirección. Estas regiones, donde se aplican las cargas y las restricciones, se consideran regiones funcionales de la tija y deben mantenerse intactas durante el proceso iterativo de optimización. Como se muestra en la Ilustración 56, las regiones preservadas se indican mediante un sombreado morado. Se utiliza un sombreado morado oscuro para las regiones preservadas, dada la presencia de cargas aplicadas, y morado claro para las regiones donde se aplica una restricción.

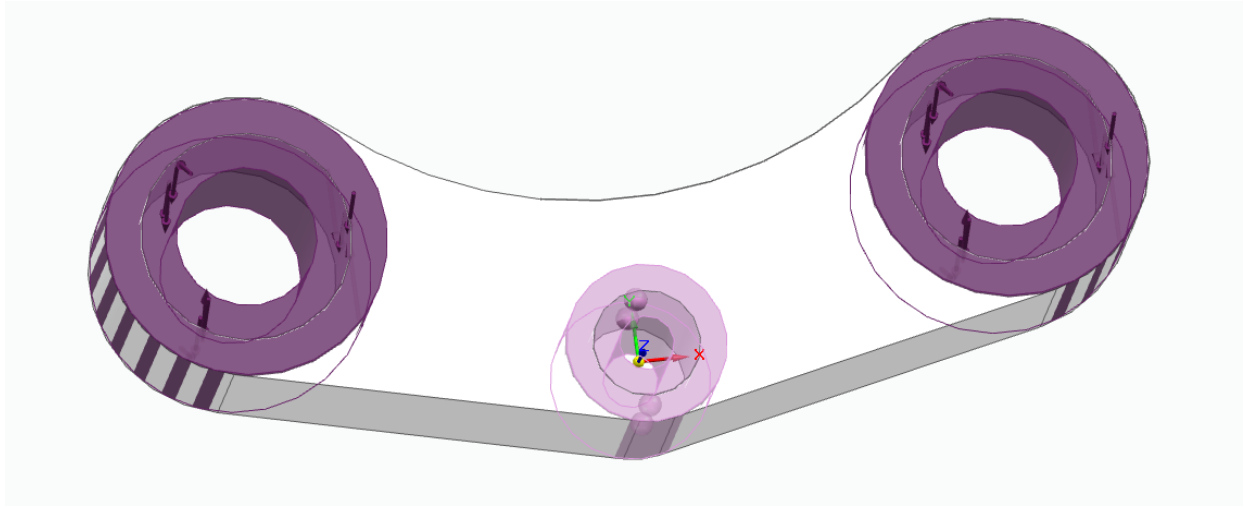


Ilustración 56: Cargas, restricciones y regiones preservadas del prototipo 3. (fuente: propia)

Una vez establecidas las condiciones de contorno, se continuó con el proceso iterativo de optimización con el objetivo de minimizar el peso total de la pieza mientras se respeta el factor de seguridad establecido anteriormente. Este proceso se lleva a cabo modificando los parámetros de “reducción de masa” y “calidad del estudio”. Este último parámetro modifica el tamaño de vóxel que es una medida de la longitud lateral de un cubo unitario en un modelo 3D. Este valor debe ajustarse para controlar la calidad de salida deseada. Al incrementar este valor, la calidad del estudio es mayor pero el peso computacional y el tiempo necesario para obtener la optimización de la pieza aumentan considerablemente.

Iteración 1:

Esta primera iteración se realizó sin ninguna restricción adicional, con un porcentaje de reducción de masa del 15 %, y se aplicó una calidad de estudio de 150, lo que proporciona un tamaño de vóxel de 0,85 mm para la pieza estudiada. Al ser tan preciso, el tiempo transcurrido durante la generación del modelo optimizado superó los 8 minutos. La Ilustración 57, muestra el resultado de la primera optimización del prototipo 3.



Ilustración 57: Resultado de la primera optimización topológica del prototipo 3. (fuente: propia)

Se observa que la optimización topológica no ha modificado las regiones marcadas anteriormente en morado. Sin embargo, esta primera iteración presentaba algunos defectos

estéticos, entre ellos la falta de simetría entre la parte izquierda y derecha. Se intentó resolver este problema introduciendo una condición de simetría en el plano perpendicular al eje x.

Otro aspecto destacable de la optimización es la eliminación de material de la cara superior (marcada como cara trasera en el espacio de trabajo de Solid Edge). Este resultado era previsible ya que el análisis de tensiones del prototipo anterior mostró que los niveles de tensiones aplicadas sobre la cara superior eran significativamente inferiores al resto de la pieza. Como consecuencia, el algoritmo de optimización decidió eliminar este material ya que no perjudica la estabilidad estructural de la pieza.

Dado el resultado de la primera iteración de la optimización topológica, se procede a la validación mediante simulaciones por el método de elementos finitos, aplicando las cargas del caso de frenada máxima en pendiente. Sin embargo, la optimización obtenida contiene bordes muy pequeños o puntas que impiden la correcta simulación de la pieza y provocaba un error en el cálculo. Para solucionar este problema, se intentó reducir el tamaño de malla de 10 mm a 3 mm pero no fue posible resolver el error.

Iteración 2:

Para la siguiente iteración, se realizaron varias modificaciones respecto de la primera con el objetivo de resolver los problemas destacados. Se incluyó un plano de simetría perpendicular al eje x para obtener una pieza simétrica y se mantuvo el porcentaje de reducción de masa en 15%. Otra modificación realizada fue la de reducir la calidad de estudio a la mitad (75) para disminuir el tiempo de simulación por debajo de los 8 minutos.

En la Ilustración 58, se observa la optimización obtenida con los ajustes mencionados anteriormente.



Ilustración 58: Segunda iteración de la optimización topológica del prototipo 3. (fuente: propia)

Se continuó con la verificación mediante simulaciones FEM de la pieza optimizada. En esta simulación se utilizó un tamaño subjetivo de malla de 10,0 mm para evitar las imperfecciones de las superficies.

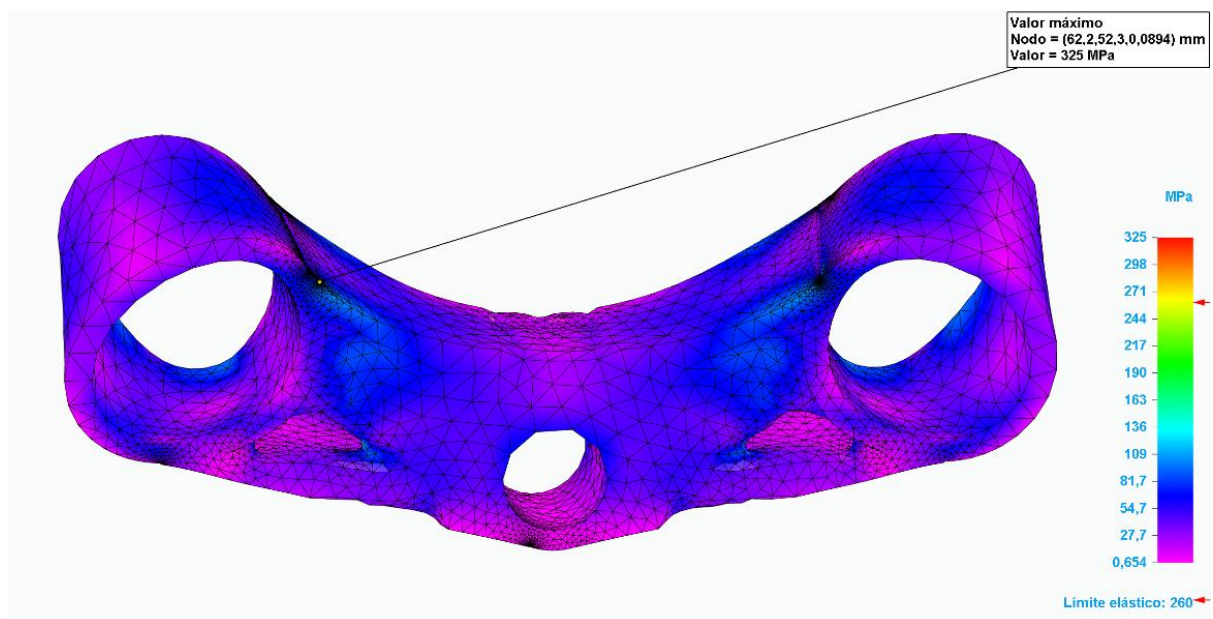


Ilustración 59: Simulaciones FEM de la segunda iteración del prototipo 3. (fuente: propia)

Como se puede observar en la Ilustración 59, la mayor parte de la superficie de la tija está coloreada de azul o morado, lo que significa que los esfuerzos que sufre la pieza son relativamente bajos comparados con la tensión máxima. Sin embargo, existen algunas regiones de color verde o rojo donde se acumulan las tensiones residuales. Estas regiones

tienen ángulos rectos o aristas vivas que causan estos problemas. Como se puede observar en la Ilustración 60, marcados en rojo aparecen defectos en la superficie que no aparecían en el modelo original.

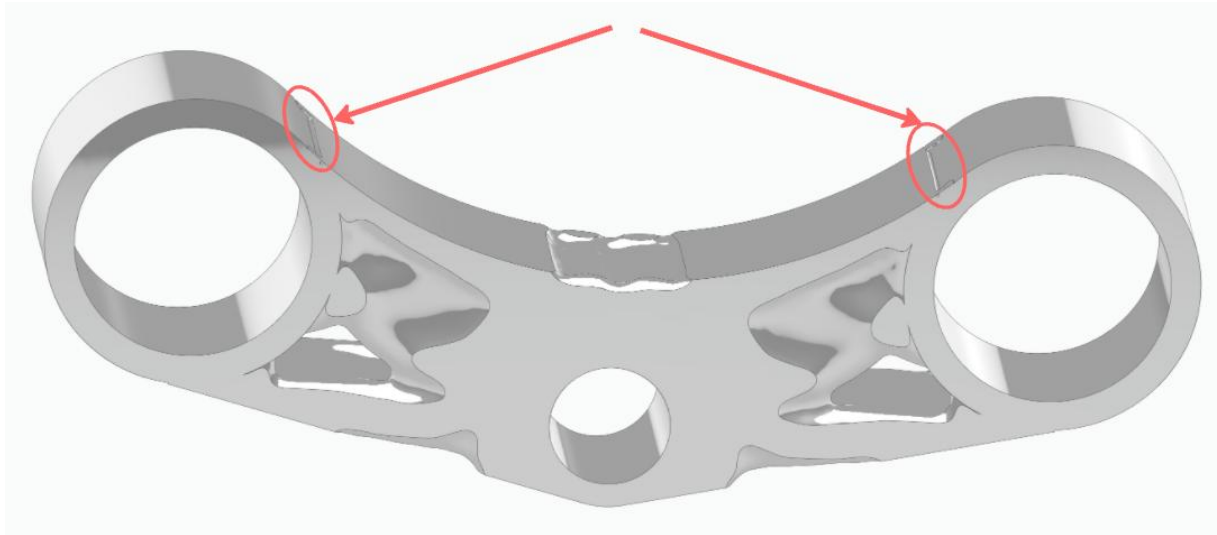


Ilustración 60: Defectos sobre la superficie de la pieza. (fuente: propia)

Para solucionar estos inconvenientes, se decidió preservar la superficie superior ya que no se desea eliminar este material durante el proceso de optimización. Por ello, en la siguiente iteración se empleó la opción de “preservar región” sobre la superficie correspondiente.

Cabe destacar que la región preservada es ligeramente mayor que la superficie que realmente se pretende conservar. Se tomó esta decisión debido a que los algoritmos matemáticos de la optimización topológica se basan en procesos numéricos sobre la geometría lo que puede causar pequeñas diferencias en la definición de las superficies a preservar y puede resultar en la eliminación de material en zonas que deberían permanecer intactas. Ampliar la zona preservada permite prevenir este tipo de errores y garantiza una mejor optimización topológica.

Iteración 3:

En esta tercera iteración se optimizó con los mismos parámetros y dimensiones que en el caso anterior:

- Masa reducida: 15%
- Calidad del estudio: 75

La única diferencia con la iteración anterior es la incorporación de la región preservada mencionada anteriormente, marcada en rojo, visible en la Ilustración 61.

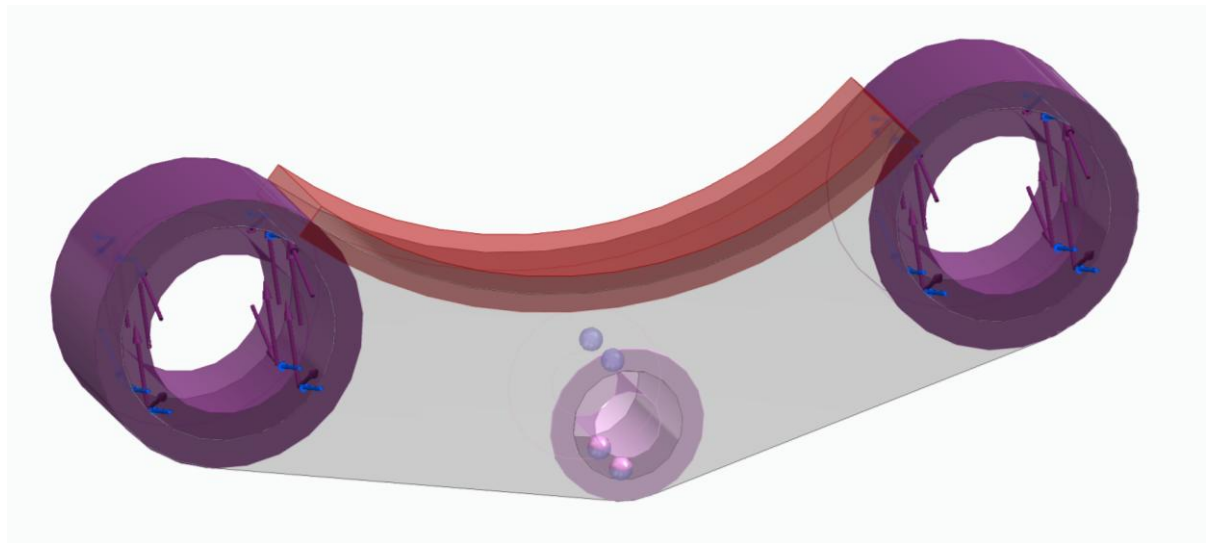


Ilustración 61: Modelo CAD de la optimización topológica del prototipo 3. (fuente: propia)

Aplicando el mismo procedimiento que en el caso anterior, se llevó a cabo las simulaciones FEM con el estado de cargas aplicado.

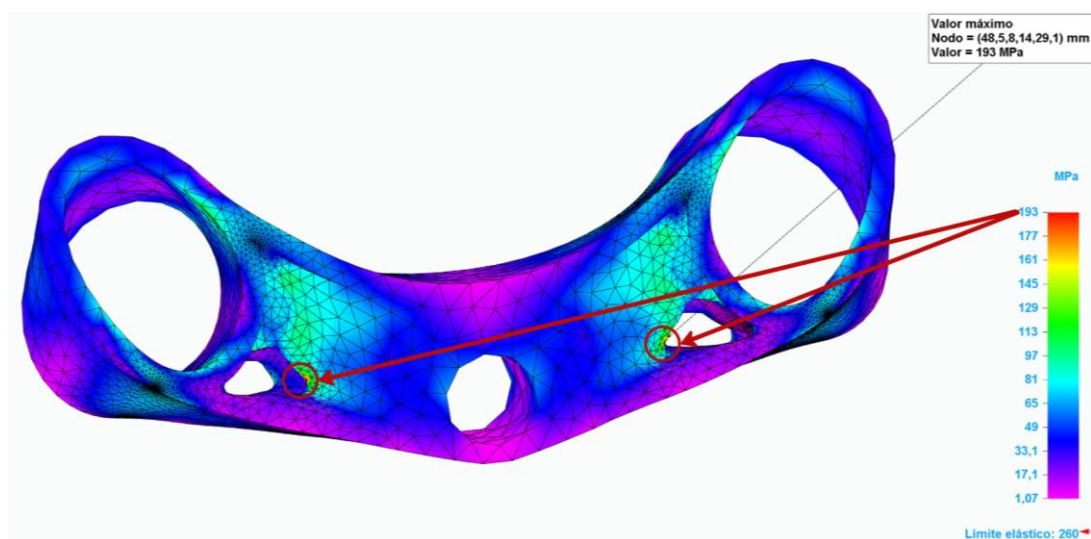


Ilustración 62: Simulación de tensiones de la tercera iteración del prototipo 3. (fuente: propia)

En la simulación de las tensiones de la tercera iteración, Ilustración 62, se puede observar que predominan las regiones con tensiones más bajas. Entre los 81 y los 17 MPa. También hay algunas zonas de color verde donde la tensión soportada no supera los 145 MPa. Sin embargo, la tensión máxima que sufre la pieza se da en unas esquinas interiores muy cerradas marcadas en rojo. Como se mencionó anteriormente, las tensiones residuales se acumulan en estas aristas vivas. La tensión máxima que soporta la pieza es de 193 MPa, lo que proporciona un factor de seguridad de 1,35.

Una forma para comprobar si estas zonas se tratan de una concentración de tensiones real o únicamente una singularidad numérica, se puede refinar la malla. Si la tensión máxima se mantiene aproximadamente igual, la concentración de tensiones es real y la reducción de masa no es válida para el estudio. Sin embargo, si la tensión máxima aumenta considerablemente, se puede confirmar que se trata de una singularidad y se puede solucionar el problema suavizando la geometría.

Se repitió la simulación reduciendo el tamaño de malla subjetiva de 10,00 mm a tan solo 3 mm. La Ilustración 63 muestra el resultado de dicha simulación.

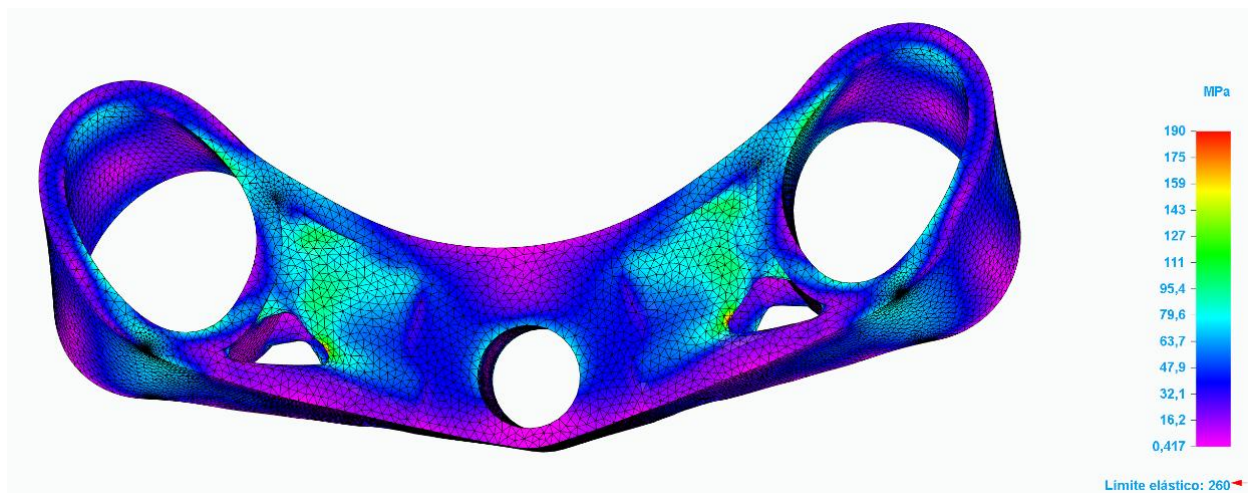


Ilustración 63: Simulación de la tercera iteración con un tamaño de malla menor. (fuente: propia)

Como se observa en la nueva simulación, la tensión máxima es muy similar a la tensión máxima en el caso anterior, por lo que se concluye que no se trata de una singularidad numérica, sino que se trata de una acumulación de tensiones reales.

