



ICAI	ICADE	CIHS
------	-------	------

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO DE FIN DE GRADO

Análisis, diseño generativo y fabricación de componentes de uso final
mediante impresión 3D para el coche del Formula Student.

Autor: Cristina Lobato Vallejo

Director: Mariano Jiménez Calzado

Co-Director: Rodrigo Álvarez Hernández

Madrid

Curso 2024-2025

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
“ANÁLISIS, DISEÑO GENERATIVO Y FABRICACIÓN DE COMPONENTES DE USO
FINAL MEDIANTE IMPRESIÓN 3D PARA EL COCHE DEL FORMULA STUDENT”

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico 2024/25 es de mi autoría, original e inédito y
no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos.

El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido
tomada de otros documentos está debidamente referenciada.



Fdo.: Cristina Lobato Vallejo

Fecha: 22 / 07 /2025

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO



Fdo.: Mariano Jiménez Calzado

Fecha: 22 / 07 /2025

EL CODIRECTOR DEL PROYECTO



Fdo.: Rodrigo Álvarez Hernández

Fecha: 22 / 07 /2025



GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO DE FIN DE GRADO

Análisis, diseño generativo y fabricación de componentes de uso final
mediante impresión 3D para el coche del Formula Student.

Autor: Cristina Lobato Vallejo

Director: Mariano Jiménez Calzado

Co-Director: Rodrigo Álvarez Hernández

Madrid

Curso 2024-2025

ANÁLISIS, DISEÑO GENERATIVO Y FABRICACIÓN DE COMPONENTES DE USO FINAL MEDIANTE IMPRESIÓN 3D PARA EL COCHE DEL FORMULA STUDENT.

Autor: Lobato Vallejo, Cristina.

Director: Jimenez Calzado, Mariano.

Coordinador: Norverto Moriñigo, Juan.

Entidad Colaboradora: ICAI- Universidad Pontificia de Comillas.

RESUMEN DEL PROYECTO

Este Trabajo Fin de Grado tiene como objetivo el análisis, rediseño y fabricación de componentes de uso final para el monoplaza de la competición universitaria Fórmula Student, centrándose específicamente en el rocker o balancín trasero del sistema de suspensión.

El proceso a seguir se concentra en un sistema iterativo a través de softwares de diseño asistidos por ordenador a través de los cuales se simulan los prototipos previamente diseñados mediante optimización topológica y se comprueba si cumple con los requisitos que demanda la competición. Posteriormente se imprime el prototipo final mediante fabricación aditiva y se calculan los costes para valorar la viabilidad económica del proyecto.

Para concluir, este proyecto demuestra que los nuevos métodos de diseño y fabricación suponen grandes avances tecnológicos en campos de la ingeniería tales como el sector automovilístico.

Palabras clave: Rocker, optimización topológica, fabricación aditiva, prototipo.

Introducción

En esta competición universitaria de ingeniería a nivel mundial, se persigue el diseño óptimo de un vehículo de alto rendimiento que cumpla con estrictos criterios de seguridad, eficiencia y coste. Para ello, es conveniente optimizar cada una de sus componentes de uso final. Para ello, se emplean herramientas como la optimización topológica y la fabricación aditiva de cualquier componente del monoplaça, ya que ayudan a obtener mejores resultados durante la competición ya sea por su ahorro de material y coste o bien por la eficiencia que aporta al vehículo.

El rocker trasero es un elemento clave en la dinámica y en la suspensión del vehículo, al transmitir las cargas desde las ruedas hacia los amortiguadores, lo que incide directamente en la estabilidad y comportamiento en curva.

Definición del proyecto

El proyecto combina tecnologías innovadoras tales como el diseño generativo (optimización topológica) y la fabricación aditiva (impresión 3D) para desarrollar una pieza optimizada tanto estructural como geométricamente.

Para lograr el objetivo, se ha seguido una metodología iterativa que comienza con el modelado CAD en Solid Edge, pasando por simulaciones por elementos finitos (FEA) para evaluar tensiones de Von Mises (MPa) y desplazamientos (mm), con estudios de optimización topológica, también en Solid Edge y terminando con su refinamiento en Altair Inspire para suavizar la impresión final.

La pieza resultante se fabrica mediante impresión 3D, permitiendo validar su comportamiento y viabilidad como componente final del monoplaça. Finalmente, si la pieza cumple los requisitos de peso, dimensiones y propiedades mecánicas se habrá obtenido un modelo óptimo para el rocker trasero.

Tras realizar la fabricación, se debe realizar un análisis técnico-económico que comparará los costes a la hora de fabricar en el laboratorio frente a empresas externas especializadas en impresión 3D.

Para terminar, además de la parte técnica, el trabajo se alinea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), promoviendo prácticas de producción y fabricación responsables y fomentando la innovación en la industria del automóvil de manera responsable.

Este TFG no solo contribuye al avance y mejora del equipo de competición de la universidad, sino que también demuestra el potencial de las nuevas metodologías para transformar el diseño y la fabricación de componentes en el ámbito de la ingeniería mecánica.

Resultados

Como resultado del proyecto se ha obtenido un rocker final cuyo peso es de 97 gramos, optimizado en un 70% del diseño inicial, cuya masa es 310 gramos. Por otro lado, se ha reducido en un 40% respecto del actual, cuya masa es de 154,7 gramos.

Estos resultados han sido simulados en el material indicado, aluminio 7075 T6. Sin embargo, se han fabricado los prototipos mediante impresión 3D en PLA para reducir costes.



Ilustración 1: Rocker actual, inicial y final impreso en 3D

Conclusiones

Este proyecto demuestra cómo la combinación de diseño generativo y fabricación aditiva permite facilitar la producción de la industria automovilística y desarrollar un componente estructural del sistema de suspensión del monoplaza de Fórmula Student que cumple con los requisitos de resistencia, peso y geometría.

A través de un proceso iterativo de simulación, optimización y fabricación, se ha validado tanto su comportamiento mecánico como su viabilidad económica, destacando el potencial de la impresión 3D en el laboratorio para entornos de ingeniería avanzada y competición.

ANALISYS, GENERATIVE DESIGN AND MANUFACTURING OF FINAL USE COMPONENTS TROUGH 3D PRINTING FOR THE FORMULA STUDENT CAR.

Author: Lobato Vallejo, Cristina.

Supervisor: Jimenez Calzado, Mariano.

Coordinator: Norverto Moriñigo, Juan.

Collaboring entity: ICAI- Universidad Pontificia de Comillas.

ABSTRACT

This Final Degree Project aims to analyze, redesign, and manufacture final-use components for the single-seater vehicle of the Formula Student university competition, focusing specifically on the rear rocker of the suspension system.

The process follows an iterative workflow using computer-aided design (CAD) software, through which the prototypes are developed using topological optimization and subsequently simulated to verify that they meet the competition's technical requirements. Once the optimal design is obtained, the final prototype is manufactured using additive manufacturing, and production costs are calculated to assess the economic viability of the project.

In conclusion, this project demonstrates that new methods of design and manufacturing represent significant technological advances in engineering fields such as the automotive sector.

Keywords: Rocker, topological optimization, additive manufacturing, prototype.

Introduction

This international university engineering competition aims to design a high-performance vehicle that complies with strict safety, efficiency, and cost criteria. The application of topological optimization and additive manufacturing to any component of the single-seater contributes to better competition results, either through material and cost savings or by improving vehicle performance.