Iteración 4:

Como la última iteración presentaba tensiones mayores a las permitidas, se realizó otro proceso de optimización, pero esta vez con una reducción de masa del 10%. Las regiones preservadas se mantuvieron iguales y la calidad del estudio se mantuvo en 75 y se obtuvieron los resultados mostrados en la Ilustración 64.



Ilustración 64: Resultado de la cuarta iteración de la optimización topológica. (fuente: propia)

La Ilustración 64 muestra cómo la optimización topológica elimina masa de la parte exterior de la pieza. Sin embargo, en la Ilustración 65, se puede observar cómo también se elimina material del interior de la tija.

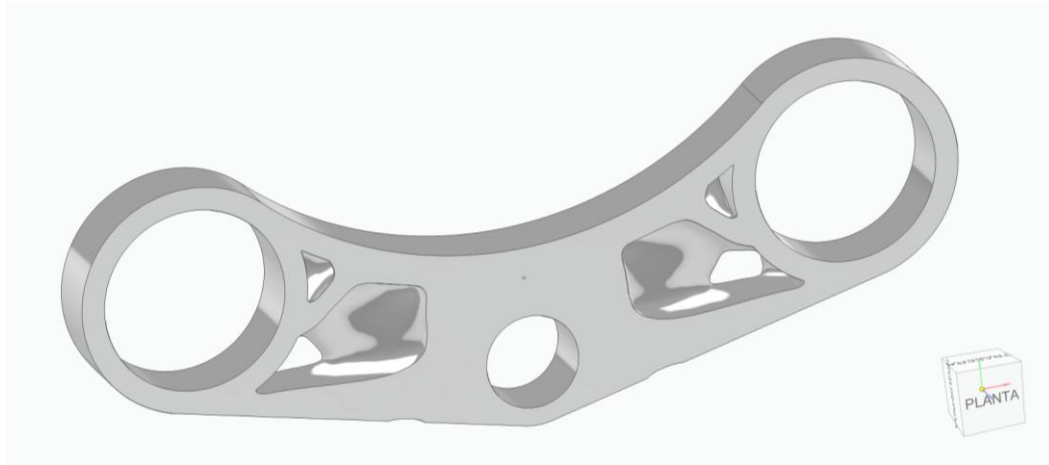


Ilustración 65: Vista cortada del interior de la tija. (fuente: propia)

A continuación, se procedió con la verificación por simulaciones FEM de la pieza optimizada.

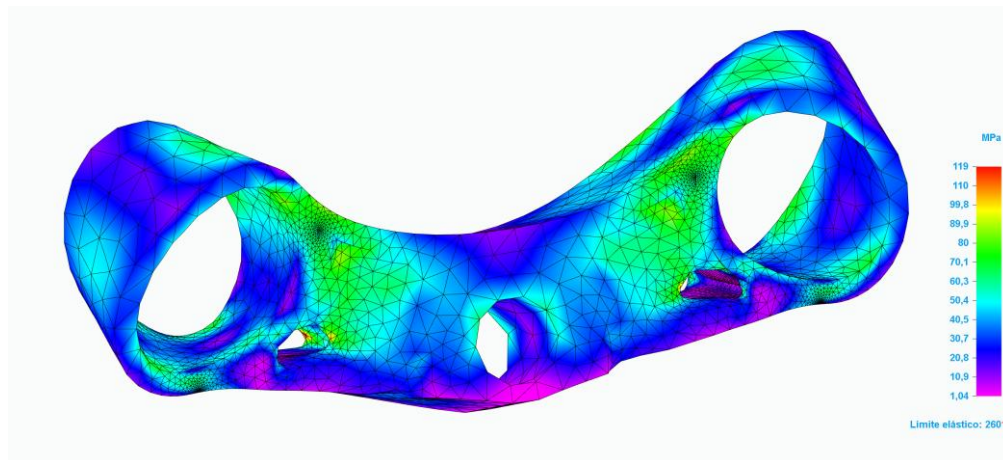


Ilustración 66: Simulación de tensiones de la cuarta iteración del prototipo 3. (fuente: propia)

La tensión máxima medida en la pieza fue de 119 MPa, muy inferior a la tensión límite del material utilizado. Esta optimización de la pieza proporciona un factor de seguridad de 2,18, lo cual se considera válido para proceder al siguiente paso.

4.4 PROTOTIPO 4: OPTIMIZACIÓN CON REGIONES PRESERVADAS

Las tijas también se pueden utilizar como puntos de apoyo para elementos externos. Por ejemplo, se pueden utilizar para mantener anclada la línea de freno de la rueda delantera o como punto de unión con el chasis (Gancedo, 2024). Por esta razón, en este prototipo de la tijá, se ha decidido preservar las superficies superior e inferior marcadas en rojo sobre la Ilustración 67.

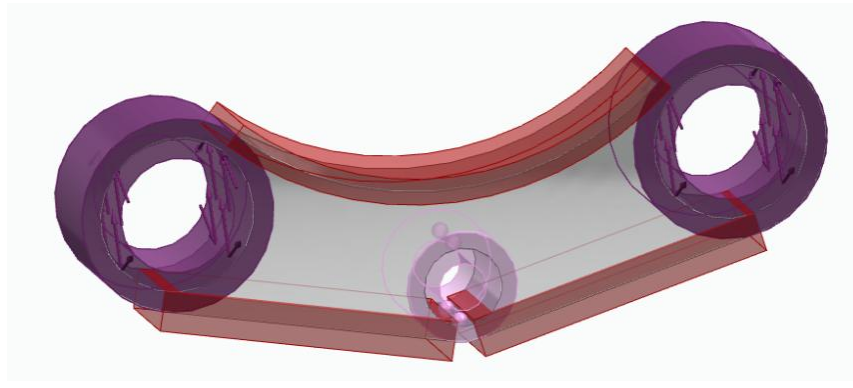


Ilustración 67: Cargas, restricciones y regiones preservadas del prototipo 4. (fuente: propia)

Con la nueva configuración de las regiones preservadas, se llevó a cabo la optimización topológica con un porcentaje de reducción de masa del 10% y una calidad del estudio de 75. Con estos parámetros se obtuvo el resultado mostrado en la Ilustración 68.

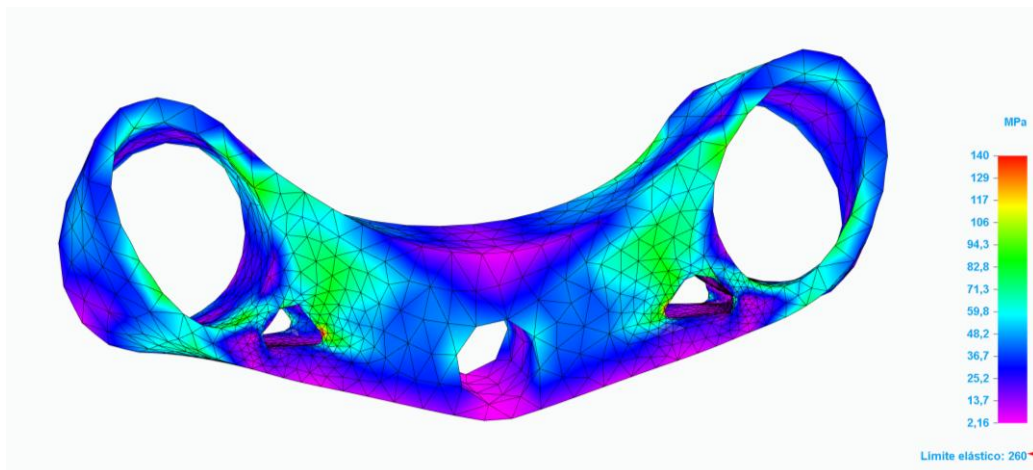


Ilustración 68: Resultado de la optimización del prototipo 4. (fuente propia)

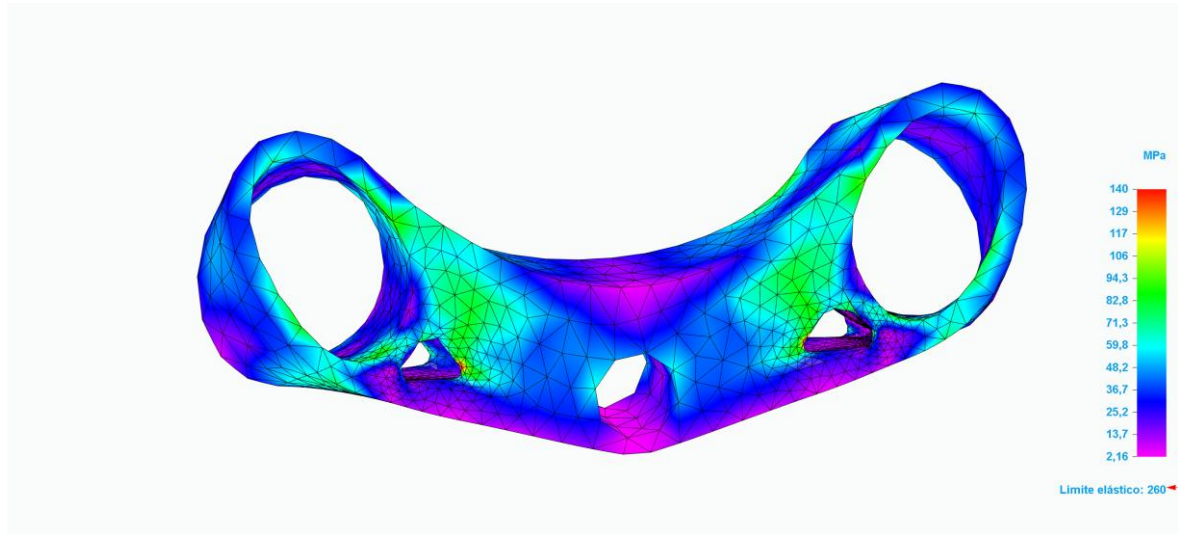


Ilustración 69: Simulación de tensiones del prototipo 4. (fuente: propia)

Al verificar la distribución de tensiones de la pieza tras aplicar el estado de cargas, se observa que la tensión máxima se sitúa sobre una arista viva de la geometría optimizada. Sin embargo, el valor máximo medido en la simulación es de 140 MPa, por lo que es inferior al límite elástico del material y proporciona un FS de 1,857.

4.5 PROTOTIPO 5: OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA CON REGIONES PRESERVADAS MÁS DELGADAS

En este nuevo prototipo, se ha tomado la decisión de reducir la sección del área preservada a una pequeña parte de las superficies de interés con el objetivo de permitir al algoritmo optimizar y eliminar material de dicha superficie. En la Ilustración 70 se observa que la nueva región preservada cubre una franja central de 15 mm de espesor.

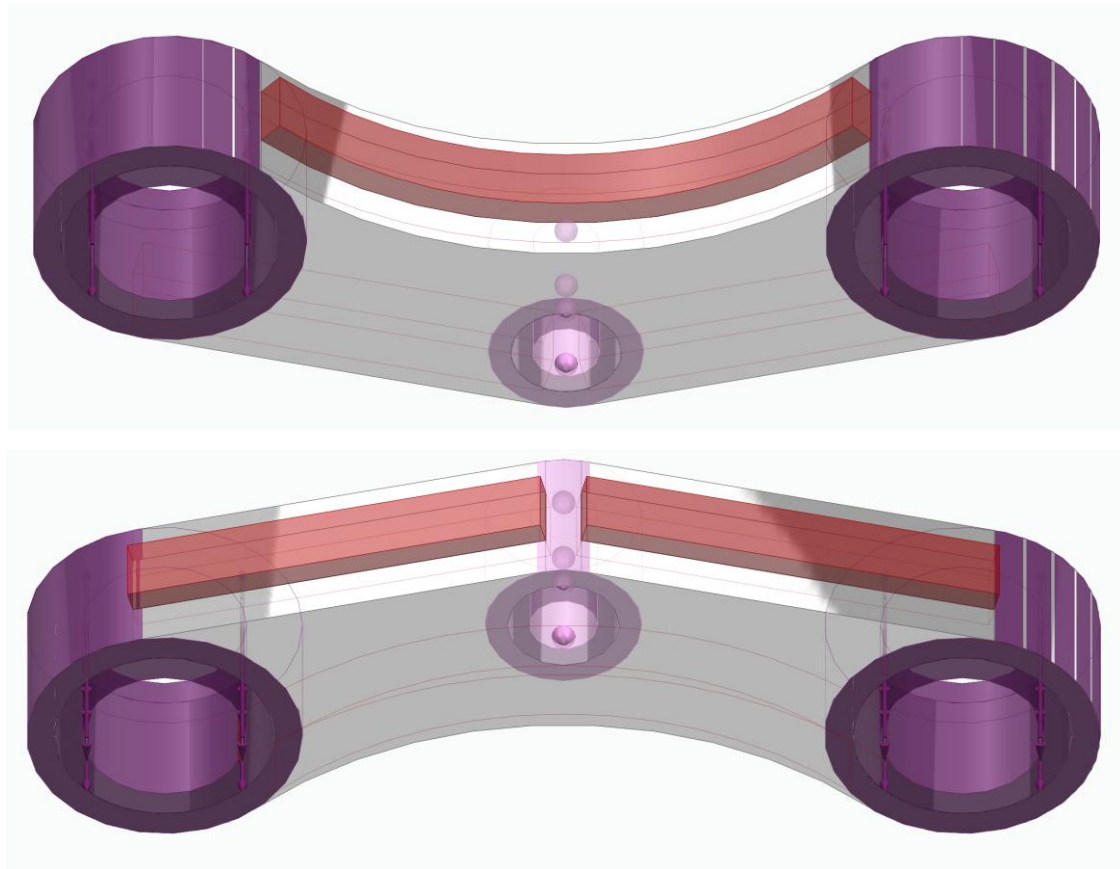


Ilustración 70: Cargas, restricciones y regiones preservadas del prototipo 5. (fuente propia)

Dados los resultados satisfactorios del prototipo anterior, se ha realizado una nueva optimización topológica aplicando los siguientes parámetros:

- Reducción de masa: 18%
- Calidad de estudio: 75

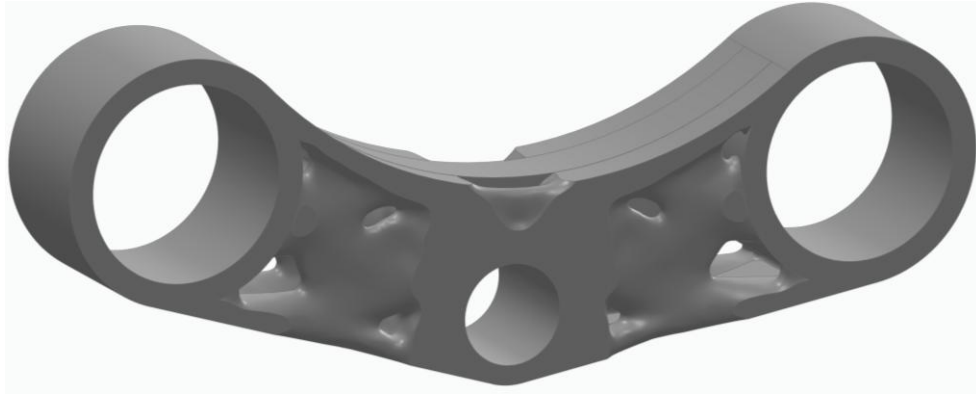


Ilustración 71: Resultado de la optimización del prototipo 5 al 18%. (fuente: propia)

A continuación, se procedió a verificar la estabilidad estructural del modelo resultante aplicando las cargas y restricciones y estableciendo una malla de 10 mm. La Ilustración 72 muestra que el valor de la tensión máxima es de 233 MPa, lo cual es inferior al límite elástico del material, pero el factor de seguridad es de 1,12 y no entra dentro del rango establecido anteriormente.

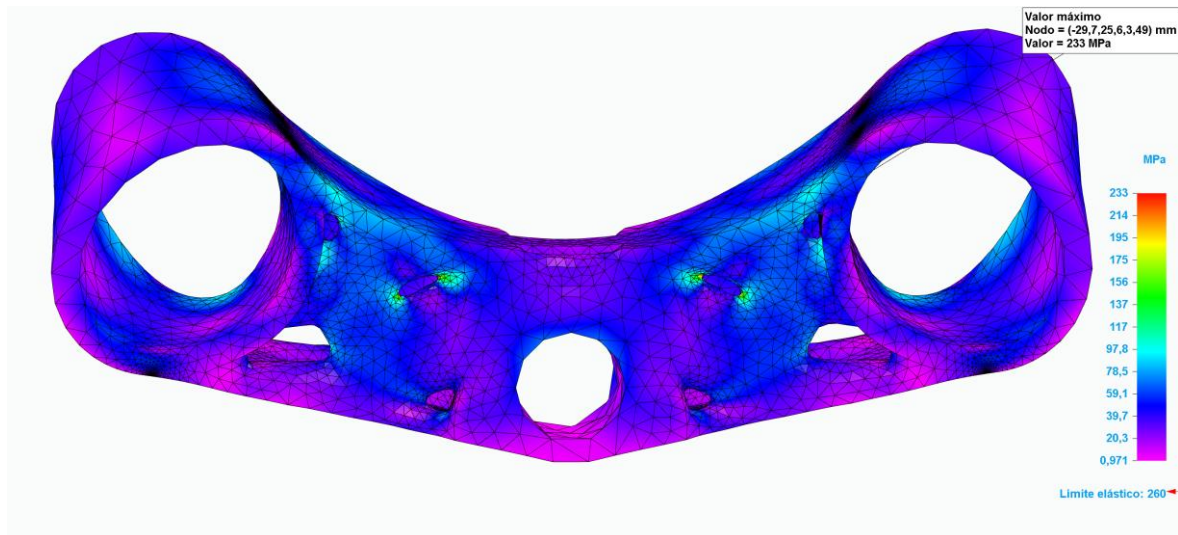


Ilustración 72: Simulación del prototipo 5 reducido al 18%. (fuente: propia)

Como la optimización topológica del caso anterior no resultó satisfactoria, se ha repetido el mismo estudio disminuyendo el porcentaje de masa reducida de 18% a 10% y manteniendo la misma calidad de estudio. Tras aplicar esta modificación, se obtuvo el resultado mostrado en la Ilustración 73.

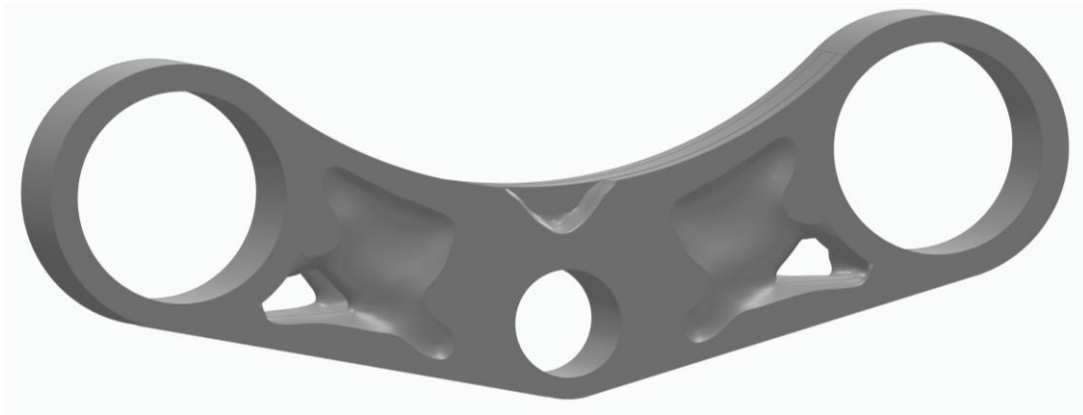


Ilustración 73: Resultado de la optimización del prototipo 5 al 10%. (fuente: propia)

Para la simulación de los esfuerzos de la pieza, se llevó el mismo procedimiento que en el caso anterior.