The rear rocker is a key element in the dynamics and suspension of the car, as it transmits loads from the wheels to the shock absorbers, which directly affects the vehicle's stability and cornering behavior.

Project definition

This project combines innovative technologies such as generative design (topological optimization) and additive manufacturing (3D printing) to develop a component that is optimized both structurally and geometrically.

To achieve this goal, an iterative methodology has been followed, beginning with CAD modeling in Solid Edge, followed by finite element analysis (FEA) to evaluate Von Mises stresses (MPa) and displacements (mm). Topological optimization studies were first carried out in Solid Edge and later refined in Altair Inspire to smooth the final geometry for improved printability.

The final component is manufactured using 3D printing, which allows for the validation of its mechanical behavior and viability as a functional part of the Formula Student car. If the resulting piece meets the defined requirements in terms of weight, dimensions, and mechanical properties, it will be considered an optimal model for the rear rocker.

After manufacturing, a technical and economic analysis is carried out, comparing production costs between in-house fabrication in the university lab and outsourcing to external companies specialized in additive manufacturing.

Lastly, beyond the technical scope, this project aligns with the Sustainable Development Goals (SDGs) by promoting responsible production and manufacturing practices and encouraging innovation in the automotive industry within a sustainable context.

This Final Degree Project not only contributes to the advancement and improvement of the university's competition team but also demonstrates the potential of new methodologies to transform the design and production of components in the field of mechanical engineering.

Results

As a result of the project, a final rocker has been obtained with a weight of 97 grams, optimized by 70% compared to the initial design, which weighed 310 grams. Additionally, it represents a 40% reduction compared to the current version in use, which weighs 154.7 grams.

These results were simulated using the selected material, 7075-T6 aluminum. However, the prototypes were manufactured using PLA 3D printing to reduce production costs.



illustration 1: actual, initial and final rocker manufactured by 3D printing

Conclusion

This project demonstrates how the combination of generative design and additive manufacturing facilitates production in the automotive industry and enables the development of a structural suspension component for the Formula Student car that meets the required standards of strength, weight, and geometry.

Through an iterative process of simulation, optimization, and manufacturing, both its mechanical performance and economic feasibility have been validated, highlighting the potential of 3D printing in laboratory settings for use in advanced engineering and competitive environments.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN DEL PROYECTO.....	I
ABSTRACT.....	V
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 MOTIVACIÓN.....	2
1.2 OBJETIVOS.....	3
1.3 ALINEACIÓN CON LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE	4
CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE	6
2.1 FÓRMULA STUDENT	6
2.1.1 SUSPENSIÓN.....	8
2.1.2 ROCKER TRASERO	9
2.2 DISEÑO GENERATIVO	11
2.2.1 FLUJO DE TRABAJO	12
2.3 FABRICACIÓN ADITIVA.....	13
2.3.1 FLUJO DE TRABAJO	14
2.3.2 TIPOS DE FABRICACIÓN ADITIVA.....	16
2.3.3 PARÁMETROS PARA CLASIFICACIÓN DE LOS TIPOS DE IMPRESIÓN	17
2.3.4 POSTPROCESADO	18
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA DE TRABAJO.....	19
3.1 PLANIFICACIÓN	19
3.2 RECURSOS A EMPLEAR.....	20
3.3 SIMULACIONES Y ESTUDIO GENERATIVO	22
CAPÍTULO 4. DESARROLLO DEL PROYECTO.....	24
4.1 DISEÑO DEL ROCKER.....	25
4.1.1 PROTOTIPO INICIAL	25
4.1.2 ESTADO DE CARGAS	27
4.1.3 PRIMERA SIMULACIÓN	31
4.1.4 DISEÑO FINAL	38

4.1.5	SIMULACIÓN FINAL	39
4.1.6	REFINAMIENTO.....	41
4.1.7	VERIFICACIÓN.....	44
4.1.8	IMPRESIÓN	45
<i>CAPÍTULO 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....</i>		<i>49</i>
5.1	ANÁLISIS DE COSTES.....	49
5.1.1	COSTES INTERNOS	50
5.1.2	COSTES EXTERNOS.....	54
5.1.3	COMPARACIÓN	58
5.2	ANÁLISIS TÉCNICO	59
<i>CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....</i>		<i>63</i>
6.1	CONCLUSIONES.....	63
6.2	PROYECTOS FUTUROS.....	64
<i>CAPÍTULO 7. BIBLIOGRAFÍA.....</i>		<i>66</i>
<i>CAPÍTULO 8. ANEXOS.....</i>		<i>68</i>
8.1	ALUMINIO 7075 T6.....	68
8.2	FICHA TÉCNICA DE LA IMPRESORA.....	69
8.3	FICHA TÉCNICA DEL MATERIAL PLA USADO	70

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: Objetivo 9.....	4
FIGURA 2: Objetivo 12.....	5
FIGURA 3: Estructura actual de la suspensión, elaboración propia	8
FIGURA 4: Plano del rocker trasero actual [8]	10
FIGURA 5: Rocker actual en CAD, elaboración propia	11
FIGURA 6: Diagrama de flujo de la fabricación aditiva, elaboración propia	14
FIGURA 7: Cronograma para la planificación del proyecto, elaboración propia	19
FIGURA 8: Diagrama de flujo de la metodología, elaboración propia	20
FIGURA 9: Boceto inicial del rocker, elaboración propia	25
FIGURA 10: Prototipo inicial, elaboración propia	27
FIGURA 11: Ángulos principales del rocker trasero, elaboración propia.....	28
FIGURA 12: Silueta base del rocker trasero, elaboración propia	29
FIGURA 13: Croquis de los ejes y ángulos del rocker, elaboración propia	30
FIGURA 14: Resultados de la primera simulación, elaboración propia	32
FIGURA 15: Restricción de los agujeros, elaboración propia	33
FIGURA 16: Primer prototipo optimizado, elaboración propia	34
FIGURA 17: Primer prototipo con condiciones de simulación, elaboración propia	35
FIGURA 18: Resultados de tensiones del primer prototipo, elaboración propia	37
FIGURA 19: Resultados de desplazamientos del primer prototipo, elaboración propia.....	37
FIGURA 20: Pieza final, elaboración propia.....	38
FIGURA 21: Resultados de tensiones de la pieza final, elaboración propia	39
FIGURA 22: Resultados de desplazamientos de la pieza final, elaboración propia.....	40
FIGURA 23: Pieza mallada en PolyNurbs, elaboración propia	42
FIGURA 24: Pieza refinada, elaboración propia	43
FIGURA 25: Pieza final para fabricación, elaboración propia	44
FIGURA 26: Variables de impresión, elaboración propia.....	46
FIGURA 27: Otras variables de impresión, elaboración propia	46
FIGURA 28: Resultados de la simulación mediante impresión 3D	47
FIGURA 29: Etapa de la impresión 3D	48
FIGURA 30: Costes proporcionados por la empresa Protolabs, elaboración propia	55
FIGURA 31: Costes proporcionados por la empresa Xometry, elaboración propia	56

FIGURA 32: Costes parciales proporcionados por la empresa i-materialise, elaboración propia	57
FIGURA 33: Costes totales proporcionados por la empresa i-materialise, elaboración propia ..	57
FIGURA 34: Rocker actual impreso en 3D, elaboración propia	59
FIGURA 35: Rocker inicial impreso en 3D, elaboración propia.....	60
FIGURA 36: Rocker final impreso en 3D, elaboración propia	61
FIGURA 37: Rocker final suavizado impreso en 3D, elaboración propia	62

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Reparto de puntos en la competición, elaboración propia	7
Tabla 2: Propiedades y composición del aluminio [19].....	26
Tabla 3: Restricciones de los agujeros, elaboración propia	33
Tabla 4: Comparación entre pieza base y primera optimización	36
Tabla 5: Comparación entre pieza base y pieza final, elaboración propia.....	40
Tabla 6: Datos del servicio, elaboración propia.....	51
Tabla 7: Cálculo de los costes del servicio, elaboración propia	52
Tabla 8: Datos del pedido y de la pieza, elaboración propia	52
Tabla 9: Costes del pedido	53
Tabla 10: Comparación de costes finales.....	58

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

Entre las competiciones de universidades de ingeniería destaca el Fórmula Student. Esta competición trata de diseñar y fabricar un coche que posteriormente se pondrá a prueba debiendo cumplir numerosos criterios tales como resistencia, peso, rapidez o coste. Para ser el ganador de la carrera, el coche debe estar diseñado de manera óptima y uno de los elementos críticos para lograrlo es la suspensión del mismo. Este aspecto es importante pues se encarga de mantener el coche en contacto con el suelo. En ella, aparecen piezas como los ejes, los amortiguadores, las barras estabilizadoras o los rockers traseros.

Estos últimos actúan como transmisores de fuerzas y movimientos desde las ruedas hasta el amortiguador, reduciendo así los esfuerzos en otras piezas. La importancia de obtener un buen diseño del rocker no solo cae directamente sobre la estabilidad que aporta en la suspensión de este y la facilidad que genera en el manejo de las curvas si no también en una redistribución de los esfuerzos y la reducción de material, peso y coste final.

A día de hoy, existen muchas posibilidades a la hora del diseño de piezas, pues, con el avance de las tecnologías surge la oportunidad de retocar su fabricación hasta llegar al punto óptimo. Un buen ejemplo puede ser la impresión 3D (también conocida como fabricación aditiva), que proporciona una gran libertad a la hora de diseñar, pues es capaz de imprimir formas geométricas más complicadas (o incluso imposibles) para otros métodos más tradicionales como puede ser la fundición. Además, otra gran ventaja de la impresión 3D es que se puede combinar con otros métodos de diseño tales como la optimización topológica y el diseño generativo. Estos métodos tratan, como su nombre indica, de optimizar la pieza deseada en términos de material y resistencia sin variar sus propiedades mecánicas.

Este proyecto se centra en el análisis, diseño generativo y fabricación de componentes de uso final, como son los balancines traseros, orientados a la mejora del coche de la fórmula student. Para realizar el diseño de los rockers, se emplearán los dos métodos nombrados anteriormente de manera paralela y se realizarán las simulaciones necesarias para evaluar los esfuerzos y las tensiones que sufre esta pieza durante las pruebas. Tras lograr el diseño óptimo, se fabricará la pieza mediante impresión 3D y posteriormente se podrá proceder a la instalación en el coche. La finalidad de este trabajo es demostrar que gracias a las nuevas tecnologías se puede llegar a piezas de alto rendimiento en automovilística además de colaborar con el equipo integrando la pieza óptima.

1.1 MOTIVACIÓN

La motivación principal de este trabajo es la inclusión del modelo diseñado en el coche del Fórmula student para conseguir un mejor rendimiento del mismo.

Como se ha mencionado en la introducción, la suspensión es un aspecto muy relevante en el diseño del coche, es por eso el interés de optimizar esta pieza al máximo. Si se logra llegar a un diseño óptimo de las piezas, el coche mejorará de manera exponencial y podría incluso optar a los puestos más altos de la competición. No solo hablamos de un mejor diseño si no también de una importante reducción de costes a la hora de fabricar la pieza, lo que permitirá destinar este dinero a otras piezas que lo demanden.

Otra motivación importante en este proyecto es demostrar que los avances tecnológicos empleados para obtener el diseño final realmente aportan ventajas a la hora de trabajar. Gracias a estos métodos se consiguen piezas de mayor eficiencia estructural, más ligeras, más baratas y más seguras.

Se habla de ventajas dadas por la impresión 3D y otras tecnologías emergentes con la finalidad de que los estudiantes y equipos de ingeniería descubran sobre estas técnicas y las incluyan en el desarrollo de sus proyectos, haciéndolos así mucho más sencillos.

De esta manera, y juntando los dos motivos principales, no solo se busca contribuir con el equipo de la universidad, si no que también se desea ayudar con el avance de este tipo de técnicas que hacen más fácil la mejora de componentes en automovilística.

1.2 OBJETIVOS

Este proyecto tiene cuatro objetivos principales:

En primer lugar, se desea analizar los esfuerzos que sufre la pieza mediante la tensión de Von Mises. Tras realizar este análisis, se puede deducir qué parte de la pieza es la que más importancia tiene y así eliminar la que menos. Además, después de realizar este proceso también se puede garantizar que la pieza va a cumplir los requisitos estructurales y de tensión necesarios bajo las condiciones que exige la competición.

En segundo lugar, el objetivo de minimizar tanto el peso como el coste total de la pieza. Este objetivo se llevará a cabo mediante el recorte de masa que se consigue tras analizar la distribución de cargas del primer objetivo. Como se ha mencionado anteriormente, se desea recortar en estos parámetros ya que esto proporcionará mayor flexibilidad a la hora de diseñar otras piezas, pues el dinero y el peso recortado se podrá destinar a estas que lo demanden en una mayor medida.

El tercer objetivo es llegar al diseño óptimo de la pieza siguiendo los dos criterios anteriores de resistencia y peso. Para ello, tras realizar las simulaciones y ensayos necesarios, se realizarán las anotaciones y modificaciones pertinentes hasta llegar al diseño ideal.

Por último, como cuarto objetivo se tiene producir la pieza y comprobar su rendimiento. Para ello se empleará la técnica de la impresión 3D, gracias a la cual se hace más sencilla y barata esta producción. Además, la comprobación de rendimiento permitirá garantizar con seguridad que la pieza diseñada cumple los requisitos necesarios establecidos en la competición del Fórmula student.

1.3 ALINEACIÓN CON LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE

Los ODS son un conjunto de metas de la agenda 2030 enfocadas al desarrollo sostenible del planeta. Estos objetivos son propuestos por la ONU con el objetivo de priorizar (y evitar) problemas a nivel global como lo son la pobreza, el calentamiento global, la justicia y el medio ambiente.

Este proyecto se basa en desarrollos tecnológicos e innovación, por eso se presentan los dos siguientes objetivos:[1]



FIGURA 1: Objetivo 9

- Objetivo 9: “Industria, innovación e infraestructura”
Objetivo el cual promueve la industrialización sostenible y busca obtener avances tecnológicos para lograr soluciones más eficientes. Este queda alineado con el proyecto ya que uno de los objetivos finales es lograr un diseño óptimo (eficiencia). Además, se emplean técnicas innovadoras enumeradas anteriormente.



- Objetivo 12: “Producción y consumo responsables” Objetivo el cual pretende lograr un consumo sostenible para mantener así los medios de subsistencia de generaciones actuales y futuras. Este queda alineado de manera que el proceso empleado se encarga de reducir el material necesario en la pieza y reducir el desperdicio a la hora de su producción.