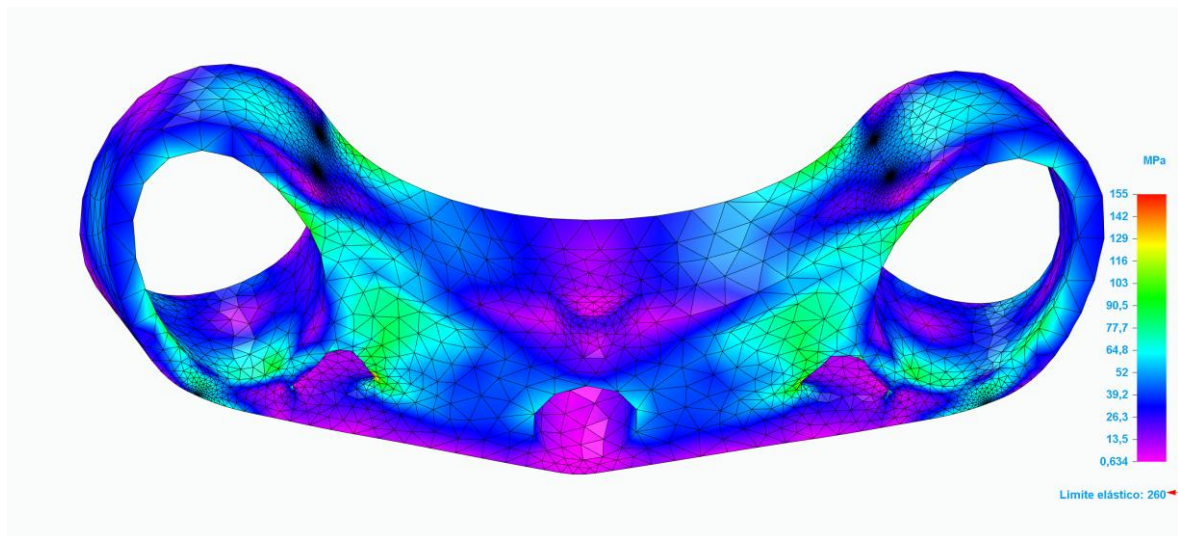


Ilustración 74: Simulación del prototipo 5 reducido al 10%. (fuente: propia)

Se observa que la tensión máxima en este caso es de 155MPa por lo que la pieza tiene un factor de seguridad de 1,67 y entra dentro del rango establecido anteriormente por lo que la optimización es válida.

4.6 NUEVO ESTADO DE CARGAS

Al comparar el estado de cargas empleado con el utilizado en otros trabajos de la misma naturaleza, se observa que las cargas aplicadas en este estudio presentan un carácter más conservador y da lugar a esfuerzos superiores. Por este motivo, se planteó una segunda optimización topológica utilizando un estado de cargas menos restrictivo.

En este nuevo estado de cargas, se simplificó la distribución de esfuerzos, considerando únicamente dos fuerzas aplicadas directamente sobre la tija inferior: la acción normal de la rueda delantera y a la fuerza de rozamiento debida a la frenada brusca. Los valores de ambas fuerzas se obtuvieron a partir del estudio de cargas iniciales para el caso de frenada máxima y el caso de frenada máxima en pendiente.

	<i>Frenada máxima</i>	<i>Frenada máxima en pendiente</i>
V_D	2060,10 N	2152,62 N
F_{rD}	1405,86 N	1627,86 N

Tabla 10: Comparación de la fuerza normal y la fuerza de rozamiento. (fuente: propia)

Comparando las fuerzas, se puede observar que el caso de frenada máxima en pendiente sigue siendo el caso más crítico.

4.7 OPTIMIZACIÓN CON EL NUEVO ESTADO DE CARGAS

El modelo CAD inicial para esta nueva optimización es el mismo que el que se ha utilizado en el prototipo 5. Se han aplicado las mismas regiones preservadas en las superficies superior e inferior de la tija y se ha aplicado un plano de simetría perpendicular al eje x.

Iteración 1:

La primera iteración se realizó con una calidad de estudio de 75 y una reducción de masa del 50%.



Ilustración 75: Resultado de la optimización reducida al 50%. (fuente: propia)

El peso inicial de la pieza era de 704 g y el peso tras la optimización fue de 369 g. A pesar de haber especificado una reducción de peso del 50%, el porcentaje de masa reducida real fue de 47%.

Se procede a la verificación para analizar si la reducción de masa es adecuada o si hay que modificar algún parámetro.

Al tratarse de una geometría más lisa y suave sin tantas aristas vivas ni picos que puedan causar problemas a la hora de simular, se utilizó una malla de tamaño 5 mm y se obtuvieron los resultados mostrados en la Ilustración 76.

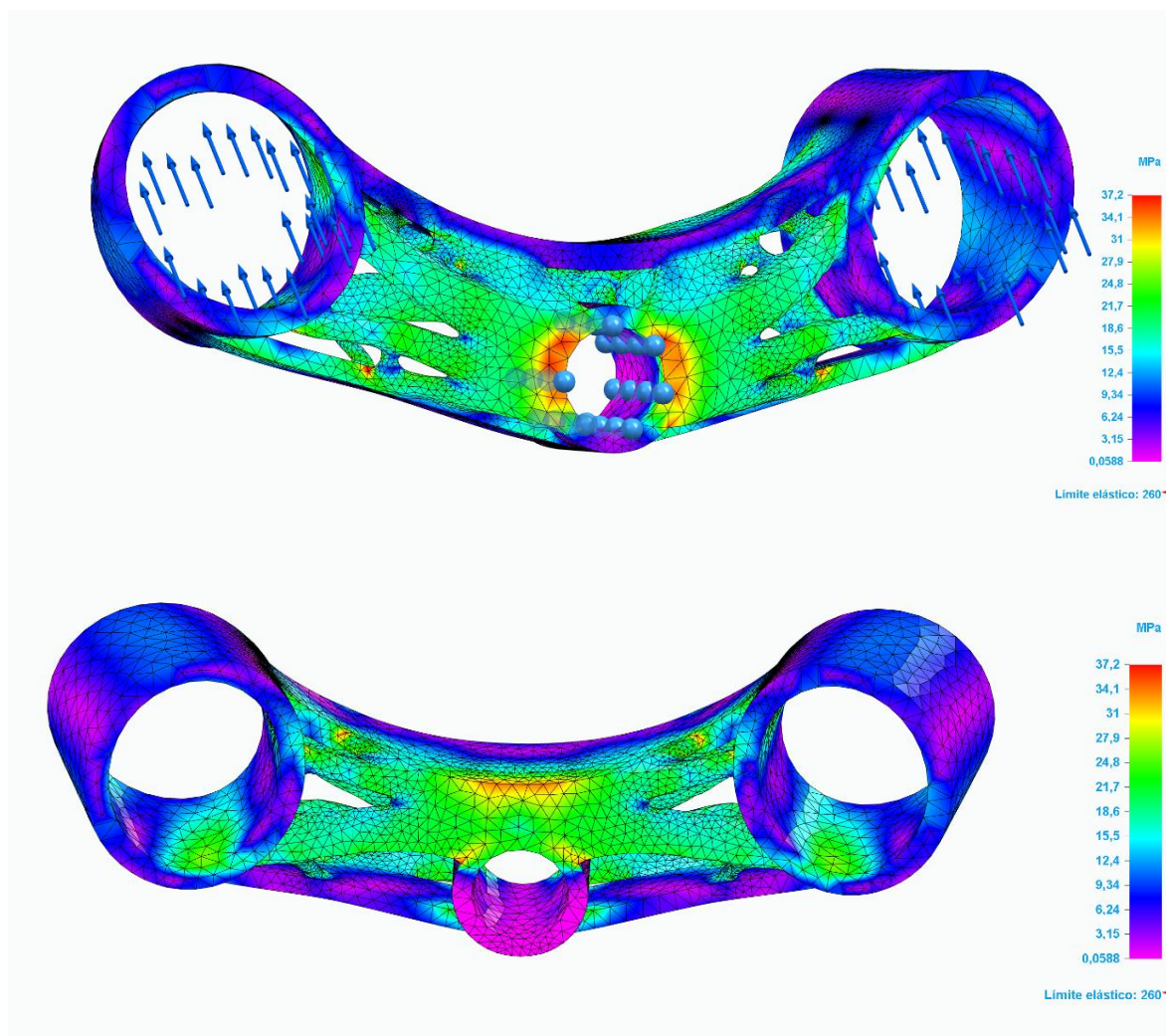


Ilustración 76: Resultados de la OT reducida al 50%. (fuente: propia)

La Ilustración 76 muestra la distribución de las tensiones de Von Mises obtenidas al aplicar el nuevo estado de cargas. La tensión máxima se sitúa en el cambio de sección entre la zona preservada de las caras planas de la tija y un puente que se une con los cilindros por donde pasan los tubos telescópicos de suspensión. La tensión máxima registrada sobre la pieza es de 37,2 MPa, muy inferior al límite elástico del material. Esta configuración ofrece un factor de seguridad de 7 lo cual está muy por encima del rango establecido anteriormente.

Iteración 2:

Dado el amplio margen de seguridad obtenido en el apartado anterior, se decidió incrementar el parámetro de reducción de masa hasta el 60%.

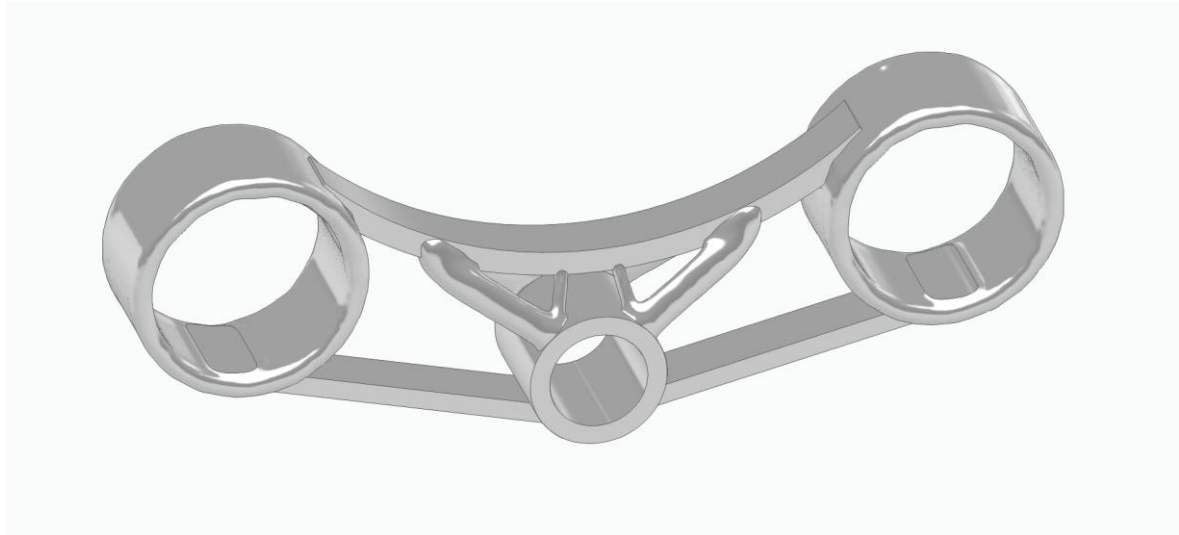


Ilustración 77: Resultado de la OT reducida al 60%. (fuente: propia)

Al igual que en el caso anterior, a pesar de especificar una reducción de masa del 60%, la reducción final fue de 62% y la pieza final tenía un peso de 263 g. Sin embargo, esta optimización presenta varios defectos, ya que no se han preservado las regiones indicadas, por lo que esta pieza no es apta.

Iteración 3:

Dado el resultado anterior, se realizó el mismo estudio ajustando el porcentaje de reducción de masa a 57%.

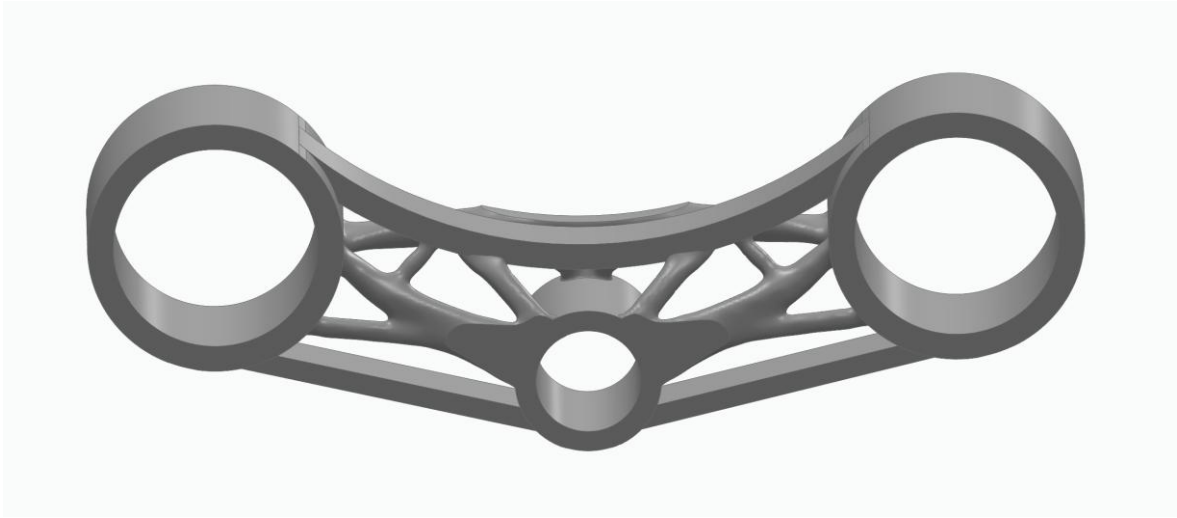


Ilustración 78: Resultados de la OT reducida al 57%. (fuente: propia)

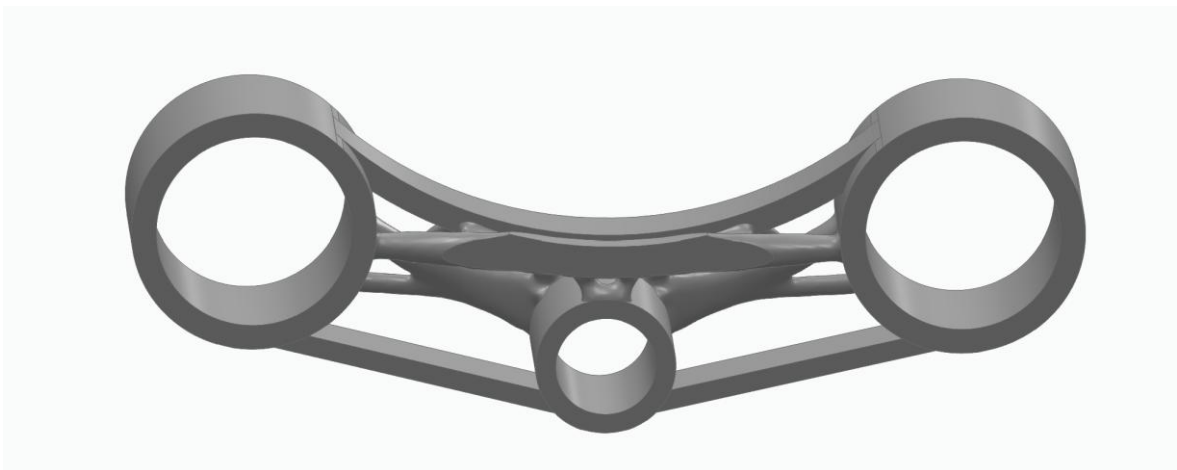


Ilustración 79: Resultado de la OT reducida al 57% vista desde atrás. (fuente: propia)

Al igual que en las iteraciones anteriores, la reducción de masa se fijó en 57%, pero el peso final de la pieza optimizada fue de 325 g. Esto supone una reducción final de 379 g o 54%. Dado que se han respetado las regiones preservadas indicadas, se puede proceder a realizar la validación por FEM. Los resultados obtenidos mostrados en la ilustración xx verifican el correcto funcionamiento de la pieza, ya que la tensión máxima medida es de 84,1 MPa, inferior al límite de 260 MPa y ofrece un factor de seguridad de 3,09.

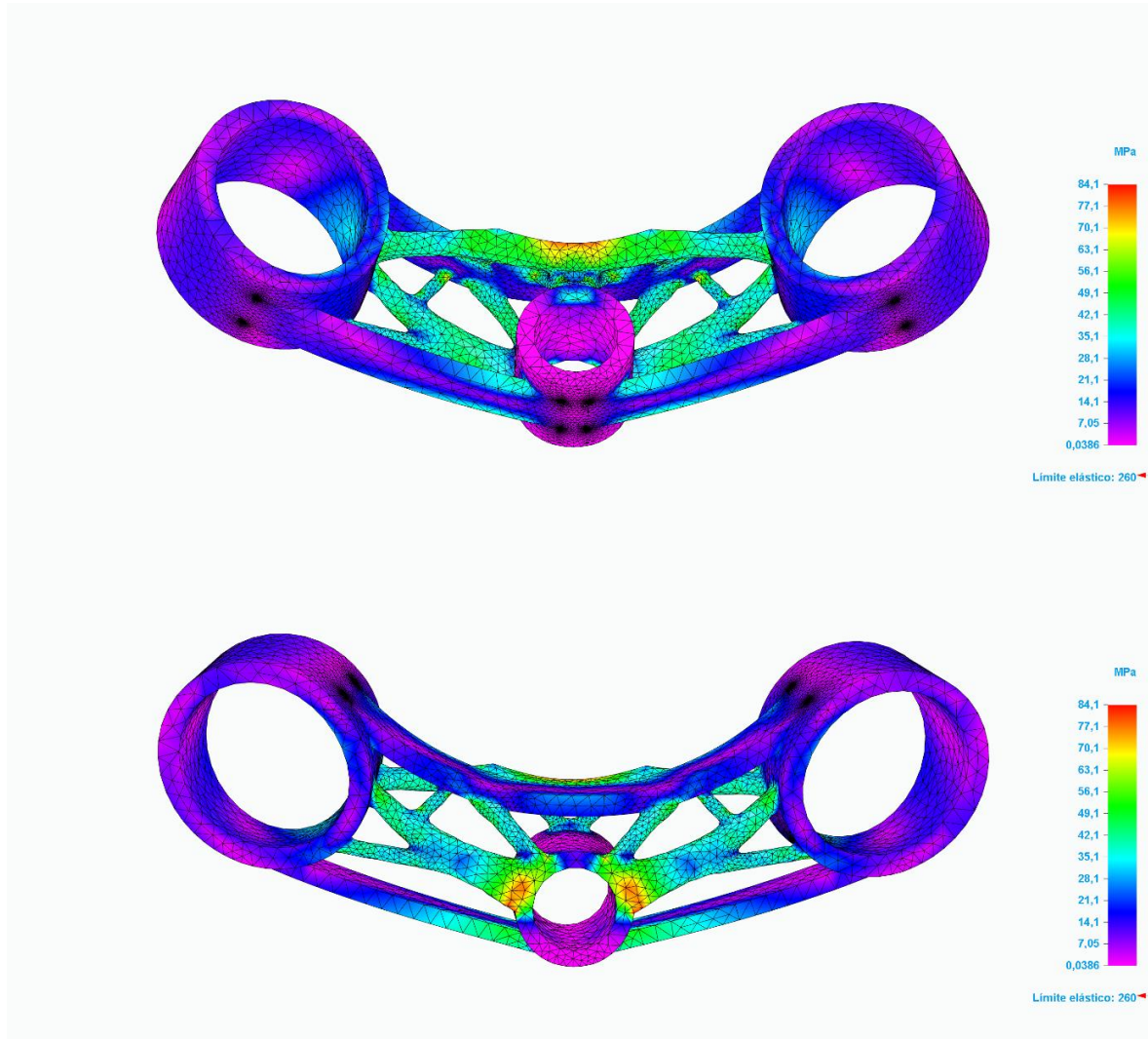


Ilustración 80: Simulación de la OT reducida al 57%. (fuente: propia)

4.8 SUAVIZADO EN ALTAIR INSPIRE

Siguiendo la metodología establecida anteriormente, el siguiente paso del proyecto consiste en suavizar la geometría del modelo final y para ello, se ha utilizado el software Altair Inspire. Este proceso permite eliminar aristas vivas o radios pequeños que pueden causar problemas a la hora de imprimir el prototipo.

Para poder trabajar con el prototipo final en el software de Altair, se exportó el archivo en formato “.STL” y se ajustaron la “tolerancia de conversión” y el “ángulo plano de superficie”

a 0,010 mm y 3° respectivamente. El objetivo de ajustar estas tolerancias es el de preservar de forma precisa la geometría generada por la optimización topológica.

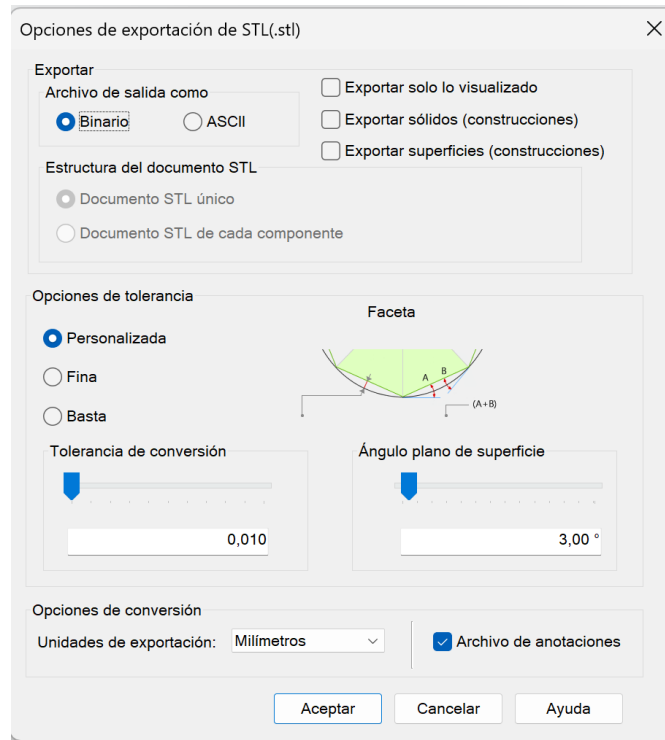


Ilustración 81: Tolerancias de conversión aplicadas al archivo .STL. (fuente: propia)

Como se ha establecido anteriormente, las geometrías donde se aplican las cargas y las restricciones son esenciales para su correcto funcionamiento. Por esta razón, se han realizado, mediante operaciones de bosquejo y extrusión, unos sólidos cilíndricos externos que se unirán mediante una unión booleana a la geometría final suavizada.

El siguiente paso dentro de la aplicación es el de crear una polyNURBS de la geometría deseada. Es esencial ajustar los parámetros del número de caras de la polyNURBS y el porcentaje de curvatura. El número de caras de la polyNURBS define cuántos parches envuelve el modelo. Un número alto proporciona una malla más fina y detallada y se adapta mejor a las curvas de la pieza. Sin embargo, pueden aparecer problemas sobre la superficie de la pieza porque puede generar una piel rugosa o con baches, dificultando el proceso de suavizado. Por otro lado, la opción de curvatura define la sensibilidad del algoritmo para detectar cambios bruscos en la superficie de la pieza. Un porcentaje más alto es más sensible

a las curvas pronunciadas, mientras que uno más bajo ignora los pequeños cambios. Para crear la malla del modelo suavizado se establecieron 3000 caras para la polyNURBS y una curvatura del 50% como se muestra en la Ilustración 82.

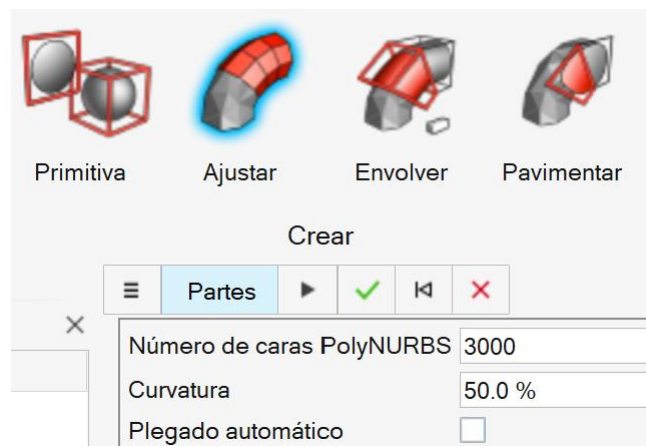


Ilustración 82: Botón de la polyNURBS. (fuente: propia)

Tras la operación de suavizado y después de aplicar el comando “reparar” para arreglar cualquier defecto en la malla de la pieza, se obtiene la geometría suavizada mostrada en la Ilustración 83.

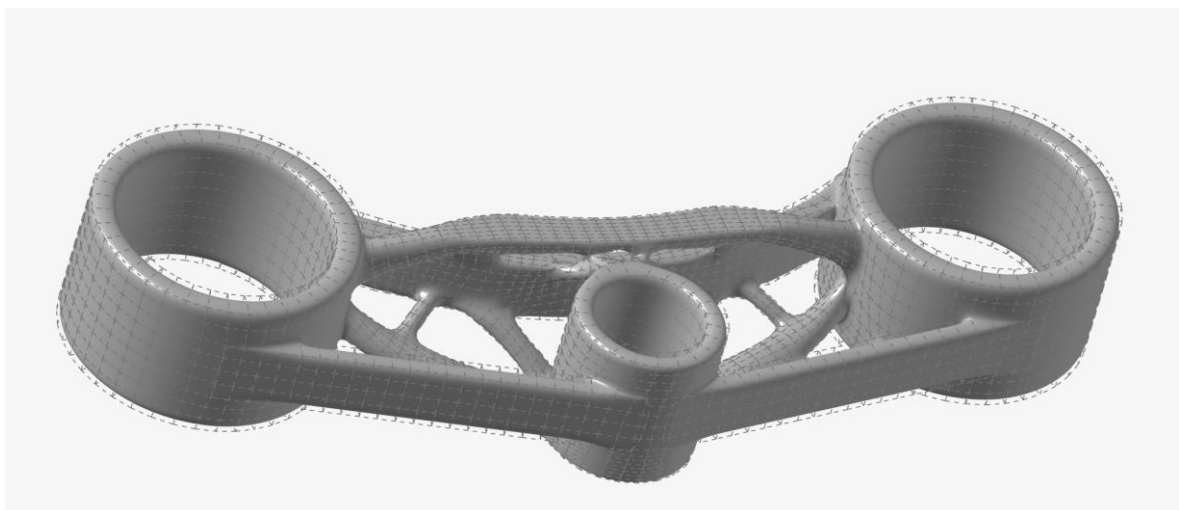


Ilustración 83: Tija suavizada en Altair Inspire. (fuente: propia)

El paso final consiste en unir los cilindros extruidos en la primera operación para obtener el resultado final mediante una unión booleana.

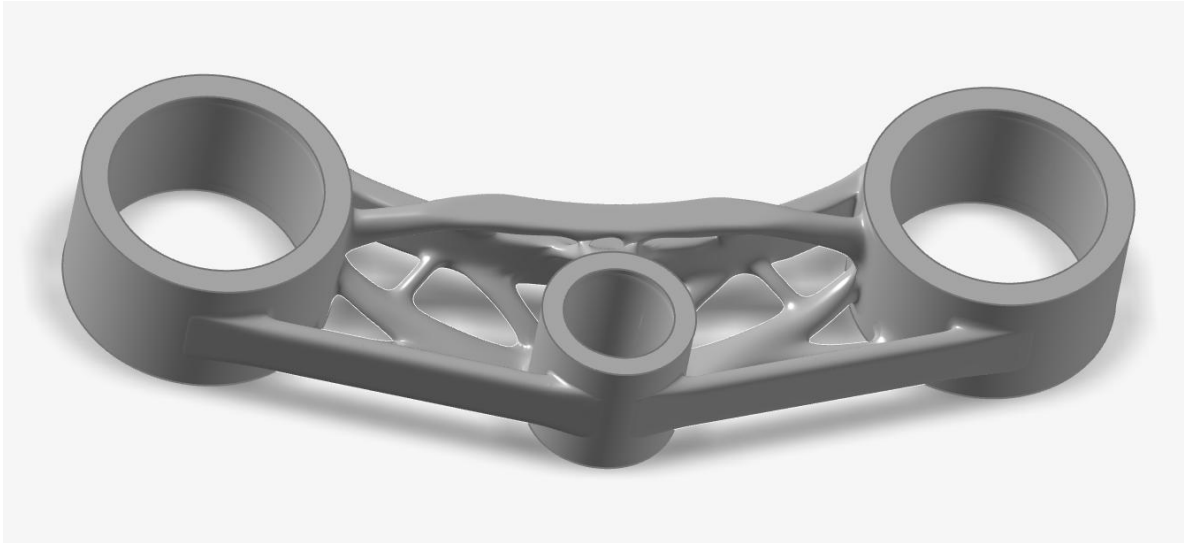


Ilustración 84: Resultado final de la tija suavizada. (fuente: propia)

4.9 FABRICACIÓN DE PROTOTIPOS

La fabricación de los prototipos de este proyecto se ha llevado a cabo aplicando distintas tecnologías de impresión 3D. A la hora de imprimir un modelo 3D, se debe considerar algunas variables de impresión importantes como la resolución y precisión, la repetibilidad, la capacidad de imprimir con multilateral, las propiedades mecánicas de la pieza, el acabado superficial, el tiempo de impresión, los costes y el postprocesado.

En este proyecto, se han impreso dos prototipos reales; uno con tecnología FDM y otro con tecnología SLA ya que las impresoras disponibles en ICAI permiten fabricar los prototipos con estas tecnologías.



Ilustración 85: Impresoras disponibles en ICAI. (fuente: ICAI)

4.9.1 PROTOTIPO IMPRESO EN FDM

Para el prototipo fabricado en la impresora FDM, se ha utilizado una A1 mini (Anexo IV: Ficha técnica A1 mini) y se han configurado las variables de impresión en el laminador de BambuStudio. El material utilizado fue PLA gris de la marca BambuLab. El primer paso antes de la impresión es cargar el archivo .3mf en el espacio de trabajo del laminador. Debido a las dimensiones tan reducidas de esta impresora (180x180x180), se redujo el tamaño de la tija a 75% del tamaño original.

A continuación, se procede a configurar los ajustes de impresión para garantizar un acabado aceptable sin aumentar los tiempos de impresión ni las operaciones de postprocesado necesarias. La configuración utilizada fue la siguiente:

- Altura de capa: 0,20 mm
- Bucles de pared: 2
- Densidad de relleno: 15%
- Patrón de relleno disperso: Rejilla
- Tipo de soporte: árbol

Y se obtuvieron los siguientes datos de impresión:



Ilustración 86: Datos de impresión en FDM del prototipo de la tija. (fuente: propia)

Al finalizar la impresión se obtuvo el siguiente resultado y se extrajeron los soportes del prototipo.



Ilustración 87: Tija impresa en FDM en la A1 mini. (fuente: propia)

La calidad del resultado final es buena, aunque presenta algunos defectos superficiales leves en las zonas donde se encontraba el material de soporte.



Ilustración 88: Prototipo impreso en FDM. (fuente: propia)

4.9.2 PROTOTIPO IMPRESORA EN SLA

Para la impresión en SLA se utilizó la impresora Forms 3L (Anexo V: Ficha técnica Forms 3L) y la resina Clear 4V. Para ajustar las variables de impresión, se utilizó el laminador Preform donde se configuró la altura de capa a 0,100 mm y se mantuvieron los ajustes de impresión predeterminados.

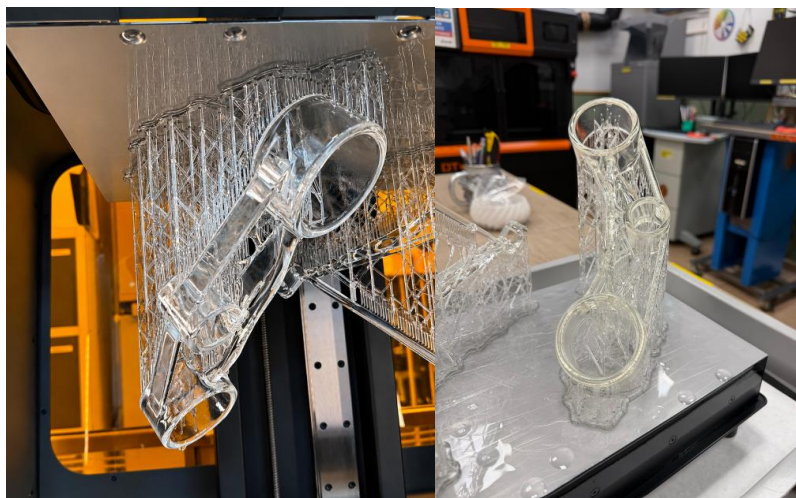


Ilustración 89: Tija impresa en la impresora Forms 3L. (fuente: propia)

Tras el proceso de fabricación, se lleva a cabo el tratamiento final de la pieza. Este tratamiento consiste en la retirada del material de soporte y la limpieza de la pieza mediante las herramientas mostradas en la Ilustración 90.



Ilustración 90: Herramientas utilizadas para el postprocesado de la tija impresa en SLA. (fuente: propia)

A la izquierda se encuentra una espátula, unos alicates y unas pinzas. La espátula ha sido utilizada para separar la tija de la placa de impresión y los alicates han servido de ayuda a la hora de eliminar el material de soporte en las áreas de difícil acceso. El segundo paso del tratamiento de la pieza consiste en la limpieza de la resina excedente que crea una capa superficial pegajosa sobre la pieza. Para ello, se han empleado unas brochas y un cubo de alcohol para eliminar esta capa superficial.

Por último, se debe de curar la pieza en la máquina Form Cure de FormLabs. Habiendo seleccionado el tipo de resina utilizada, el proceso de cura se adapta automáticamente. Para la resina Clear 4V este proceso se dividió en un tiempo de precalentado durante 5 minutos hasta llegar a los 60°C y un tiempo de curado a 60°C durante 15 minutos.



Ilustración 91: Curado de la pieza. (fuente: propia)

El resultado obtenido, mostrado en la Ilustración 92, presenta un muy buen acabado superficial con algunos puntos apreciables donde se unió el material de soporte.



Ilustración 92: Resultado de la tija impresa en SLA. (fuente: propia)

Capítulo 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 ANÁLISIS DE LA GEOMETRÍA

La geometría final optimizada presenta una configuración ligera pero que no compromete la rigidez estructural de la pieza para el caso de cargas aplicado. La pieza fue verificada mediante una simulación FEM en el que se aplicaron las cargas correspondientes al caso de frenada máxima y las restricciones sobre el eje de dirección. En este estudio de simulaciones se verificó que el componente tiene un factor de seguridad de 3 en el caso más crítico de la carrera.

También se aplicó un proceso de suavizado para obtener una pieza más lisa y evitar posibles defectos en el acabado superficial del modelo y evitar la acumulación de tensiones en picos o aristas vivas. Además, este proceso facilita la fabricación mediante técnicas de FA al garantizar una superficie sin irregularidades.

5.2 ANÁLISIS DEL COSTE DE FABRICACIÓN

Las distintas tecnologías de impresión 3D tienen costes asociados a su uso y mantenimiento. Sin embargo, estos costes pueden generalizarse utilizando una plantilla de simulación de Diego Trapero, fundador de Bitfab (*Bitfab - Servicio de impresión 3D online profesional*, s. f.) y otra proporcionada por el Departamento de Tecnologías de Fabricación de ICAI.

En este apartado se han estimado los costes de cada técnica de impresión, ajustando los parámetros según los datos obtenidos en el laminador correspondiente, el tipo de impresora y el material utilizado.

También existen empresas como Xometry (*Xometry*, s. f.) o i.materialise (*i.materialise*, s. f.) que ofrecen presupuestos para la fabricación de componentes en distintas tecnologías, incluyendo impresión 3D en tecnologías de impresión metálicas.

5.2.1 COSTES DE IMPRESIÓN EN FDM

Estas tecnologías destacan por ser más económicas, más versátiles y por su facilidad de uso y mantenimiento, y se pueden utilizar para crear prototipos o piezas funcionales.

Para simular los costes de la tija optimizada impresa mediante tecnología FDM, se ha utilizado la impresora Bambu Lab P1S, y el software Bambu Studio, ya que proporciona datos clave sobre los tiempos de impresión y el material utilizado. El material empleado fue *PLA – The Filament* de los proveedores de Filament2Print con un precio de 11,75€/kg (Filament2Print | Tienda online de impresión 3D profesional, s. f.).

Para el cálculo del tiempo de impresión y del material utilizado, se cargó la pieza en el laminador de Bambu Studio con los siguientes parámetros:

- Densidad de relleno: 15%
- Patrón de relleno: Rejilla
- Tipo de soportes: árbol

Y se obtuvieron los siguientes resultados recopilados en la Ilustración 93.

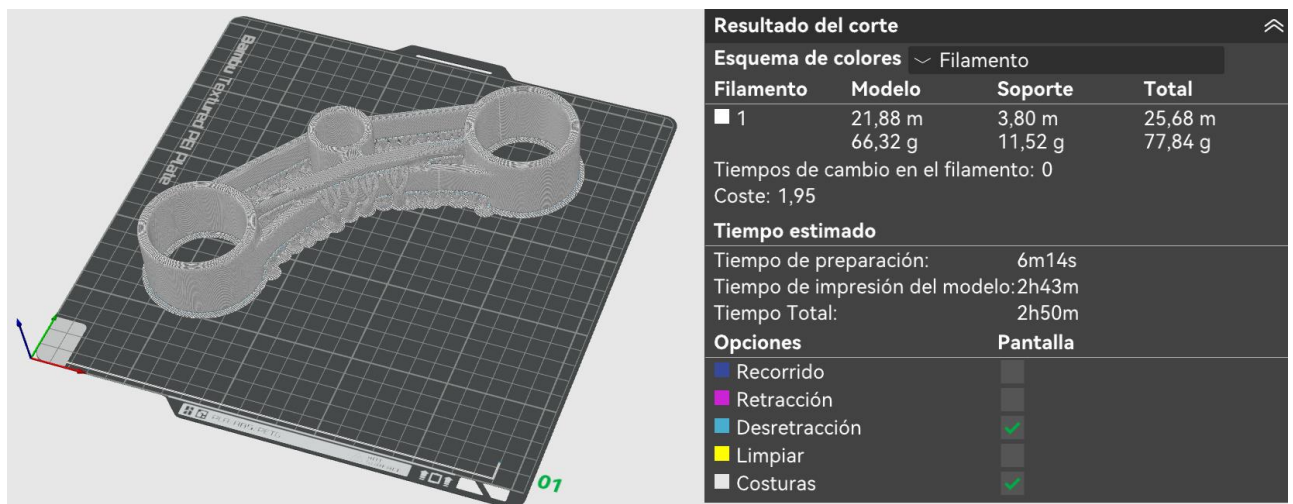


Ilustración 93: Datos de impresión en FDM de la pieza optimizada. (fuente: propia)

Aplicando los datos sobre la plantilla de costes proporcionada por ICAI, se obtienen los siguientes costes:



ANÁLISIS DE COSTES PARA PROTOTIPADO DE PIEZAS EN IMPRESORA 3D -FDM

DATOS AMORTIZACIÓN MÁQUINA		
Precio máquina (€)		389.00
Coste mantenimiento anual (€)		38.90
Años de amortización		5
Amortización (h/año) - 223 días-año / 8 horas-día		1784
Precio Hora máquina-amortización (€/h)		0.06
Precio Hora venta-público (€/h)		0.09
DATOS COSTE MATERIAL		
Coste material modelo: (€/kg)		11.75
Coste material soporte: (€/kg)		11.75
DATOS COSTE TÉCNICO ANALISTA		
Coste técnico analista del modelo - inc. desmoldeo (€/h)		30
PIEZA monica-lucia4-maxilar - Orientación HORIZONTAL		
CONCEPTOS PRESUPUESTADOS	Opción Solido	Costes parciales
Material modelo (g)	66.30	0.78 €/ud
Soporte modelo (g)	11.42	0.13 €/ud
Tiempo modelo (h)	2.82	0.24 €/ud
Tiempo técnico-analista (h)	1.00	30.00 €
Cantidad de piezas	1.00	
Coste unitario (€) en ICAI + IVA	31.15 €/Ud	
Coste total (€) en ICAI + IVA	31.15 €	

Tabla 11: Costes de impresión en FDM con la plantilla de ICAI. (fuente: propia)

En esta plantilla, el “precio hora venta-público” hace referencia al precio por hora que paga el cliente mientras la impresora está en funcionamiento y se ha estimado que el precio a pagar es 50% más que el precio por hora de la amortización de la impresora.