FIGURA 2: Objetivo 12

CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE

El objetivo de este capítulo es explicar el estado de la cuestión, el cual pretende situar el tema de estudio. Es importante contextualizar en primer lugar la competición en la que se trabaja. También es interesante conocer la rama en la que se encuentra la pieza analizada, así como su función. Para ello se realiza un análisis del estado actual y de los últimos avances en el campo de la competición y de la propia pieza, así como los recursos que se emplearán para lograr los objetivos. Entre ellos aparecen la impresión 3D y el diseño generativo.

2.1 FÓRMULA STUDENT

La fórmula SAE (Society of Automotive Engineerings) nació en 1978 como una competición americana de ingeniería a partir de la cual surgieron otras versiones como puede ser la Fórmula student en Europa. Esta versión se originó como una competición entre equipos de alumnos de diferentes universidades en la que se diseña un coche monoplace de fórmula 1 siguiendo una serie de normas alemanas [2].

En esta competición se realiza una serie de pruebas estáticas y dinámicas con diferentes subpruebas en cada una. En cuanto a la puntuación, existe una pequeña diferencia entre vehículos de combustión interna o los eléctricos y los autónomos. A continuación, se muestra en la Tabla 1: Reparto de puntos en la competición la puntuación según las evaluaciones durante la competición [3].

El equipo que obtenga la mayor suma (con un máximo de 1000 pt) se proclamará como ganador de la competición.

Tabla 1: Reparto de puntos en la competición, elaboración propia

Pruebas	Combustión interna + Eléctricos	Autónomos
Pruebas ESTÁTICAS		
Buisness plan	75 pts	75 pts
Coste y producción	100 pts	100 pts
Diseño	150 pts	300 pts
Pruebas DINÁMICAS		
Ski pad	75 pts	75 pts
Aceleración	75 pts	75 pts
Autocross	100 pts	100 pts
Resistencia	325 pts	-
Eficiencia	100 pts	75 pts
Track drive	-	200 pts
TOTAL	1000 pts	1000 pts

Este diseño cuenta con desarrollos tanto eléctricos como mecánicos o electrónicos y busca poner en práctica la especialidad que cada alumno ha escogido durante su carrera además de promover el trabajo en equipo. Esta competición sirve como entrenamiento para los alumnos para introducirse en un ámbito profesional, más allá de la teoría o los problemas tratados en las clases.

Dentro de la competición, se evalúan numerosos aspectos tales como el diseño, el coste y sus especificaciones técnicas y se realizan pruebas entre las cuales se analizan sus habilidades dinámicas [4]. Para destacar entre todas estas pruebas es muy importante incidir en la mecánica del monoplaza. Dentro de esta, se encuentran elementos cruciales como la suspensión o la aerodinámica ya que influye directamente en la dinámica, la tracción y la respuesta a estimulaciones del coche.

2.1.1 SUSPENSIÓN

El coche del Formula Student cuenta con numerosas partes principales en su diseño. Una de ellas es la suspensión, la cual es responsable del rendimiento y la seguridad durante la competición. Esta parte del coche se encarga de mantener el vehículo en constante contacto con el asfalto además de transmitir las cargas de manera que el piloto se mantenga firme. Además, la suspensión también se encarga de adaptar el coche a cambios bruscos de aceleración y frenada, por lo que debe soportar grandes tensiones y mantenerse intacta. [5]

A continuación, se presenta en la FIGURA 3: Estructura actual de la suspensión, un esquema de la suspensión actual diseñada por el propio equipo. En ella se pueden apreciar los ángulos de construcción, se emplearán posteriormente para el análisis de cargas del rocker trasero. Además, se observa que este diseño de monoplaza es de suspensión independiente, lo que quiere decir que ambas ruedas cuentan con un sistema de suspensión que no está unido dinámicamente. Dentro de esta configuración se puede encontrar en la parte trasera una configuración pushrod, es decir, que la barra de empuje trabaja a compresión [6].

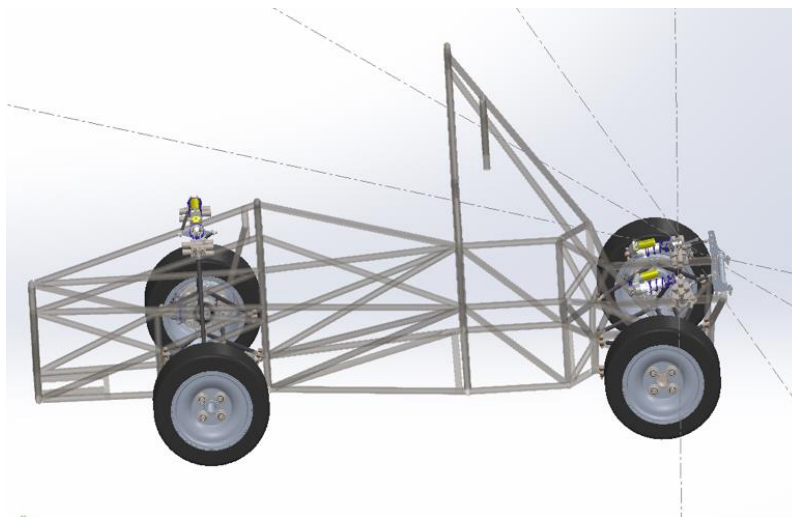


FIGURA 3: Estructura actual de la suspensión, elaboración propia

Dentro de la suspensión se encuentran piezas como la mangueta, el buje, los amortiguadores, los brazos de suspensión... Todos ellos realizan un papel esencial dentro de la suspensión, sin embargo, en este proyecto nos centraremos en los rockers (concretamente los traseros).

2.1.2 ROCKER TRASERO

El rocker, también conocido como balancín, es una pieza fundamental en el diseño de la suspensión. Esta pieza pivota alrededor de un eje fijo y se encarga de transmitir la fuerza recibida por el neumático hacia el amortiguador a través de la pushrod para así disiparla. El rocker también se encarga de optimizar el espacio de los amortiguadores y por tanto favorecer a la dinámica del coche, al poder colocarse en posiciones favorables [7].

El estado de cargas que sufre el rocker se define principalmente por la fuerza que se transmite desde la pushrod. Actualmente se ha considerado una carga máxima de 5937 N, aplicada en el punto de conexión del rocker y de la barra. Esta fuerza viene definida mediante casos críticos de carga correspondientes a condiciones exigentes, así como frenadas o aceleraciones bruscas o curvas pronunciadas.

Esta carga es una condición indispensable a cumplir a la hora de diseñar el rocker, pues debe soportar el esfuerzo y garantizar su resistencia ante este, de otra manera la suspensión no será efectiva.

A continuación, se presenta en la FIGURA 4: Plano del rocker trasero actual [8] un esquema del diseño actual del rocker trasero realizado por el ISC racing team. Posteriormente, y basado en este diseño, se reestructurará la pieza para cumplir el objetivo de reducción de masa manteniendo sus capacidades físicas.