Empleando la plantilla proporcionada por Bitfab se calculan los costes de servicio y de pedido:



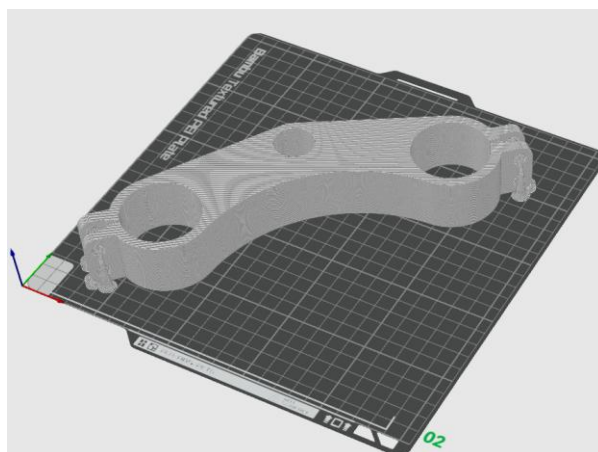
Datos del servicio	
Coste de la impresora	389 [€]
Periodo de amortización	5 [años]
Horas de uso por día laborable de la impresora	8 [h]
Coste luz	0.05 [€/kWh]
Potencia media de la impresora	0.125 [kW]
Coste de material	11.75 [€/kg]
Coste por hora de personal	30 [€/h]
Cálculo de los costes del servicio	
Costes pedido	
Coste por hora preparación/postprocesado	30 [€]
Costes por hora de impresión	
Coste de amortización de la impresora	0.04 [€/h]
Coste de la electricidad	0.01 [€/h]
Coste por hora total	0.05 [€/h]
Costes de consumibles	
Coste de material	11.75 [€/kg]

Datos del pedido	
Tiempo de preparación/postprocesado	1 [h]
Datos de la pieza	
Tiempo de impresión	2.82 [h]
Masa	0.07772 [kg]
Cantidad	1 [u]
Coste de pedido	
Costes de pedido	
Preparación/postprocesado del pedido	30 [€]
Coste de la pieza	
Material	0.91 [€/u]
Horas de impresión	0.13 [€/u]
Coste por pieza	1.04 [€/u]
Coste de todas las piezas	1.04 [€]
Costes totales del pedido	
Coste total del pedido	31.04 [€]
Cada unidad adicional	1.04 [€]

Tabla 12: Costes de impresión en FDM con la plantilla de Bitfab. (fuente: propia)

En vista del cálculo de los costes utilizando ambas plantillas, se obtiene un coste aproximado de 31€.

Al realizar el mismo análisis de costes con la tija original sin optimizar y aplicando los mismos parámetros, se miden los siguientes datos en Bambu Studio:



Resultado del corte

Esquema de colores ▼ Filamento

Filamento	Modelo	Soporte	Total
1	33,04 m 100,14 g	0,64 m 1,93 g	33,68 m 102,08 g

Tiempos de cambio en el filamento: 0
Coste: 2,55

Tiempo estimado

Tiempo de preparación: 6m14s
Tiempo de impresión del modelo: 2h9m
Tiempo Total: 2h15m

Opciones

Opciones	Pantalla
Recurrido	☐
Retracción	☐
Desretracción	☒
Limpiar	☐
Costuras	☒

Ilustración 94: Datos de impresión en FDM de la tija original. (fuente: propia)

El material de soportes utilizado en esta impresión es inferior al caso anterior, 9,49 g menos, pero el material total utilizado es superior debido al material necesario para imprimir la tija. El tiempo de impresión también es ligeramente menor que al caso anterior y como el modelo imprimido requiere menos soportes, se ha reducido el tiempo de preparación y postprocesado a 30 minutos en lugar de una hora. Se procedió a modificar los datos en la plantilla de Bitfab para comparar los costes de impresión de ambos modelos.



Datos del servicio	
Coste de la impresora	389 [€]
Periodo de amortización	5 [años]
Horas de uso por día laborable de la impresora	8 [h]
Coste luz	0.05 [€/kWh]
Potencia media de la impresora	0.125 [kW]
Coste de material	11.75 [€/kg]
Coste por hora de personal	30 [€/h]
Cálculo de los costes del servicio	
Costes pedido	
Coste por hora preparación/postprocesado	30 [€]
Costes por hora de impresión	
Coste de amortización de la impresora	0.04 [€/h]
Coste de la electricidad	0.01 [€/h]
Coste por hora total	0.05 [€/h]
Costes de consumibles	
Coste de material	11.75 [€/kg]

Datos del pedido	
Tiempo de preparación/postprocesado	0.5 [h]
Datos de la pieza	
Tiempo de impresión	2.25 [h]
Masa	0.10208 [kg]
Cantidad	1 [u]
Coste de pedido	
Costes de pedido	
Preparación/postprocesado del pedido	15 [€]
Coste de la pieza	
Material	1.20 [€/u]
Horas de impresión	0.10 [€/u]
Coste por pieza	1.30 [€/u]
Coste de todas las piezas	1.30 [€]
Costes totales del pedido	
Coste total del pedido	16.30 [€]
Cada unidad adicional	1.30 [€]

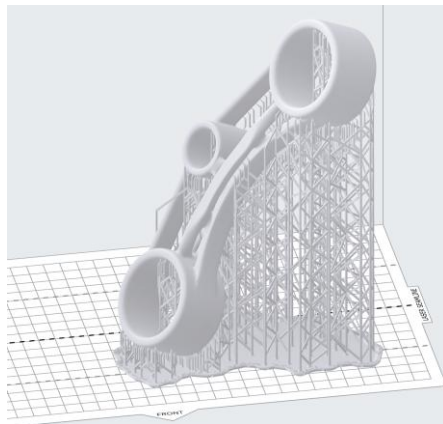
Tabla 13: Costes de impresión en FDM de la tija original. (fuente: propia)

Comparando ambos costes, aunque el material utilizado en el caso de la tija optimizada sea menor, el coste total del pedido de la tija original es 14,74€ menor.

5.2.1.1 Costes de impresión en SLA

La impresión en SLA o resina líquida ofrece una resolución excelente y permite imprimir detalles muy pequeños y obtener acabados superficiales muy lisos.

Para la simulación de los costes de impresión, se ha utilizado el laminador Preform y la impresora Form3L.



Resumen ⓘ



⌚	Tiempo de impresión total ⓘ	13 h 49 m
📦	Volumen	188,42 ml ▼
	Modelo(s)	115,39 ml
	Soportes	57,21 ml
	Base	15,82 ml

Ilustración 95: Datos de la impresión en SLA de la tija optimizada. (fuente: propia)

Usando la plantilla de ICAI se obtiene el siguiente resultado de los costes de impresión.

		
ANÁLISIS DE COSTES PARA PROTOTIPADO DE PIEZAS EN IMPRESORA 3D -SLA		
DATOS AMORTIZACIÓN MÁQUINA		
Precio máquina (€)		3,844
Coste mantenimiento anual (€)		384
Años de amortización		5
Amortización (h/año) - 223 días-año / 8 horas-día		1784
Precio Hora máquina-amortización (€/h)		0.56
Precio Hora venta-público (€/h)		0.84
DATOS COSTE MATERIAL		
Coste material modelo: Clear 4V (€/cc) (169.40€-1000 cc)		0.17
Coste material soporte: Clear 4V(€/cc) (169.40€-1000 cc)		0.17
DATOS COSTE TÉCNICO ANALISTA		
Coste técnico analista del modelo - inc. desmoldeo (€/h)		30
DATOS TÉCNICOS DE DEPOSICIÓN		
Tipo de modelo	Malla	Sólido
Tasa de deposición (cc/h)	22.4	16
Precio hora máquina-deposición (€/h)	4.74	
PIEZA PU RÍGID - Orientación HORIZONTAL		
CONCEPTOS PRESUPUESTADOS	Opción Sólido	Costes parciales
Material modelo (cc)	115.39	19.55 €/ud
Soporte modelo (cc)	73.03	12.37 €/ud
Tiempo modelo (h)	13.82	11.61 €/ud
Piezas por bandeja (ud)	1.00	0.00 €/ud
Tiempo técnico-analista (h)	1.50	45.00 €
Cantidad de piezas	1.00	
Coste unitario (€) en ICAI + IVA	88.53 €/Ud	
Coste total (€) en ICAI + IVA	88.53 €	

Tabla 14: Costes de la impresión en SLA con la plantilla de ICAI. (fuente: propia)

Esta tecnología de impresión 3D requiere un postprocesado extenso ya que se deben quitar todos los soportes de la pieza, limpiar la pieza con alcohol y esperar un tiempo para curar la resina. Por esta razón, se estimó un tiempo de 1,5 h para el preparado y el postproceso de la

pieza. En cuanto al material empleado para el cálculo, se ha utilizado resina Clear 4V que tiene un precio de 169,40€/L (*Clear Resin V4.1*, s. f.).

Al realizar la misma simulación con la plantilla de Bitfab, se obtiene:

Datos del servicio	
Coste de la impresora	3844 [€]
Periodo de amortización	5 [años]
Horas de uso por día laborable de la impresora	8 [h]
Coste luz	0.05 [€/kWh]
Potencia media de la impresora	0.4 [kW]
Coste de material	0.1694 [€/cc]
Coste por hora de personal	30 [€/h]
Cálculo de los costes del servicio	
Costes pedido	
Coste por hora preparación/postprocesado	30 [€]
Costes por hora de impresión	
Coste de amortización de la impresora	0.43 [€/h]
Coste de la electricidad	0.02 [€/h]
Coste por hora total	0.45 [€/h]
Costes de consumibles	
Coste de material	0.1694 [€/cc]



Datos del pedido	
Tiempo de preparación/postprocesado	1.5 [h]
Datos de la pieza	
Tiempo de impresión	13.82 [h]
Masa	188.42 [cc]
Cantidad	1 [u]
Coste de pedido	
Costes de pedido	
Preparación/postprocesado del pedido	45 [€]
Coste de la pieza	
Material	31.92 [€/u]
Horas de impresión	6.23 [€/u]
Coste por pieza	38.15 [€/u]
Coste de todas las piezas	38.15 [€]
Costes totales del pedido	
Coste total del pedido	83.15 [€]
Cada unidad adicional	38.15 [€]

Tabla 15: Costes de la impresión en SLA con la plantilla de Bitfab. (fuente: propia)

Con ambas plantillas se obtiene un coste aproximado de 83 a 89€ para imprimir en SLA. Al ser una técnica que requiere de una impresora y un tipo de material más caro, los costes de fabricación son mayores que los de la impresión por FDM.

A continuación, se comparan los costes de impresión de la tija optimizada con los costes de impresión de la versión original de la tija. Ambos modelos se han importado en el software de Preforms y se han aplicado la misma impresora, el mismo material y el comando de orientación automática con el objetivo de comparar ambos resultados de forma igualitaria.

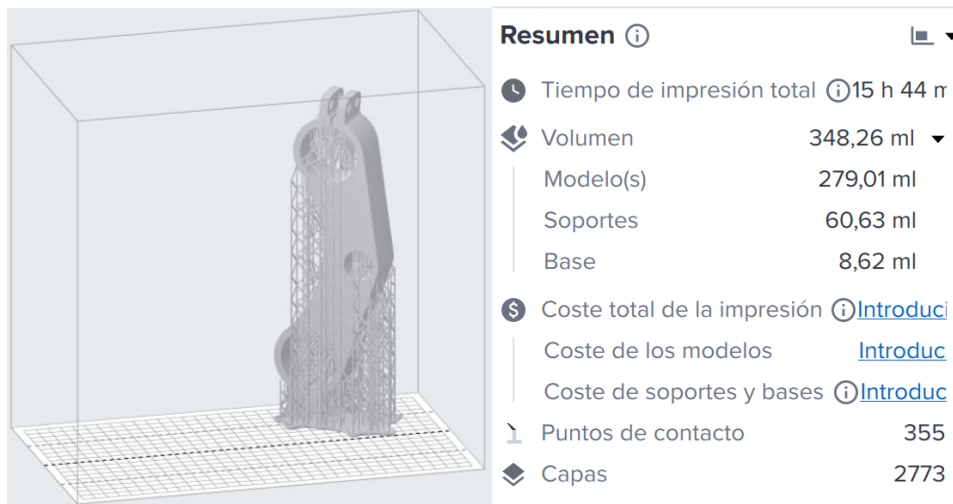


Ilustración 96: Datos de impresión en SLA de la tija original. (fuente: propia)

Comparando los resúmenes de impresión de ambos casos, se aprecia la gran diferencia en el volumen de resina empleado para generar la geometría del modelo. En el caso de la tija inferior original, al estar completamente rellena, el volumen del modelo es mayor por lo que requiere más resina para la impresión.

Al realizar el análisis de los costes con la plantilla de Bitfab, se obtienen los siguientes resultados:



Datos del servicio	
Coste de la impresora	3844 [€]
Periodo de amortización	5 [años]
Horas de uso por día laborable de la impresora	8 [h]
Coste luz	0.05 [€/kWh]
Potencia media de la impresora	0.4 [kW]
Coste de material	0.1694 [€/cc]
Coste por hora de personal	30 [€/h]
Cálculo de los costes del servicio	
Costes pedido	
Coste por hora preparación/postprocesado	30 [€]
Costes por hora de impresión	
Coste de amortización de la impresora	0.43 [€/h]
Coste de la electricidad	0.02 [€/h]
Coste por hora total	0.45 [€/h]
Costes de consumibles	
Coste de material	0.1694 [€/cc]

Datos del pedido	
Tiempo de preparación/postprocesado	1.5 [h]
Datos de la pieza	
Tiempo de impresión	15.73 [h]
Masa	328.26 [cc]
Cantidad	1 [u]
Coste de pedido	
Costes de pedido	
Preparación/postprocesado del pedido	45 [€]
Coste de la pieza	
Material	55.61 [€/u]
Horas de impresión	7.09 [€/u]
Coste por pieza	62.70 [€/u]
Coste de todas las piezas	62.70 [€]
Costes totales del pedido	
Coste total del pedido	107.70 [€]
Cada unidad adicional	62.70 [€]

Tabla 16: Costes de impresión en SLA de la tija original. (fuente: propia)

El tiempo de preparación y de postprocesado se ha mantenido igual ya que el proceso de preparación aplicado fue el mismo y el volumen de los soportes de la pieza es muy similar para ambos prototipos.

Comparando ambos resultados, se observa que los costes de impresión del prototipo original de la tija son 24,55€ más caros, casi un 30% más costosos que la impresión del prototipo optimizado.

En este caso y dado que las dimensiones de la impresora Forms 3L lo permiten, resulta interesante analizar la variación de los costes por unidad al imprimir múltiples prototipos en la misma placa de impresión. Como muestran la Tabla 17 y el gráfico representado en la Ilustración 97, aunque el coste total aumenta al incrementar el número de modelos impresos en la misma placa de impresión, el coste por unidad disminuye notablemente.

Número de piezas impresas	Tiempo de impresión	Volumen de resina (ml)	Tiempo de preparación /postprocesado (h)	Coste total (€)	Coste por unidad (€/ud)
1	13.82	188.42	1.5	83.15	83.15
2	17.87	384.88	3	163.26	81.63
3	21.97	576.94	4.5	242.51	80.87
4	28.05	746.66	6	319.13	79.78

Tabla 17: Evolución del coste unitario en función del número de piezas impresas. (fuente: propia)

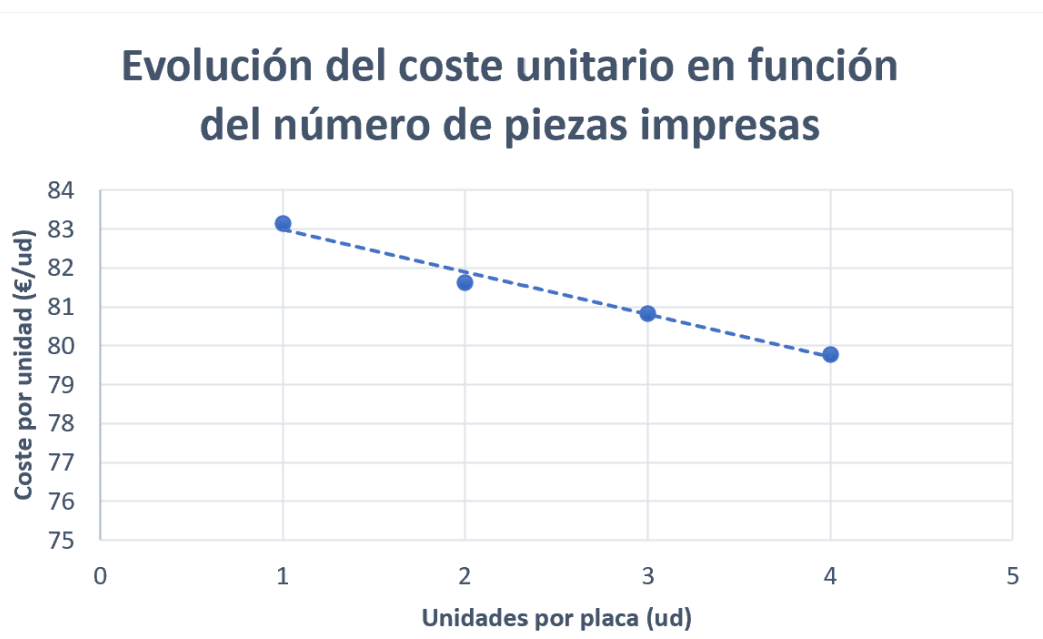


Ilustración 97: Gráfico de la evolución del coste unitario en función del número de piezas impresas. (fuente: propia)

5.2.2 COSTES DE IMPRESIÓN EN SLS

Esta tecnología de fabricación aditiva destaca por crear modelos sin la necesidad de material de soporte, ya que el polvo no utilizado sirve como estructura de apoyo para las partes colgantes del modelo. También destaca por crear piezas isotrópicas, ya que toda la pieza está completamente rellena de material.

Para las simulaciones de los costes, se ha utilizado la impresora FUSE 1 de Formlabs y el material utilizado es Nylon 11 V1 que tiene un coste de 845,79€ por cada 6 kg (*Nylon 11 Powder*, s. f.).

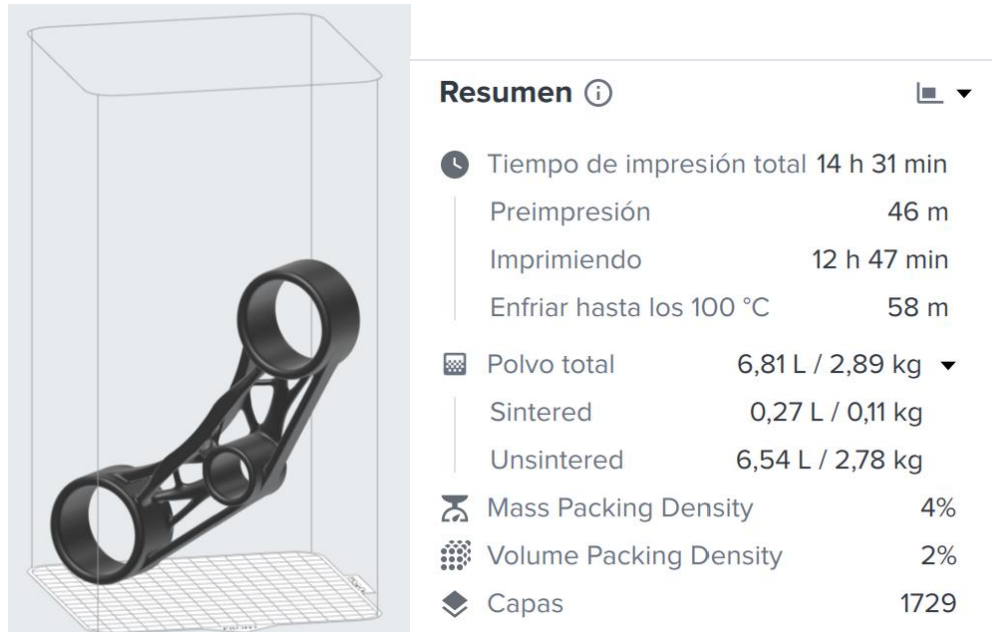


Ilustración 98: Datos de impresión en SLS. (fuente: propia)

El material marcado como sin sinterizar comprende la mayor parte del material utilizado para la impresión. Sin embargo, como este material se puede reutilizar ya que no ha sido utilizado, no se tiene en cuenta en el cálculo de los costes de impresión.

Sustituyendo los datos en la plantilla de ICAI se obtienen los siguientes resultados:

ANÁLISIS DE COSTES PARA PROTOTIPADO DE PIEZAS EN IMPRESORA 3D -FUSE 1		
DATOS AMORTIZACIÓN MÁQUINA		
Precio máquina (€)		28,680
Coste mantenimiento anual (€)		2,868
Años de amortización		5
Amortización (h/año) - 223 días-año / 8 horas-día		1784
Precio Hora máquina-amortización (€/h)		4.18
Precio Hora venta-público (€/h)		6.27
DATOS COSTE MATERIAL		
Coste material modelo: filamento abs (€/kg) (845,79€- 6kg)		140.97
DATOS COSTE TÉCNICO ANALISTA		
Coste técnico analista del modelo - inc. desmoldeo (€/h)		30
DATOS TÉCNICOS DE DEPOSICIÓN		
Tipo de modelo	Malla	Sólido
Tasa de deposición (cc/h)	22.4	16
Precio hora máquina-deposición (€/h)	4.74	
PIEZA PU RIGID - Orientación HORIZONTAL		
CONCEPTOS PRESUPUESTADOS	Opción Sólido	Costes parciales
Material modelo (kg)	0.011	1.55 €/ud
Soporte modelo (kg)	0.00	0.00 €/ud
Tiempo modelo (h)	14.32	89.78 €/ud
Piezas por bandeja (ud)	1.00	0.00 €/ud
Tiempo técnico-analista (h)	1.00	30.00 €
Cantidad de piezas	1.00	
Coste unitario (€) en ICAI + IVA	121.33 €/Ud	
Coste total (€) en ICAI + IVA	121.33 €	

Tabla 18: Costes de la impresión en SLS con la plantilla de ICAI. (fuente: propia)

De igual forma, sustituyendo los datos en la plantilla de Bitfab, se obtienen los siguientes costes de pedidos y servicios:



Datos del servicio	
Coste de la impresora	28680 [€]
Periodo de amortización	5 [años]
Horas de uso por día laborable de la impresora	8 [h]
Coste luz	0.05 [€/kWh]
Potencia media de la impresora	3.45 [kW]
Coste de material	140.965 [€/kg]
Coste por hora de personal	30 [€/h]
Cálculo de los costes del servicio	
Costes pedido	
Coste por hora preparación/postprocesado	30 [€]
Costes por hora de impresión	
Coste de amortización de la impresora	2.87 [€/h]
Coste de la electricidad	0.17 [€/h]
Coste por hora total	3.04 [€/h]
Costes de consumibles	
Coste de material	140.965 [€/kg]

Datos del pedido	
Tiempo de preparación/postprocesado	1 [h]
Datos de la pieza	
Tiempo de impresión	14.32 [h]
Masa	0.011 [kg]
Cantidad	1 [u]
Coste de pedido	
Costes de pedido	
Preparación/postprocesado del pedido	30 [€]
Coste de la pieza	
Material	1.55 [€/u]
Horas de impresión	43.54 [€/u]
Coste por pieza	45.09 [€/u]
Coste de todas las piezas	45.09 [€]
Costes totales del pedido	
Coste total del pedido	75.09 [€]
Cada unidad adicional	45.09 [€]

Tabla 19: Costes de la impresión en SLS con la plantilla de Bitfab. (fuente: propia)

La diferencia de precio entre una plantilla y otra es de 46,24€ debido a las distintas formas de contabilizar los costes. La plantilla de ICAI incluye en el cálculo del coste el debido al mantenimiento de la impresora, pero no el coste incurrido por el consumo de la electricidad.

A continuación, se simulan los costes de fabricación de la tija original aplicando el mismo análisis con la plantilla de Bitfab.



Ilustración 99: Datos de impresión en SLS de la tija original. (fuente: propia)

Al tratarse de una pieza grande y al estar completamente rellena, el tiempo de impresión es considerablemente mayor y el material consumido, también lo es. Esto influye directamente en los costes de impresión de la pieza. Aplicando los datos en la plantilla de costes de Bitfab, obtenemos los siguientes costes:



Datos del servicio	
Coste de la impresora	28680 [€]
Periodo de amortización	5 [años]
Horas de uso por día laborable de la impresora	8 [h]
Coste luz	0.05 [€/kWh]
Potencia media de la impresora	3.45 [kW]
Coste de material	140.965 [€/kg]
Coste por hora de personal	30 [€/h]
Cálculo de los costes del servicio	
Costes pedido	
Coste por hora preparación/postprocesado	30 [€]
Costes por hora de impresión	
Coste de amortización de la impresora	2.87 [€/h]
Coste de la electricidad	0.17 [€/h]
Coste por hora total	3.04 [€/h]
Costes de consumibles	
Coste de material	140.965 [€/kg]

Datos del pedido	
Tiempo de preparación/postprocesado	1 [h]
Datos de la pieza	
Tiempo de impresión	18.38 [h]
Masa	0.028 [kg]
Cantidad	1 [u]
Coste de pedido	
Costes de pedido	
Preparación/postprocesado del pedido	30 [€]
Coste de la pieza	
Material	3.95 [€/u]
Horas de impresión	55.88 [€/u]
Coste por pieza	59.83 [€/u]
Coste de todas las piezas	59.83 [€]
Costes totales del pedido	
Coste total del pedido	89.83 [€]
Cada unidad adicional	59.83 [€]

Tabla 20: Costes de impresión en SLS de la tija original. (fuente: propia)

El coste de impresión de la tija inferior sin optimizar es de 89,83 €, que supone un aumento de 14,74 € o casi un 20% respecto de la tija inferior optimizada impresa en la impresora FUSE 1.

5.2.3 COMPARACIÓN DE COSTES

En la Tabla 21, se pueden comparar los costes de impresión 3D en distintas tecnologías aplicando la tabla de Bitfab.

Tecnología	Coste (€)		Diferencia de costes(%)
	Tija original	Tija optimizada	
FDM	16,30	31,04	+90,4
SLA	107,70	83,15	-22,8
SLS	89,83	75,09	-16,4

Tabla 21: Comparación de precios de impresión del prototipo. (fuente: propia)

Se observa que en la tecnología FDM, los costes de fabricación son mayores que en el resto de las tecnologías. Esto se debe a la forma de fabricación de los prototipos. El modelo original tiene un mayor volumen que puede rellenarse con una densidad de relleno menor, mientras que la tija optimizada tiene muchas más paredes y requiere más soportes para su fabricación. Por esta razón, los costes de fabricación son mayores ya que el consumo de material es considerablemente mayor que el consumo de material en la tija original. Sin embargo, en las tecnologías de SLA y SLS, al tratarse de un prototipo completamente relleno, la reducción de peso se refleja en el coste de impresión ya que, al disminuir el volumen total del componente, el material empleado es menor.

5.2.4 PRESUPUESTO ONLINE

Existen algunas páginas de fabricación bajo demanda que ofrecen sus servicios a clientes para crear y vender productos personalizados sin la necesidad de invertir en la maquinaria ni en el material necesario para la fabricación. Estas empresas ofrecen un presupuesto instantáneo del coste de producción del prototipo mediante el uso de la inteligencia artificial. Algunas empresas como Xometry (*Xometry*, s. f.) o i.materialise (*i.materialise*, s. f.) ofrecen servicios de fabricación mediante tecnologías de impresión 3D.

Para este apartado, se ha utilizado la página web de Xometry en la que se ha importado el archivo .STL del prototipo final, el método de fabricación deseado y el material utilizado. Para la tija optimizada, el método de fabricación utilizado fue el de impresión 3D por DMLS (Direct Metal Laser Sintering) ya que esta tecnología permite fabricar modelos 3D fundiendo partículas de polvo metálico capa por capa. En cuanto al material, se ha seleccionado el aluminio AlSi10Mg con una resolución de 60 μg cuya ficha técnica está representada en el Anexo VIII: AlSi10Mg.

Al cargar el archivo del modelo de la tija inferior optimizada, resulta que las dimensiones de la pieza excedían el tamaño máximo para obtener un presupuesto generado por el software de inteligencia artificial usado para el método de fabricación elegido. Por esta razón, se decidió dividir la pieza por la mitad y duplicar el valor del presupuesto ofrecido a modo de estimación de un presupuesto real del componente completo.

☐

Impresión 3D

☐


10. Tija_OT_P5_57_SZ_SUAVE...


Proceso: Impresión 3D DMLS ...Directo de Metales
Dimensiones: 117.2mm × 80.9mm × 34.0mm
Material: Aluminio AISi10Mg
Resolución (espesor de capa), μm: >60
Acabado: Standard
Roscas y taladros roscados: 0 lugares

Cant.

Ahorra 45% en 5 unidades

Estándar 12 días laborables	322,12 € Unidad: 322,12 €
Exprés  Opción no está disponible	

Ilustración 100: Presupuesto de Xometry de la tija optimizada fabricada por DMLS. (fuente: propia)

A partir de esta estimación, se concluye que el coste de impresión de la tija optimizada sería aproximadamente 640€.

En cuanto a la tija original, el presupuesto se obtuvo aplicando el proceso de fabricación más adecuado dado su geometría y las especificaciones según el plano de la pieza (ver Anexo I: Plano de la tija). En este caso, se ha seleccionado la fabricación por CNC del material aluminio 6082 (Anexo VII: Aluminio 6082-T6) con un acabado estándar, tolerancias medias y un acabado superficial de 3.2 μm.

☐

CNC y chapa metálica

☐


20. Tija_V1.stp


Proceso: Mecanizado CNC
Dimensiones: 269.8mm × 81.0mm × 34.0mm
Material: Aluminio AW-6082 / 3.2315 / Al-...
Acabado: Standard
Roscas y taladros roscados: 0 lugares
Requisitos de rugosidad superficial: Standard (3.2 um ...
Tolerancia: ISO 2768 - media (mK), parte ...

Cant.

Ahorra 47% en 5 unidades

Economía 18 días laborables	316,69 € Unidad: 316,69 €
Estándar 14 días laborables	332,52 € Unidad: 332,52 €
Exprés   9 días laborables	506,70 € Unidad: 506,70 €

Ilustración 101: Presupuesto de Xometry para la fabricación de la tija original. (fuente: propia)

5.3 ANÁLISIS DEL IMPACTO MEDIOAMBIENTAL

5.3.1 CONSUMO DEL MATERIAL

El modo de fabricación más adecuado para la versión original de la tija inferior es la fabricación sustractiva en la que se parte de un bloque de material en bruto y se sustrae material mediante procesos de arranque de material. Las dimensiones iniciales de la tija son 270x81x34 mm, como se muestra en la Ilustración 102. Sin embargo, el bloque en bruto utilizado para la fabricación del componente debe ser ligeramente más grande que la pieza final. Con el fin de simplificar el estudio, se asume que el bloque en bruto tiene 5mm adicionales en cada dirección (275x86x39 mm) por lo que su volumen original es de 922,35 cm³. Sin embargo, el volumen de la tija inicial medido en las propiedades físicas proporcionadas por Solid Edge es de 273,94 cm³

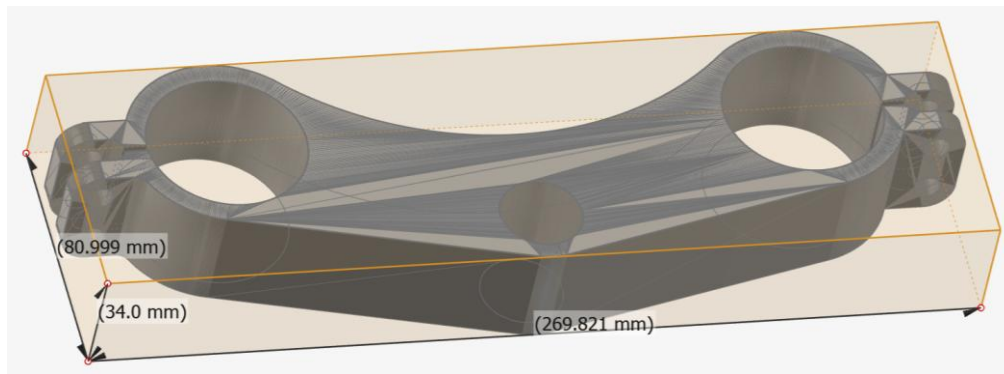


Ilustración 102: Dimensiones de la tija inferior. (fuente: propia)

Esta diferencia de volúmenes supone un desperdicio del 70% respecto del material inicial.

$$E. 20 \quad \frac{922,35 - 273,92}{922,35} = 0,703$$

Sin embargo, el uso de métodos de FA permite optimizar el uso de material, asegurando un uso más responsable y sostenible. En las técnicas de impresión DMLS, el material no sinterizado es parcialmente reutilizable, ya que del 90 al 95% del material puede usarse para otras impresiones.

5.3.2 CONSUMO ENERGÉTICO

Por un lado, la fabricación por mecanizado es una técnica que implica un consumo de electricidad reducido, dependiendo de la maquinaria utilizada, las herramientas empleadas y el número de operaciones realizadas. Sin embargo, se puede aproximar el consumo energético de una fresadora CNC de 3 ejes (estas aproximaciones han sido proporcionadas por una IA):

- En vacío 1-2 kW
- Durante el mecanizado del aluminio: 3-6 kW
- Con picos de: 8-10 kW
- Potencia media estimada: 5 kW

Dadas las dimensiones y la geometría de la pieza, se asume que el tiempo total de mecanizado es de aproximadamente 60 minutos.

$$E. 21 \quad E = P \cdot t = 5 \cdot 1 = 5 \text{ kWh}$$

Por el otro lado, la impresión metálica debe consumir mucha energía para sinterizar la capa de polvo metálico y fundirlo en el lugar correcto. La impresora EOS M 290 (Anexo VI: Ficha técnica EOS M 290) de la marca EOS (referencia: en I3D) tiene un consumo máximo de 8.5 kW y un consumo medio de 2.4 kW. Si se asume que el tiempo de producción de la tija optimizada con esta impresora es el mismo tiempo que la impresora SLS estudiada en el apartado anterior (12.78h), se puede estimar la energía requerida para la fabricación de dicho componente.

$$E. 22 \quad E = P \cdot t = 2,4 \cdot 12,78 = 306,9 \text{ kWh}$$

5.3.3 HUELLA DE CARBONO

Una vez calculada la energía requerida para la fabricación de la tija optimizada, se puede proceder a realizar un estudio de la huella de carbono que supone fabricar dicho componente. Según la Oficina Española de Cambio Climático (OECC), el valor real de las emisiones del

mix eléctrico nacional es de 0,102 kg de CO₂ eq/kWh (FE) (*Nuevos factores de emisión 2024*, s. f.).

Con este dato, se pueden calcular las emisiones de CO₂ de la fabricación de la pieza mediante CNC debido al consumo eléctrico.

$$E. 23 \quad CO_2 = E \cdot FE = 5 \cdot 0,102 = 0,51 \text{ kg } CO_2$$

Para hacer una aproximación de las emisiones de CO₂ del material utilizado para la fabricación de la tija original, se utiliza el dato de kilos de emisiones de CO₂ equivalente por kilo de aluminio proporcionado por hydro (*Aluminio reciclado y con bajas emisiones de carbono*, s. f.). En 2024, el IAI estimó la huella de carbono media global en 14,5 kg de CO₂/kg de aluminio y, multiplicando por las dimensiones del bloque en bruto de aluminio y su densidad (2,7g/cm³), se obtiene:

$$E. 24 \quad CO_2 \text{ del material} = 14,5 \cdot \left(922,35 \cdot \frac{2,7}{1000} \right) = 36,11 \text{ kg } CO_2$$

Por lo tanto, un valor aproximado de las emisiones debidas a la fabricación de la tija inferior original es de 36,62 kg de CO₂.

Aplicando el mismo razonamiento para la fabricación de la pieza en una impresora EOS M 290 se estima que emite 31,2 kg de CO₂.

$$E. 25 \quad CO_2 = E \cdot FE = 306,9 \cdot 0,102 = 31,2 \text{ kg } CO_2$$

También hay que tener en cuenta la huella de carbono generada durante la obtención del material utilizado. La empresa EOS no publica un valor exacto de las emisiones debido al material utilizado, ya que calcula el dato para cada lote de producción individualmente. Sin embargo, en febrero de 2025, EOS publicó que el material AlSi10Mg se produce con materia prima 100% reciclable y se estima que esto reduce en un 83% las emisiones de CO₂ comparado con el mismo material obtenido a partir de 100% de materia prima virgen (*EOS AlSi10Mg fabricado con materia prima 100% reciclada*, s. f.).

Con estos datos y considerando que el peso final de la tija optimizada fue de 325 g, se puede calcular aproximadamente el impacto medioambiental del material utilizado para imprimir la pieza:

$$E. 26 \quad CO_2 \text{ por kg de AlSi10Mg} = 14,5 \cdot (1 - 0,83) = 2,465 \frac{CO_2}{kg}$$

$$E. 27 \quad CO_2 \text{ total} = 2,465 \cdot 0,325 \cdot 1,1 = 0,88 \text{ kg de } CO_2$$

Se ha multiplicado el valor por un factor de 1.1 ya que el 90% del material utilizado en las impresoras de cama de polvo se puede reutilizar, es decir, se pierde un 10% del material no utilizado y se debe tener en cuenta en el cálculo de las emisiones de CO₂.