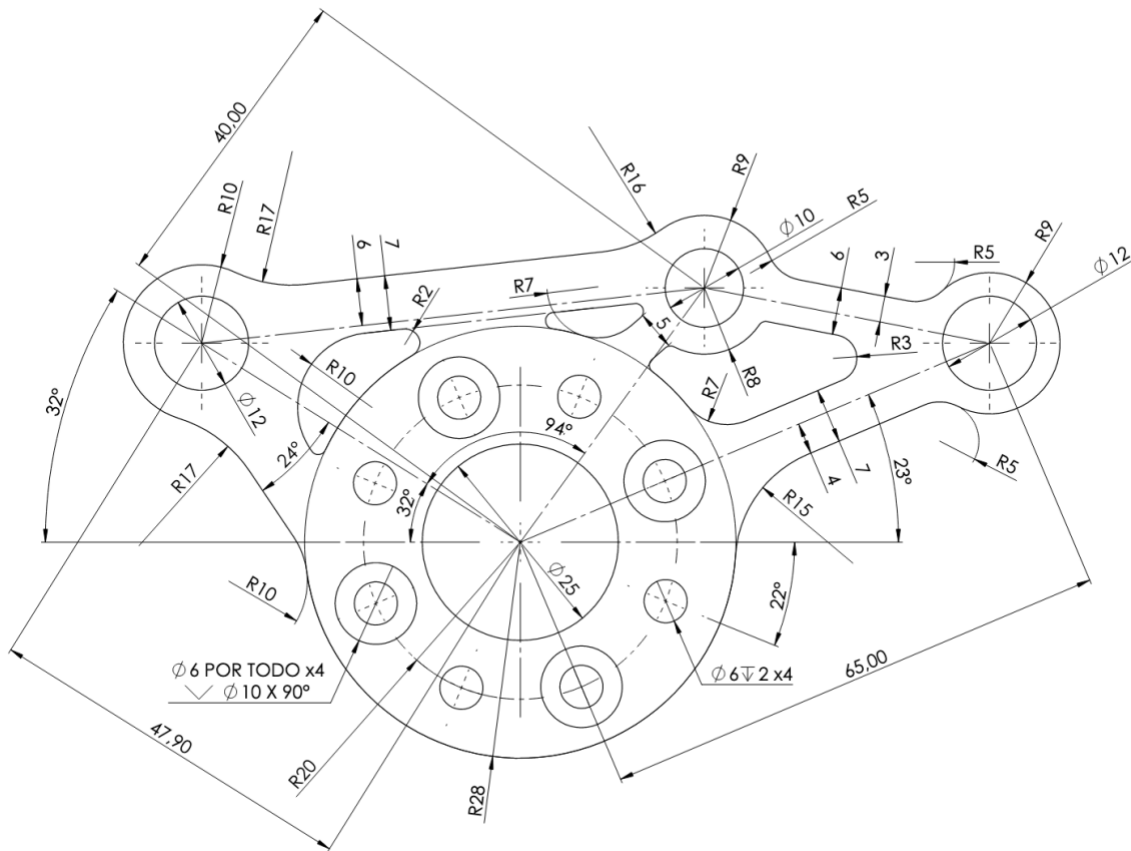


FIGURA 4: Plano del rocker trasero actual [8]

El rocker actual está compuesto por dos piezas base de 4 mm de espesor y 67 gramos de masa (en total) como las mostradas en la FIGURA, separadas 16 mm entre sí. Además, contenido entre las dos placas se encuentra un inserto de masa 81.13 gramos. Estas 3 piezas están unidas entre sí por 8 tornillos ISO 10642 M3x8 8N cuya masa total es de aproximadamente 6.5 gramos (aproximadamente 0.8 gramos en cada tornillo).

Tras analizar las masas individuales de cada parte del rocker, resulta una masa total de 154,7 gramos.

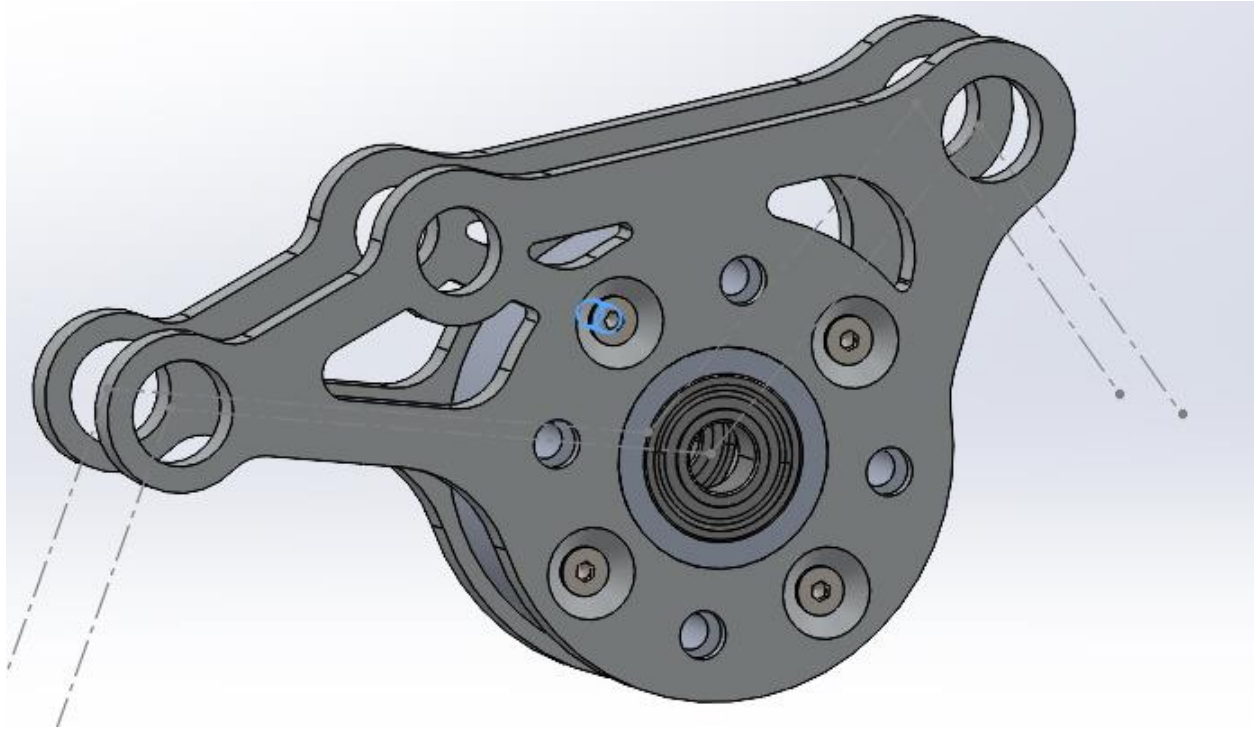


FIGURA 5: Rocker actual en CAD, elaboración propia

2.2 DISEÑO GENERATIVO

El diseño generativo ha emergido como una nueva metodología en la ingeniería, dando una vuelta al diseño tradicional, basado en la experiencia e intuición del ingeniero. Este nuevo método usa algoritmos avanzados y técnicas de inteligencia artificial para resolver los diseños con elementos comunes como autómatas celulares (conjunto de células que evolucionan siguiendo un conjunto de reglas) y gramáticas geométricas (para crear diseños geométricos mediante cálculos con formas) [9].

La optimización topológica se define como una herramienta que permite obtener el diseño óptimo, topológicamente hablando, que permite maximizar o minimizar características deseadas para la propia pieza. [10] Para lograr el objetivo, se implementa un modelo matemático que cumpla con restricciones, así como el peso o la tensión aplicada. Se realiza una serie de simulaciones para analizar aquellos puntos donde la pieza sufre y posteriormente se llega al diseño óptimo.