Dadas las aproximaciones realizadas en este apartado, se calcula que la huella de carbono generada para fabricar la tija inferior optimizada mediante técnicas de impresión metálica es de aproximadamente 32,08 kg de CO₂, inferior a las emisiones debidas a la fabricación de la tija original.

Capítulo 6. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

6.1 CONCLUSIONES

El desarrollo de este Trabajo Fin de Grado ha resultado exitoso, ya que se ha logrado reducir en un 54% la masa total de la tija inferior utilizada en la motocicleta del equipo ISC Racing Team sin comprometer la rigidez estructural de la misma, dado el estado de cargas seleccionado.

Se ha seguido una metodología iterativa de optimización topológica y validación por métodos de elementos finitos usando el software de Solid Edge 2025. El software ha permitido rediseñar la geometría de la tija para obtener un resultado final óptimo manteniendo un factor de seguridad de 3. También se ha aplicado una operación de suavizado en Altair Inspire para obtener una geometría con superficies lisas.

Además, se ha estudiado la viabilidad económica comparando los costes de fabricación del modelo inicial y del modelo optimizado aplicando dos plantillas de simulaciones de costes y ajustándolas a distintas técnicas de impresión 3D. También se ha obtenido un presupuesto externo adaptando las tecnologías de fabricación en función de las características de la geometría de la pieza. La diferencia de costes entre ambos modelos se justifica gracias a las ventajas de la reducción de masa en el sector automovilístico y al uso más responsable del material.

Por último, se llevó a cabo un estudio de sostenibilidad de la fabricación de ambas piezas teniendo en cuenta las emisiones debidas al consumo de energía y al material empleado.

Este trabajo justifica la implementación de las tecnologías de fabricación aditiva y optimización topológica en la industria como herramientas de prototipado y rediseño de componentes de uso final. También demuestra la capacidad de estas tecnologías para innovar

en la industria y liderar un crecimiento económico que favorece la sostenibilidad y el consumo responsable de recursos limitados.

6.2 TRABAJOS FUTUROS

Como trabajos futuros, se puede investigar la posibilidad de aplicar tecnologías de ingeniería inversa para trabajar con un modelo más fiel a la pieza original en lugar de trabajar con una simplificación de la geometría. Esta tecnología consta de tres fases esenciales para su desarrollo. Primero se escanea el modelo que se quiere estudiar con la ayuda de puntos de referencia pegados sobre la superficie. Posteriormente se procesa la malla creada por una nube de puntos y se finaliza con el modelado CAD para poder trabajar con la geometría inicial.

Por otro lado, este trabajo ofrece la oportunidad de ampliar el alcance del estudio para analizar la viabilidad técnico-económica de la optimización topológica de otros componentes de la motocicleta. Algunos componentes de interés son: el soporte de la batería de la moto, el basculante o la tija superior. También cabe la posibilidad de extender el alcance del estudio a otros sectores de la industria como la médica para la fabricación de prótesis más ligeras y personalizables.

Capítulo 7. BIBLIOGRAFÍA

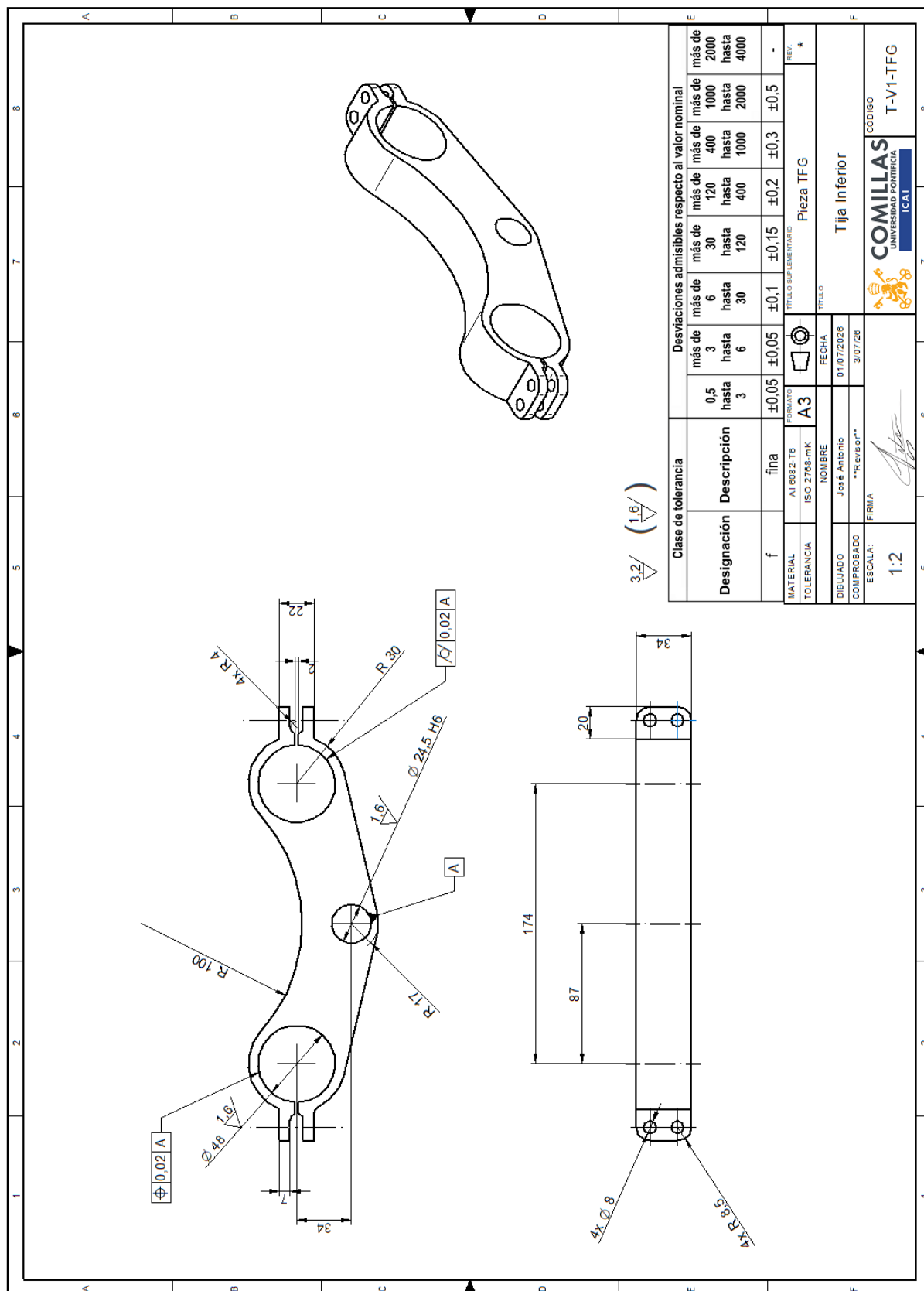
- Additive Manufacturing market 2024 – AMPower Report on Additive Manufacturing.* (s. f.). Recuperado 1 de julio de 2026, de <https://additive-manufacturing-report.com/additive-manufacturing-market-2024/>
- Alexandre Rodrigues da Silva Bicho Vicente, D. (2021). *Design and optimization of triple clamps for racing motorcycles.* (página 3).
- Aluminio reciclado y con bajas emisiones de carbono.* (s. f.). Recuperado 1 de julio de 2026, de <https://www.hydro.com/es/global/aluminium/products/aluminio-bajo-en-carbono-y-reciclado/>
- Balbás Calvo, A., del Mar Espinosa, M., & Domínguez Somonte, M. (s. f.). Últimos avances en la fabricación aditiva con materiales metálicos. 2019.
- Ballesteros, Á. M., & Calzado, M. J. (s. f.). *ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA DE ELEMENTOS PARA PRODUCTOS DE CONSUMO.*
- Bernal-Plaza, J., De-Jesús-Méndez, C., Vidal-Pérez, H., & Troncoso-Palacio, A. (2025a). Transformando la Manufactura Global. Ventajas y Retos de la Impresión 3D Frente a Métodos Tradicionales. *Boletín de Innovación, Logística y Operaciones*, 7(2), 23-35. <https://doi.org/10.17981/bilo.7.2.2025.03>
- Bernal-Plaza, J., De-Jesús-Méndez, C., Vidal-Pérez, H., & Troncoso-Palacio, A. (2025b). Transformando la Manufactura Global. Ventajas y Retos de la Impresión 3D Frente a Métodos Tradicionales. *Boletín de Innovación, Logística y Operaciones*, 7(2), 23-35. <https://doi.org/10.17981/bilo.7.2.2025.03>
- Bitfab—Servicio de impresión 3D online profesional.* (s. f.). Bitfab. Recuperado 27 de junio de 2026, de <https://bitfab.io/es/>
- Busachi, A., Erkoyuncu, J., Colegrove, P., Martina, F., Watts, C., & Drake, R. (2017). A review of Additive Manufacturing technology and Cost Estimation techniques for the defence sector. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 19, 117-128. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2017.07.001>
- Carnicero, A., Peláez, A., Restoy-Lozano, A., Jacquott, I., & Perera, R. (2021). Improvement of an additively manufactured subperiosteal implant structure design by finite elements based topological optimization. *Scientific Reports*, 11(1), 15390. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-94980-1>

- Chen, Y., Wang, Q., Wang, C., Gong, P., Shi, Y., Yu, Y., & Liu, Z. (2021). Topology Optimization Design and Experimental Research of a 3D-Printed Metal Aerospace Bracket Considering Fatigue Performance. *Applied Sciences*, 11(15), 6671. <https://doi.org/10.3390/app11156671>
- Clear Resin V4.1. (s. f.). Formlabs. Recuperado 27 de junio de 2026, de <https://formlabs.com/es/products/clear-resin-v4-1/>
- Empresa – BeOn Automotive. (s. f.). Recuperado 5 de abril de 2026, de <https://beonautomotive.es/empresa/>
- EOS AlSi10Mg fabricado con materia prima 100% reciclada. (s. f.). EOS GmbH. Recuperado 1 de julio de 2026, de <https://www.eos.info/es/prensa-medios/centro-de-prensa/comunicados-de-prensa/2025/eos-achieves-new-sustainability-standard-aluminium>
- Filament2Print | Tienda online de impresión 3D profesional. (s. f.). Filament2Print. Recuperado 27 de junio de 2026, de <https://filament2print.com/es/>
- formlabs. (s. f.). *Guía de materiales de impresión 3D: Tipos, aplicaciones y propiedades*. Formlabs. Recuperado 29 de junio de 2026, de <https://formlabs.com/es/blog/3d-printing-materials/>
- Gancedo, V. (2024, febrero 26). Tija de moto: Qué es, tipos y función. *Box Repsol*. <https://www.boxrepsol.com/es/cultura-motera/que-es-una-tija-moto/>
- García García, Ignacio, E. (2014). Comparación entre la Optimización Topológica y el Diseño Generativo por Inteligencia Artificial para Aplicaciones en Impresión 3D. *Ingeniería del agua*, 18(1), ix. <https://doi.org/10.4995/ia.2014.3293>
- Herrero, V. (2021, julio 8). *¿Qué es el ángulo de lanzamiento en una moto?* Motociclismo. https://www.motociclismo.es/consejos/mantenimiento/angulo-lanzamiento-moto-nzm_263079_102.html
- I.materialise. (s. f.). Recuperado 28 de junio de 2026, de <https://www.materialise.com/es/industrial/servicios-de-impresion-3d/impresion-3d-en-linea>
- impresoras3d.com. (2018, enero 26). Bugatti Chiron prueba una pinza de freno de titanio impreso en 3D. *impresoras3d.com*. <https://www.impresoras3d.com/bugatti-chiron-prueba-una-pinza-freno-titanio-impreso-3d/>
- Korta, P. J. M. (s. f.). *Único proveedor integral para la fabricación aditiva de metal*.
- La impresión 3D en FDM – Academia. (s. f.). Recuperado 3 de julio de 2026, de <https://academia.hellbot.xyz/lecciones/la-impresion-3d-en-fdm/>

- Marcos, A. (2024, junio 23). *Building an Electric Racing Motorbike from Scratch*. Adrián Marcos. <https://blog.ms02.es/posts/building-an-electric-racing-motorbike-from-scratch/>
- Martin Ahedo, J. (2025). *Diseño y fabricación de la tijas de motocicleta para la competición MotoStudent*. <https://repositorio.unican.es/xmlui/handle/10902/36536>
- Mesicek, J., Pagac, M., Petru, J., Novak, P., Hajnys, J., & Kutiova, K. (2019). TOPOLOGICAL OPTIMIZATION OF THE FORMULA STUDENT BELL CRANK. *MM Science Journal*, 2019(03), 2964-2968. https://doi.org/10.17973/MMSJ.2019_10_201893
- Meza, C. A., Tamayo, F., & Franco, E. E. (2014). *Optimización topológica aplicada al diseño de componentes estructurales mecánicos de peso reducido*. (44).
- Moran, M. (s. f.-a). Consumo y producción sostenibles. *Desarrollo Sostenible*. Recuperado 27 de enero de 2026, de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/sustainable-consumption-production/>
- Moran, M. (s. f.-b). Crecimiento económico. *Desarrollo Sostenible*. Recuperado 27 de enero de 2026, de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/economic-growth/>
- motoiservices. (2025, septiembre 2). Pares de apriete moto: Tabla completa y guía práctica. *Motocourses by Motorcycle Integral Services*. <https://motoiservices.com/pares-de-apriete-genericos/>
- MotoStudent. (2026, abril 20). *MS2627 MotoStudent Regulations V1.0*. https://www.motostudent.com/pluginfile.php/292558/mod_resource/content/1/MS2627_MotoStudent%20Regulations%20V1.0.pdf
- MS2425_MotoStudent Regulations_Motorland Aragón.pdf*. (s. f.). Recuperado 25 de mayo de 2026, de https://www.motorlandaragon.com/sites/default/files/2025-10/MS2425_MotoStudent%20Regulations_Motorland%20Arag%C3%B3n.pdf
- Nuevos factores de emisión 2024: Lo que necesitas saber para calcular tu huella con rigor*. (s. f.). ECODES - Tiempo de actuar. Recuperado 1 de julio de 2026, de <https://ecodes.org/hacemos/cambio-climatico/mitigacion/ceroco2/nuevos-factores-de-emision-2024-lo-que-necesitas-saber-para-calcular-tu-huella-con-rigor>
- Nylon 11 Powder*. (s. f.). Formlabs. Recuperado 27 de junio de 2026, de <https://formlabs.com/es/products/nylon-11-powder/>
- Prathyusha, A. L. R., & Raghu Babu, G. (2022). A review on additive manufacturing and topology optimization process for weight reduction studies in various industrial applications. *Materials Today: Proceedings, International Conference on Advances*

- in Materials and Mechanical Engineering*, 62, 109-117.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.604>
- Prismacim. (2019, septiembre 23). *Normas básicas de diseño para impresión 3D*.
<https://prismacim.com/normas-basicas-de-diseno-para-impresion-3d/>
- Shi, G., Guan, C., Quan, D., Wu, D., Tang, L., & Gao, T. (2020). An aerospace bracket designed by thermo-elastic topology optimization and manufactured by additive manufacturing. *Chinese Journal of Aeronautics*, 33(4), 1252-1259.
<https://doi.org/10.1016/j.cja.2019.09.006>
- TIPOS DE RESINAS EN IMPRESIÓN 3D SLA. (s. f.). FABRIKIT3D. Recuperado 29 de junio de 2026, de <https://fabrik3d.com/blogs/noticias/tipos-resinas-impresion-3d-sla>
- Tomlin, M., & Meyer, J. (s. f.). *Topology Optimization of an Additive Layer Manufactured (ALM) Aerospace Part*.
- Vicente Oliva, S. (2018). La impresión 3D como tecnología de uso general en el futuro. *Economía industrial*, 123-135.
- Xometry. (s. f.). Xometry Europe. Recuperado 28 de junio de 2026, de <https://xometry.eu/es/>
- Zeleny, P., & Cadek, M. (2015). TOPOLOGY OPTIMIZATION OF A BICYCLE PART. *MM Science Journal*, 2015(03), 696-700.
https://doi.org/10.17973/MMSJ.2015_10_201538

ANEXO I: PLANO DE LA TIJA



ANEXO II: TEST DE FRENADA



VII MotoStudent International Competition
Official Standings



Round 2 – Brake test (Amended)

POSITION	Bike number	Team name	Brake distance (m)	Speed (km/h)	Penalty (m)	Corrected distance (m)
1	97	UBU Racing	27,4	81,245	0	27,4
2	72	QUARTODILITRO UNIPD	27,9	81,337	0	27,9
3	71	LEM Wroclaw	32,6	81,008	0	32,6
4	80	Polimi Motorcycle Factory	29,6	79,593	4	33,6
5	28	REM IHU	29,9	79,558	4	33,9
6	88	Unibo Motorsport	28,6	78,141	6	34,6
7	32	UPM MOTOSTUDENT ELECTRIC	30,9	79,435	4	34,9
8	54	2WheelsPOLITO	35,3	80,321	0	35,3
9	12	EMUS	24,2	75,965	12	36,2
10	5	UMA Racing Team	36,3	81,577	0	36,3
11	65	Impulse Unimore	30,8	78,277	6	36,8
12	22	eGIPUZKOA GIE-UPV/EHU	37,1	83,198	0	37,1
13	17	eLaketric UAS Constance	37,6	83,74	0	37,6
14	96	CTU Lions Electric	28,3	76,742	10	38,3
15	33	UPC VILANOVA E3 TEAM	28,2	75,203	12	40,2
16	6	UCO ELECTRIC RACING	22,7	70,977	20	42,7
17	4	E-Moto AGH	23,4	70,713	20	43,4
18	7	ISC Racing Team UPC	34,1	76,923	10	44,1
19	31	UIJ Electric Racing Team	28,1	74,272	20	48,1
20	9	MS Unizar Electric	48,2	97,087	0	48,2
21	16	Bizkaia ESI Bilbao	28,9	74,196	20	48,9
22	76	COMETS	31	72,8	20	51
NULL	8	MotoSpirit ESEIAAT - UPC	7,3	29,225	NULL	NULL
NULL	11	Wolfast UniOvi	24	62,893	NULL	NULL
NULL	34	USRacing	24,2	63,795	NULL	NULL
NULL	14	UPV EPSA Moto-E	19,7	49,648	NULL	NULL
NP	99	MotoUPCT			0	NP
NP	10	EEBE ePowered RACING			0	NP
NP	53	eRacing ETSEIB			0	NP
NP	18	MST Milner Motorcycle			0	NP
NP	69	SKAP WUT Racing			0	NP
NP	24	MOTOMANIPAL			0	NP
NP	73	UPV/EHU Araba MotorSport			0	NP
NP	25	URVoltage Racing (URV)			0	NP
NP	87	ETSIIT UPNa Racing			0	NP
NP	44	TLMoto			0	NP
NP	70	Tadarida MotoRacing UFU			0	NP
NP	77	Kenji Racing Team			0	NP
NP	93	MotoETSIUHU Electric			0	NP
NP	26	UPPström Racing			0	NP
NP	15	EPS-Jaen eRacing			0	NP
NP	94	R-8 ISLAND ULL			0	NP
NP	29	MOTO SPARK UNAM			0	NP

Date of publication: Saturday, 14 October 2023

Time of publication: 2:45:17 PM


Comitee President


Comitee Secretary



VII MotoStudent International Competition

Official Standings



Final results – Gymkhana

POSITION	Bike number	Team name	Final Time	Score
1	88	UniBo Motorsport	00:31,365	60
2	5	UMA Racing Team	00:31,592	55
3	71	LEM Wrocław	00:31,634	52
4	32	UPM MOTOSTUDENT ELECTRIC	00:33,621	50
5	6	UCO ELECTRIC RACING	00:34,366	48
6	80	Polimi Motorcycle Factory	00:35,862	46
7	9	MS Unizar Electric	00:35,918	44
8	17	eLaketric UAS Constance	00:37,278	42
9	96	CTU Lions Electric	00:37,602	40
10	28	REM IHU	00:37,936	39
11	31	UJI Electric Racing Team	00:38,316	38
12	22	eGIPIZKOA GIE-UPV/EHU	00:38,686	37
13	12	EMUS	00:38,740	36
14	65	Impulse Unimore	00:38,810	35
15	10	EEBE ePowered RACING	00:39,991	34
16	33	UPC VILANOVA E3 TEAM	00:41,456	33
17	97	UBU Racing	00:42,452	32
18	16	Bizkaia ESI Bilbao	00:43,019	31
19	4	E-Moto AGH	00:43,702	30
20	54	2WheelsPolito	00:45,059	29
21	76	COMETS	00:45,233	28
22	72	QUARTODILITRO UNIPD	00:46,895	27
23	8	MotoSpirit ESEIAAT - UPC	00:47,591	26
24	7	ISC Racing Team UPC	00:48,793	25
25	11	Wolfast UniOvi	00:55,849	24
26	14	UPV EPSA Moto-E	01:12,553	23
NULL	34	USRacing	NULL	NULL
NP	99	MotoUPCT	NP	NP
NP	53	eRacing ETSEIB	NP	NP
NP	18	MST Miner Motorcycle	NP	NP
NP	69	SKAP WUT Racing	NP	NP
NP	24	MOTOMANIPAL	NP	NP
NP	73	UPV/EHU Araba MotorSport	NP	NP
NP	25	URVoltage Racing (URV)	NP	NP
NP	87	ETSIIT UPNa Racing	NP	NP
NP	44	TLMoto	NP	NP
NP	70	Tadarida MotoRacing UFU	NP	NP
NP	77	Kenji Racing Team	NP	NP
NP	93	MotoETSIUHU Electric	NP	NP
NP	26	UPPström Racing	NP	NP
NP	15	EPS-Jaen eRacing	NP	NP
NP	94	R-8 ISLAND ULL	NP	NP
NP	29	MOTO SPARK UNAM	NP	NP

Date of publication: Saturday, 14 October 2023

Time of publication: 5:15:54 PM

Comitee President

Comitee Secretary



VII MotoStudent International Competition

Official Standings



Final results – Acceleration tests

POSITION	Bike number	Team name	Final Time (mm:ss,sss)	Score
1	32	UPM MOTOSTUDENT ELECTRIC	00:05,924	80
2	88	UniBo Motorsport	00:06,047	75
3	80	Polimi Motorcycle Factory	00:06,317	70
4	65	Impulse Unimore	00:06,371	65
5	5	UMA Racing Team	00:06,395	61
6	71	LEM Wrocław	00:06,426	57
7	97	UBU Racing	00:06,881	53
8	54	2WheelsPOLITO	00:06,932	50
9	72	QUARTODILITRO UNIPD	00:07,059	47
10	96	CTU Lions Electric	00:07,080	44
11	22	eGIPUZKOA GIE-UPV/EHU	00:07,082	42
12	10	EEBE ePowered RACING	00:07,354	40
13	31	UII Electric Racing Team	00:07,512	38
14	16	Bizkaia ESI Bilbao	00:07,830	37
15	28	REM IHU	00:07,994	36
16	9	MS Unizar Electric	00:08,000	35
17	17	eLaketric UAS Constance	00:08,268	34
18	12	EMUS	00:08,570	33
19	6	UCO ELECTRIC RACING	00:09,619	32
20	33	UPC VILANOVA E3 TEAM	00:09,798	31
21	34	USRacing	00:10,017	30
22	7	ISC Racing Team UPC	00:10,846	29
23	4	E-Moto AGH	00:12,413	28
24	11	Wolfast UniOvi	00:12,714	27
25	76	COMETS	00:13,525	26
26	8	MotoSpirit ESEIAAT - UPC	00:15,927	25
27	14	UPV EPSA Moto-E	00:20,575	24
NP	99	MotoUPCT	NP	NP
NP	53	eRacing ETSEIB	NP	NP
NP	18	MST Miner Motorcycle	NP	NP
NP	69	SKAP WUT Racing	NP	NP
NP	24	MOTOMANIPAL	NP	NP
NP	73	UPV/EHU Araba MotorSport	NP	NP
NP	25	URVoltage Racing (URV)	NP	NP
NP	87	ETSIT UPNa Racing	NP	NP
NP	44	TLMoto	NP	NP
NP	70	Tadarida MotoRacing UFU	NP	NP
NP	77	Kenji Racing Team	NP	NP
NP	93	MotoETSIUHU Electric	NP	NP
NP	26	UPPström Racing	NP	NP
NP	15	EPS-Jaen eRacing	NP	NP
NP	94	R-8 ISLAND ULL	NP	NP
NP	29	MOTO SPARK UNAM	NP	NP

Date of publication: Saturday, 14 October 2023

Time of publication: 5:15:29 PM


Comité President


Comité Secretary

ANEXO III: CÓDIGO DE MATLAB

Datos de la moto

syms FrD Vd Rx Ry Rsx Rsy Rix Riy

g=9.81

alpha = 4.12 % ángulo de la pendiente; 0 en el caso de frenada en plano / 4.12 en el caso de pendiente máxima

gamma= 23 % ángulo de lanzamiento

betta= gamma - alpha

mt= 80 + 130 % 80 kg del piloto y 130 kg de la moto

mr=3.5 % masa de la rueda

mh=4 % masa de la horquilla de suspensión

Vt=0

Datos de aceleración

aceleracion=(0-21.3675^2)/2/34.1

a=abs(aceleracion);

Ecuaciones de las fuerzas externas aplicadas sobre la moto

Fh = -FrD + mt*g*sind(alpha)==-mt*a;

Fv = Vt + Vd - mt*g*cosd(alpha)==0;

FrD = vpa(solve(Fh,FrD))

Vd = vpa(solve(Fv,Vd))

Ecuaciones internas en la rueda delantera de la moto

```

Fx = Rx - FrD*cosd(alpha) + Vd*sind(alpha) == -mr*a*cosd(alpha);

Fv = Ry - mr*g + FrD*sind(alpha) + Vd*cosd(alpha) == mr*a*sind(alpha);

Rx = vpa(solve(Fx, Rx))

Ry = vpa(solve(Fv, Ry))

Ecuaciones internas en la horquilla de la moto

FV3 = 2*Riy - mh*g*cosd(betta) - Ry*cosd(betta) + Rx*sind(betta) ==
mh*a*sind(gamma);

FH3 = Rsx + Rix - mh*g*sind(betta) - Ry*sind(betta) - Rx*cosd(betta) == -
mh*a*cosd(gamma);

MI = -Rsx*160 - mh*g*sind(betta)*155.5 - Rx*cosd(betta)*480.5 - Ry*sind(betta) ==
0;

Riy = vpa(solve(FV3, Riy))

Rsx = vpa(solve(MI, Rsx))

Rix= -mh*a*cosd(gamma)- (Rsx - mh*g*sind(betta) - Ry*sind(betta) - Rx*cosd(betta))

Rsy = Riy

Tija inferior por la izquierda

syms Qi Ni MFi

Qi= -Rsx

Ni= Rsy

MFi= Rsx*0.16

Tija inferior por la derecha

syms Qd Nd MFd

Qd= -Rsx - Rix

```

```
Nd= Rsy + Riy
```

```
MFd= Rsx*0.16
```

ANEXO IV: FICHA TÉCNICA A1 MINI

2/7/26, 17:44

A1 mini de Bambu Lab - Especificaciones técnicas | Bambu Lab

[Tienda](#)

Especificaciones técnicas A1 mini

Cuerpo

Volumen de construcción:	180mm*180mm*180mm
Chasis:	Acero + aluminio extruido

Cabezal de la herramienta

Extremo caliente:	Totalmente metálico
Engranajes del extrusor:	Acero endurecido
Boquilla:	Acero inoxidable
Temperatura máxima del extremo caliente:	300 °C
Diámetro de la boquilla (incluida):	0.4 mm
Diámetro de la boquilla (opcional):	0.2 mm, 0.6 mm, 0.8 mm
Cortador de filamento:	Sí
Diámetro del filamento:	1.75 mm

Cama caliente

Placa de construcción compatible:	Placa PEI texturizada de Bambu Placa PEI lisa Bambu Placa PEI de doble textura de Bambu
Temperatura máxima de la placa de construcción:	80 °C

Velocidad

Velocidad máxima del cabezal de la herramienta:	500 mm/s
Aceleración máxima del cabezal de la herramienta:	10,000 mm/s²
Flujo máximo del extremo caliente:	28 mm³/s en ABS (modelo: pared simple de 150 x 150 mm) Material: ABS de Bambu; temperatura: 280 °C



Enfriamiento

Ventilador de enfriamiento de piezas:	Control de lazo cerrado
---------------------------------------	-------------------------

<https://bambulab.com/es/a1-mini/tech-specs>

1/4

2/7/26, 17:44

A1 mini de Bambu Lab - Especificaciones técnicas | Bambu Lab



Filamentos compatibles

PLA, PETG, TPU, PVA:	Ideal
ABS, ASA, PC, PA, PET, polímero reforzado con fibra de carbono/vidrio:	No se recomienda

Sensores

Cámara de vigilancia:	Cámara de tasa baja (hasta 1080P) compatible con lapso de tiempo
Sensor de fin del filamento:	Sí
Odometría del filamento:	Sí
Recuperación tras falla eléctrica:	Sí
Sensor de enredos de filamentos:	Sí

Dimensiones físicas

Dimensiones:	347mm*315mm*365mm
Peso neto:	5.5 kg

Requisitos eléctricos

Voltaje de entrada:	100-240 V CA, 50/60 Hz
Potencia máxima:	150 W

Electrónica

Pantalla:	Pantalla táctil IPS de 2.4 pulgadas, 320 x 240
Conectividad:	Wifi, Bambu-Bus
Almacenamiento:	Tarjeta Micro SD
Interfaz de control:	Pantalla táctil, aplicación, aplicación para PC
Controlador de movimiento:	Procesador Cortex M4 de doble núcleo

Software



Software de corte:	Bambu Studio es compatible con softwares de corte de terceros que exportan Gcode estándar, como
--------------------	---

ANEXO V: FICHA TÉCNICA FORMS 3L

3/7/26, 15:42

Formlabs - 3D Printer - Form 3L

Formlabs Form 3L

Large Format Desktop SLA 3D Printer

Specification	Value
Build Volume	335 × 200 × 300 mm (13.2 × 7.9 × 11.8 in)
Volume	20.1 L
Technology	Low Force Stereolithography (LFS™)
XY Resolution	25 microns
Layer Thickness	25 - 300 microns
Laser Spot Size	85 microns
Laser Power	Two 250 mW lasers
Print Speed	16-50 mm/hour (depending on material)
Compatible Materials	All Formlabs Resins (Standard, Tough, Flexible, Castable, Biocompatible, etc.)
Dimensional Accuracy	±0.15% (lower limit: ±0.02 mm)
External Dimensions	770 × 520 × 740 mm (30.3 × 20.5 × 29.1 in)
Weight	54.4 kg (120 lbs)
Power Consumption	650W
Voltage	100-240 VAC, 8.5A MAX, 50/60Hz
Software	PreForm (Free Formlabs Software)

<https://indicatechnologies.com/products/form-3l>

3/5

3/7/26, 15:42

Formlabs - 3D Printer - Form 3L

File Formats	STL, OBJ, PLY, 3MF
Connectivity	Wi-Fi (2.4/5 GHz), Ethernet (1000 Mbit), USB
Control Interface	5.5" Touchscreen Display
Light Processing Units	2 LPUs
Resin System	Automated Resin Fill & Level Detection
Print Monitoring	Built-in Sensors & Notifications
Build Platform	Quick-release, flexible build platform
Resin Tank	LT Tank v3 with FEP film
Cloud Integration	Dashboard monitoring & fleet management
Supported OS	Windows 10+, macOS 10.13+
Post-Processing	Form Wash L & Form Cure L compatible

Professional large-format SLA 3D printing with industrial precision

Newsletter

Stay ahead in the world of advanced manufacturing—subscribe to get the latest innovations, insights, and industry trends delivered straight to your inbox. Join a community of forward-thinking engineers and manufacturers shaping the future today.

[Sign Up Here](#)

BROWSE

[3D Printers](#)

COMPANY

[About Us](#)

ANEXO VI: FICHA TÉCNICA EOS M 290

EOS M 290

TECHNICAL DATA

Build Volume	250 x 250 x 325 mm (9.8 x 9.8 x 12.8 in)
Laser Type	Yb-fiber laser; 1 x 400 W
Precision Optics	1 F-theta-lens(es); 1 High-speed scanner(s)
Scan Speed	up to 7.0 m/s (23.0 ft/s)
Focus Diameter	approx. 100 µm (0.00394 in)
Power Supply	1 x 32 A
Power Consumption	max. 8.5 kW / typical 2.4 kW
Compressed Air Supply	7 Bar; 20 m³/h (102 psi; 706 ft³/h)

* Including build platform and application dependent.

ANEXO VII: ALUMINIO 6082-T6



Aluminum, 6082, T6

Página 1 de 8

General information

Designation

Aluminum, 6082, T6, wrought

Condition	T6 (Solution heat-treated and artificially aged)
UNS number	A96082
EN name	EN AW-6082 (EN AW-Al Si1MgMn)
EN number	3.2315

Tradenames

Alcan; Alcoa; Anticorodal; Impalco

Typical uses

General purpose high duty applications, structural frames, pylons, towers, bridges, electric scooters, robotics, mobile/cell phones, smart phones, laptops, tablets, computers, smart watches, fitness trackers, VR headsets, gaming consoles, electric cars, hybrid cars

Included in Materials Data for Simulation	✓
Materials Data for Simulation name	Aluminum alloy, wrought, 6082, T6

Composition overview

Compositional summary

Al95-98 / Si0.7-1.3 / Mg0.6-1.2 / Mn0.4-1 (impurities: Fe<0.5, Cr<0.25, Zn<0.2, Cu<0.1, Ti<0.1, Other<0.15)

Material family	Metal (non-ferrous)
Base material	Al (Aluminum)

Composition detail (metals, ceramics and glasses)

Al (aluminum)	95,2	-	98,3	%
Cr (chromium)	0	-	0,25	%
Cu (copper)	0	-	0,1	%
Fe (iron)	0	-	0,5	%
Mg (magnesium)	0,6	-	1,2	%
Mn (manganese)	0,4	-	1	%
Si (silicon)	0,7	-	1,3	%
Ti (titanium)	0	-	0,1	%
Zn (zinc)	0	-	0,2	%
Other	0	-	0,15	%

Price

Price

Los valores marcados con * son aproximaciones
ANSYS, Inc. provides no warranty for this data.



Aluminum, 6082, T6

Página 2 de 8

GRANTA EDUPACK

	* 2,6	-	3,68	EUR/kg
Price per unit volume	* 6,94e3	-	1e4	EUR/m ³

Physical properties

Density	2,67e3	-	2,73e3	kg/m ³
---------	--------	---	--------	-------------------

Mechanical properties

Young's modulus	70	-	74	GPa
Specific stiffness	25,9	-	27,5	MN.m/kg
Yield strength (elastic limit)	240	-	280	MPa
Tensile strength	295	-	344	MPa
Specific strength	88,8	-	104	kN.m/kg
Elongation	8	-	11,5	% strain
Tangent modulus	864			MPa
Compressive strength	* 240	-	280	MPa
Flexural modulus	* 70	-	74	GPa
Flexural strength (modulus of rupture)	* 240	-	280	MPa
Shear modulus	25,3	-	26,6	GPa
Shear strength	194	-	227	MPa
Bulk modulus	* 70	-	74	GPa
Poisson's ratio	0,325	-	0,335	
Shape factor	25,8			
Hardness - Vickers	95	-	105	HV
Hardness - Brinell	91	-	100	HB
Elastic stored energy (springs)	402	-	543	kJ/m ³
Fatigue strength at 10 ⁷ cycles	* 106	-	124	MPa
Fatigue strength model (stress amplitude)	* 97,1	-	135	MPa

[Parámetros:](#) Stress Ratio = -1, Number of Cycles = 1e7cycles

Los valores marcados con * son aproximaciones
ANSYS, Inc. provides no warranty for this data.

ANEXO VIII: ALSi10MG

6/29/26, 7:24 PM

EOS Aluminum AlSi10Mg DMSL on EOS M 290; 60µm Layer Thickness

EOS Aluminum AlSi10Mg DMSL on EOS M 290; 60µm Layer Thickness

Categories: [Metal](#); [3D Printing/Additive Manufacturing](#); [Metal](#); [Nonferrous Metal](#); [Aluminum Alloy](#)

Material Main Characteristics:

Notes:

- Good buildability
- Good mechanical properties
- High productivity
- Heat treatment possible to improve ductility

Typical Applications: Higher productivity process can be used where mechanical requirements are less demanding but where cost-efficiency is needed. Heat treatment can be used to affect mechanical properties.

Heat Treatment: Solution annealing of 30 minutes in 530 °C followed by immediate quenching to water. Artificial aging of 6 hours in 165 °C followed by cooling in air.

Information provided by EOS GmbH (Electro Optical Systems).

Vendors: No vendors are listed for this material. Please [click here](#) if you are a supplier and would like information on how to add your listing to this material.

Physical Properties	Metric	English	Comments
Porosity	0.20 %	0.20 %	
Thickness	60.0 microns	2.36 mil	

Mechanical Properties	Metric	English	Comments
Tensile Strength	320 MPa	46400 psi	heat treated
	440 MPa	63800 psi	as manufactured
Tensile Strength, Yield	235 MPa	34100 psi	as manufactured
	250 MPa	36300 psi	heat treated
Elongation at Break	4.0 %	4.0 %	as manufactured
	7.0 %	7.0 %	heat treated
@Treatment Temp. 530 °C, @Treatment Temp. 986 °F, Time 1800 sec Time 0.500 hour			

Component Elements Properties	Metric	English	Comments
Aluminum, Al	87.1 - 90.75 %	87.1 - 90.75 %	Balance
Copper, Cu	<= 0.050 %	<= 0.050 %	
Iron, Fe	<= 0.55 %	<= 0.55 %	
Lead, Pb	<= 0.050 %	<= 0.050 %	
Magnesium, Mg	0.25 - 0.45 %	0.25 - 0.45 %	
Manganese, Mn	<= 0.45 %	<= 0.45 %	
Nickel, Ni	<= 0.050 %	<= 0.050 %	
Silicon, Si	9.0 - 11 %	9.0 - 11 %	
Tin, Sn	<= 0.050 %	<= 0.050 %	
Titanium, Ti	<= 0.15 %	<= 0.15 %	
Zinc, Zn	<= 0.10 %	<= 0.10 %	

Descriptive Properties		
Surface roughness	10 µm	Ra, Vertical
Volume rate	10.5 mm3/s	

Some of the values displayed above may have been converted from their original units and/or rounded in order to display the information in a consistent format. Users requiring more precise data for scientific or engineering calculations can click on the property value to see the original value as well as raw conversions to equivalent units. We advise that you only use the original value or one of its raw conversions in your calculations to minimize rounding error. We also ask that you refer to MatWeb's [terms of use](#) regarding this information. [Click here](#) to view all the property values for this datasheet as they were originally entered into MatWeb.