En el ámbito de la ingeniería mecánica, esta técnica es especialmente valiosa para partes del proceso de desarrollo de productos donde sean necesarias soluciones innovadoras y eficientes. El diseño generativo permite reducir el peso total de las piezas diseñadas y por consiguiente reducir la cantidad de material empleado. Además, juntando esta técnica con la de fabricación aditiva, se consigue fabricar piezas con geometrías más complejas que las tradicionales, por lo que es posible seguir un proceso más creativo y complejo. Esta herramienta ha sido impulsada en la industria por su capacidad de reducir los tiempos de las fases de producción y desarrollo, además de mejorar la calidad de los productos y las geometrías [11]. Por eso grandes empresas automovilísticas y aeronáuticas han adoptado esta técnica para optimizar sus procesos de diseño y mantenerse liderando en un entorno cada vez más exigente.

En resumen, el diseño generativo representa una gran revolución en la ingeniería, ofreciendo una herramienta poderosa para la creación de soluciones más eficientes, sostenibles e innovadoras.

2.2.1 FLUJO DE TRABAJO

El flujo de trabajo seguido para aplicar el diseño generativo en el desarrollo del rocker trasero comienza con la definición de las condiciones de contorno y los objetivos principales de la pieza. Este problema está centrado en reducir masa sin comprometer la rigidez estructural ni la resistencia ante una carga definida previamente por la fuerza de 5937 N, que viene de la pushrod. A partir de un cuerpo de diseño creado en Solid Edge, se identifican las zonas funcionales que no pueden ser modificadas (desplazamientos máximos), como los alojamientos de los ejes y puntos de conexión

(zonas fijas). Posteriormente, se aplican las condiciones de carga que sufre el cuerpo de diseño, así como el material, y se procede a realizar el estudio generativo. Posteriormente, esta información se traslada a Altair Inspire, donde se realiza un rediseño y un alisamiento de la pieza para su posterior impresión mediante fabricación aditiva. El software genera una geometría optimizada, que se interpreta y adapta para su posterior validación estructural mediante análisis por elementos finitos (FEA).

2.3 FABRICACIÓN ADITIVA

En primer lugar, la impresión 3D (o fabricación aditiva) es un proceso empleado para producir piezas mediante la integración de diversos métodos de fabricación tales como fusión, extrusión o inyección de materiales principalmente plásticos, de manera que se va superponiendo capa a capa del boceto hasta llegar al producto final [12]. Esta técnica fue iniciada durante los años 80 y ha ido evolucionando la producción de componentes funcionales hasta llegar a la metodología de trabajo actual, basada en la producción de objetos tridimensionales mediante adición.

Todo comienza con el prototipo de un modelo en 3D, normalmente realizado mediante diseño generativo y en formato digital CAD. Posteriormente, el prototipo digitalizado se convierte a formato STL (objeto mallado en triángulos) o STP en caso de desear conservar las distancias originales para poder analizar las capas horizontales de la pieza mediante el software de laminado Slider, que define las trayectorias de deposición. Tras este proceso, se generan las operaciones necesarias durante la fabricación y se envían a la impresora 3D junto a la información del material y dimensiones. Una vez finalizada la impresión, es posible que se necesite un tratamiento posterior, ya sea térmicamente o de eliminación de soportes para alcanzar las propiedades necesarias [13].

Es una realidad que esta técnica ya se encuentra en sectores de la industria tales como la Fórmula 1 y automoción, por eso la idoneidad de esta técnica de fabricación aditiva en el proyecto. Además, esta herramienta es clave para una producción rápida, económica y personalizable que permite realizar con agilidad el proceso iterativo que se seguirá en este proyecto. Finalmente, está demostrado que la fabricación aditiva actualmente tiene numerosas ventajas tales como un menor desperdicio de material, pues solo se emplea la cantidad necesaria para estructurar las capas. Este criterio logra que el volumen final de la pieza sea un 40% del volumen inicial [10]. Por consiguiente, una importante bajada en los costes de producción, pues no requiere gastos extra en moldes o herramientas. Además, como se ha mencionado en la introducción, esta técnica hace posible la producción de piezas geométricamente complejas.

2.3.1 FLUJO DE TRABAJO

Se presenta a continuación, en la FIGURA 6: Diagrama de flujo de la fabricación aditiva un diagrama de flujo de trabajo para la fabricación aditiva del producto [14].

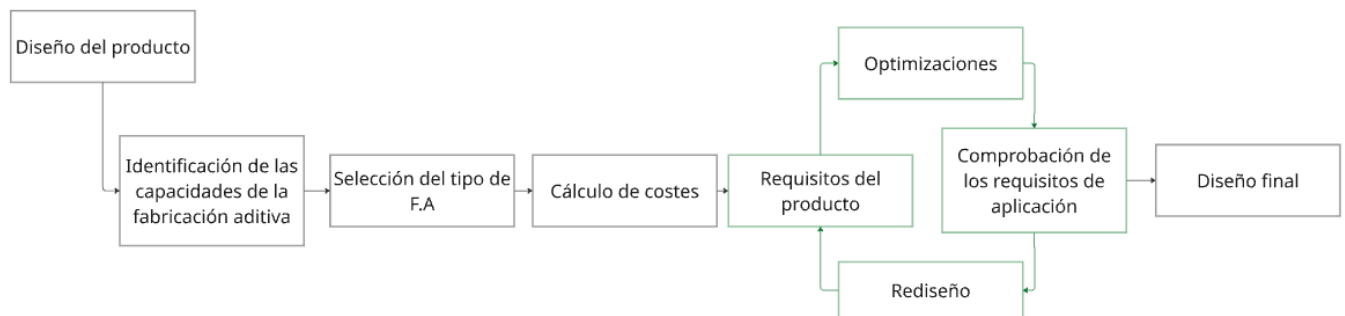


FIGURA 6: Diagrama de flujo de la fabricación aditiva, elaboración propia

El proceso de trabajo en fabricación aditiva comienza con una valoración del prototipo inicial del producto y sus necesidades. Para ello se valora el alcance que tiene la fabricación aditiva en su diseño identificando las capacidades y limitaciones de este proceso de fabricación además de valorar la geometría y el material deseado para el producto final.

A continuación, se procede a escoger el tipo de fabricación aditiva según las necesidades finales. A la hora de decidir el método adecuado se debe tener en cuenta una serie de datos a través de los cuales se decide si un proceso es idóneo para obtener la pieza deseada. Se enumeran a continuación una serie de variables de decisión que son claves para la elección de la técnica: Resolución y precisión de la pieza, repetibilidad del proceso elegido y la capacidad de utilizar multi-material. También se tienen en cuenta las propiedades mecánicas del material a emplear, como, por ejemplo, tracción, compresión, impacto... Otro factor a contemplar es la variabilidad de materiales a emplear, como su color o su biocompatibilidad, así como el acabado superficial proporcionado. Por último, en cuanto al proceso de fabricación, se debe estudiar el tiempo de ejecución que se toma para fabricar la pieza, el coste de producción y otros requerimientos de la pieza como puede ser el post-curado.

Tras la elección idónea del proceso, se debe realizar una aproximación de los costes finales de producción y material, para valorar la rentabilidad del producto y una vez finalizado este paso de análisis, se procede a la optimización del prototipo. Para ello, se establecen los requisitos físicos y mecánicos que debe cumplir la pieza (y que servirán como valoración de futuros prototipos) con el objetivo de mejorar su eficiencia en términos de peso, rigidez y material. Esta parte del desarrollo del producto se combina con técnicas de diseño generativo para lograr los objetivos.

Una vez finalizada esta etapa, se procede a fabricar la pieza final mediante el tipo de fabricación escogida durante el proceso de valoración.

2.3.2 TIPOS DE FABRICACIÓN ADITIVA

Existen diversos tipos de tecnologías de fabricación aditiva, cada una adecuada a distintos materiales y aplicaciones. Entre las más comunes se encuentran [15]:

La tecnología FDM (Fused Deposition Modeling), que deposita filamento de plástico que se funde (como PLA o ABS) capa por capa. Es la técnica más extendida por su bajo coste y facilidad de uso, ideal para prototipos básicos o producciones de bajo volumen.

La tecnología SLA (Estereolitografía), una de las primeras técnicas de impresión 3D, utiliza un láser ultravioleta para curar las capas resina fotosensible. Ofrece gran resolución y acabado superficial, siendo idónea para componentes pequeños o detallados como en odontología o joyería.

La tecnología MJF (MultiJet Fusion), método de impresión por inyección de material termoplástico en polvo. Se depositan pequeñas gotas de material que se curan mediante luz UV formando así las capas de la pieza.

La tecnología DLP (digital light processing), la cual incorpora un proyector con esta tecnología y genera patroness que fotopolimerizan finas capas de material. Este proceso produce píxeles de tamaño reducido haciendo posible conseguir un gran detalle en las piezas producidas [tfg]

La tecnología BJ (Binder Jetting), en la que se deposita de manera selectiva un aglutinante líquido sobre un polvo metálico para formar las capas deseadas. Posteriormente se introduce la pieza en un horno para sintetizar, fusionar el material y dar buenas propiedades a la pieza.

La tecnología SLS (Sinterizado Selectivo por Láser), método en el cual se funden partículas de polvo de polímero mediante un láser sintetizándolas en un bojeto rígido, sin necesidad de estructuras de soporte. Permite fabricar piezas funcionales en nylon o mezclas con fibra de vidrio o carbono. Este último grupo tiene tres variantes que son SLS, DMLS EBM

La elección de la tecnología adecuada depende de factores como la función del componente, el material deseado, las tolerancias requeridas, el volumen de producción y la viabilidad económica. En este proyecto, la impresión 3D no solo será útil para lograr un prototipado rápido durante el proceso iterativo, sino también para lograr una solución de fabricación final que valide las propiedades mecánicas y la idoneidad de esta técnica en competición.

2.3.3 PARÁMETROS PARA CLASIFICACIÓN DE LOS TIPOS DE IMPRESIÓN

La fabricación aditiva es capaz de dividirse según tres grandes criterios para elegir la impresora idónea.

El primero de ellos es según el material. Dependiendo de si la pieza a fabricar requiere un material plástico, cerámico o metálico se emplea un tipo u otro de impresión 3D. El primer grupo, los materiales plásticos, permiten impresiones de tipo SLA, DLP, SLS, FDM y MJF. El segundo grupo, los materiales cerámicos, permite técnicas como BJ. Por último, los materiales metálicos permiten una impresión mediante SLS, en sus tres variantes.

El segundo criterio se basa en el estado base del material. Si se encuentra en estado líquido, curado, facilita técnicas como SLA, DLP o MJF. Si el material se encuentra en estado sólido, ya sea en láminas o en hilos, se pueden emplear impresoras para FDM. Por último, si el material se encuentra en polvo, ya sea por unión o compactado, se pueden emplear impresiones como SLS en todas sus variables o BJ.

El último gran criterio de clasificación es según el principio empleado para la fabricación. El primer principio es la inyección, la extrusión o el corte de material, usado para técnicas como BJ, MJF o FDM. El segundo principio es el principio de haz o luz de alta energía, es decir laser o haz de electrones, o bien la resistencia eléctrica, para SLA o SLS en todas sus formas.

2.3.4 POSTPROCESADO

Una vez se ha terminado de fabricar la pieza, es necesario realizar una etapa de postprocesado. Este es un paso esencial en el ciclo de fabricación aditiva, ya que permite mejorar las propiedades y la estética de las piezas impresas en 3D. Dependiendo de la tecnología utilizada (FDM, SLA, MJF, SLS, etc.), el postprocesado puede incluir operaciones como la eliminación de soportes que se han incluido en la pieza para facilitar la impresión, la limpieza de polvo residual, curado térmico o UV, lijado, pulido o incluso tratamientos térmicos posteriores para mejorar propiedades mecánicas y acabado superficial. Estas tareas son necesarias para asegurar una correcta superficie de contacto en los puntos de unión, eliminar irregularidades generadas por el proceso de deposición capa a capa y garantizar un ajuste preciso en el conjunto de suspensión.

En el caso del prototipo del *rocker* trasero fabricado mediante impresión 3D, se va a emplear la tecnología explicada en el apartado: TIPOS DE FABRICACIÓN ADITIVA, de tipo MJF, por lo que será necesario un postprocesado de eliminación del polvo sobrante sobre la pieza impresa. Además, en componentes sometidos a carga mecánica, como es este caso, un postprocesado adecuado puede ayudar a reducir concentraciones de tensión superficiales y a mejorar la fiabilidad estructural. Por tanto, esta fase no solo contribuye a la estética final de la pieza, sino que tiene un impacto directo en su rendimiento funcional y su durabilidad en condiciones reales de uso.

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA DE TRABAJO

3.1 PLANIFICACIÓN

Para cumplir con los objetivos, en primer lugar, se va a establecer una primera distribución del tiempo para cada apartado del proyecto. A continuación, se muestra en la FIGURA 7: Cronograma para la planificación del proyecto la planificación inicial (aunque está sujeta a modificaciones en caso de necesidad a la hora de trabajar). En primer lugar, se va a realizar una investigación teórica para situar el proyecto en un marco actual. Una vez terminada la investigación, se diseñará un prototipo inicial de la pieza y se comenzará a simular el mismo siguiendo unas condiciones de contorno establecidas para adoptar realismo.

Una vez se llegue al diseño óptimo, se fabricará la pieza mediante impresión 3D y se redactará la memoria final para su posterior presentación.



FIGURA 7: Cronograma para la planificación del proyecto, elaboración propia

En cuanto a la etapa de simulación, el diseño óptimo se conseguirá siguiendo un proceso iterativo. En primer lugar, se parte de un diseño inicial de la pieza en la cual se establecerán las cargas necesarias para su posterior análisis estructural y simulación. Se comprobará siempre que no se sobrepase el límite elástico con un coeficiente de seguridad para garantizar el correcto funcionamiento de la pieza. También se debe realizar un refinamiento del diseño tras cada estudio generativo para permitir su posterior impresión. A continuación, se fabricará la pieza y se analizará si cumple con los objetivos. En caso afirmativo, se procede a la fabricación final y redacción de la memoria. En caso contrario, se volverá al inicio del proceso.

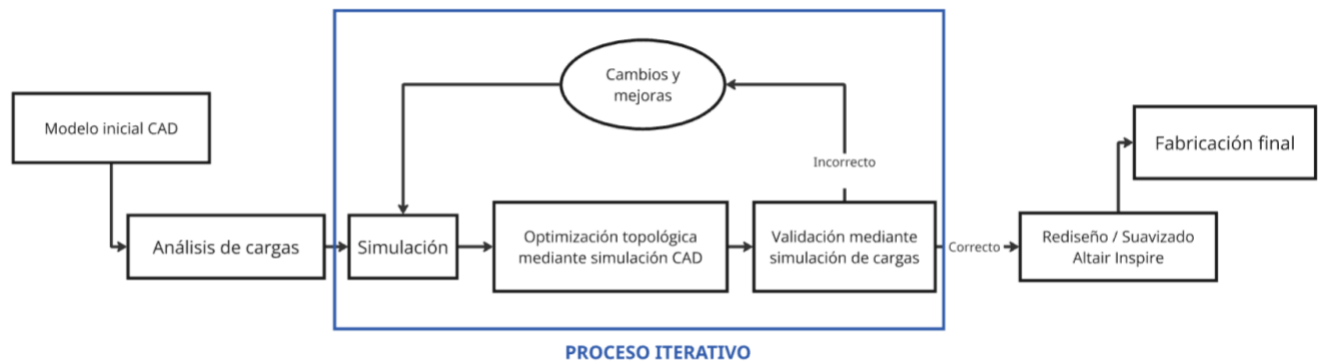


FIGURA 8: Diagrama de flujo de la metodología, elaboración propia

3.2 RECURSOS A EMPLEAR

Para llevar a cabo el desarrollo del proyecto de diseño y análisis del rocker trasero se va a emplear una serie de herramientas digitales a través de las cuales se abordará su correspondiente fase.

En primer lugar, como espacio de inspiración e innovación se va a emplear la herramienta Miro. Esta consiste en una pizarra digital sobre la cual se puede pegar imágenes, texto y esquemas para

facilitar el brainstorming del proyecto. Esta herramienta será especialmente útil durante la primera fase para tener una imagen visual del conjunto y organizar las ideas.

Para el apartado de gestión de la bibliografía se empleará Zotero, un software abierto para organizar, almacenar y citar el conjunto de documentos que se recopilen para la redacción de la memoria final. Esta herramienta permite mantener un estricto control de los mismos y facilitará la elaboración de las citas y la bibliografía.

Para llevar a cabo el diseño inicial del rocker trasero y las simulaciones y estudios correspondientes se empleará Solid Edge, un software de diseño asistido por ordenador (CAD). Gracias a sus capacidades de gestión de piezas y simulación nos permitirá conocer los puntos de máxima tensión y desplazamiento para poder evaluar la rigidez y así aplicar técnicas de diseño generativo para lograr el objetivo del proyecto.

Una vez realizada la simulación, se utilizará el software de Altair Inspire para rediseñar la superficie optimizada. Esta herramienta analiza las concentraciones de tensiones y su rigidez con la finalidad de reducir el peso final sin comprometer las propiedades mecánicas de la pieza. Gracias a Altair también conseguiremos diseñar una geometría adecuada para su posterior impresión mediante fabricación aditiva.

Para proceder a la fabricación final mediante impresión 3D, es necesario emplear el software de UltiMaker-Cura para diseñar las láminas que van a dividir la pieza. Este se encarga de, una vez introducida la pieza en formato STL, dividir la misma en capas y situar los soportes necesarios durante la impresión.

Por último, para la elaboración y redacción de la memoria técnica se empleará Microsoft Word. Este es un procesador de texto que ofrece herramientas para insertar ecuaciones, imágenes, tablas de contenido y referencias, lo que facilitará la presentación del trabajo con claridad y calidad.

3.3 SIMULACIONES Y ESTUDIO GENERATIVO

A la hora de realizar el desarrollo del proyecto es fundamental comprender las diferencias entre la simulación tradicional y el diseño generativo, ya que estas son etapas clave en el proceso iterativo para lograr el diseño óptimo.

La simulación tradicional, implementada en herramientas como Solid Edge, permite validar digitalmente el prototipo existente mediante análisis por elementos finitos (FEA). Esta técnica evalúa cómo una pieza o ensamblaje responde a condiciones de carga, vibración o temperatura, identificando tensiones, deformaciones y posibles fallos estructurales. La herramienta de simulación de Solid Edge ofrece capacidades avanzadas, incluyendo análisis estático lineal, térmico, de frecuencia modal y de pandeo, lo que facilita la detección de problemas antes de la fabricación y reduce la necesidad de prototipos físicos [16].

Por otro lado, el estudio generativo, como el que proporciona el propio Solid Edge o Altair Inspire, es un enfoque innovador que utiliza algoritmos de optimización topológica para generar automáticamente geometrías optimizadas basadas en criterios específicos, como minimizar la masa o maximizar la rigidez. Para ello, el usuario establece nuevamente las condiciones de carga, restricciones de movimiento y objetivos de diseño, y el software explora múltiples configuraciones para encontrar la más eficiente eliminando cierto porcentaje de masa. Este proceso es especialmente útil para crear diseños ligeros y eficientes que serían difíciles de concebir mediante métodos tradicionales [17].

Integrar ambos enfoques en el proceso de desarrollo del rocker trasero permite primero generar una geometría optimizada que cumpla con los requisitos marcados en la competición y luego validar su desempeño estructural bajo condiciones reales de operación. Esta combinación asegura

un diseño no solo innovador y eficiente, sino también seguro y confiable para su aplicación en competición.

CAPÍTULO 4. DESARROLLO DEL PROYECTO

El objetivo de este capítulo es diseñar el rocker trasero para el monoplaza de competición de manera que se obtenga el resultado óptimo tanto en peso como en forma manteniendo las propiedades mecánicas que posee el prototipo actual. El rocker final debe soportar una carga determinada por la fuerza que viene de la pushrod que se calculará en futuros apartados. Para ello se van a cumplir las fases del desarrollo del proyecto mencionadas en la FIGURA 8: Diagrama de flujo de la metodología, comenzando por el diseño inicial, el cual va a ser optimizado, hasta llegar al producto final fabricado por impresión 3D.

En primer lugar, se cuenta con el diseño del modelo actual del rocker trasero, compuesto por dos platos principales, a través del cual se realizarán modificaciones para diseñar una pieza maciza, únicamente con los agujeros correspondientes a las barras de la suspensión (sin tornillos de unión). A continuación, se establecerá el estado de cargas que sufre la pieza durante la competición para simular una realidad.

Una vez estudiada la carga, se establecerán las condiciones de contorno necesarias para aportar realismo (fuerzas, sujeciones y desplazamientos) y se simulará la pieza mediante la herramienta de análisis de elementos finitos del software de Solid Edge para posteriormente eliminar el material sobrante de la misma.

Por último, tras iterar este proceso hasta llegar a la máxima reducción, se realizará un refinamiento de la pieza en el software de Altair Inspire para su posterior fabricación mediante impresión en 3D.

4.1 DISEÑO DEL ROCKER

4.1.1 PROTOTIPO INICIAL

A partir del diseño actual, se ha prototipado la pieza maciza que se empleará durante la reducción de masa de las simulaciones.

Se han mantenido los agujeros a través los cuales se anclan las barras de la suspensión y se han eliminado los agujeros atornillados ya que el nuevo prototipo consta de un único plato. El agujero fijo (central) tiene un diámetro de 25 mm y los agujeros unidos a las barras de suspensión tienen diámetros de 10 mm y 12 mm. A continuación, se muestra en la FIGURA 9: Boceto inicial del rocker, una imagen de la silueta del boceto diseñado para comenzar con el estudio generativo y las simulaciones.

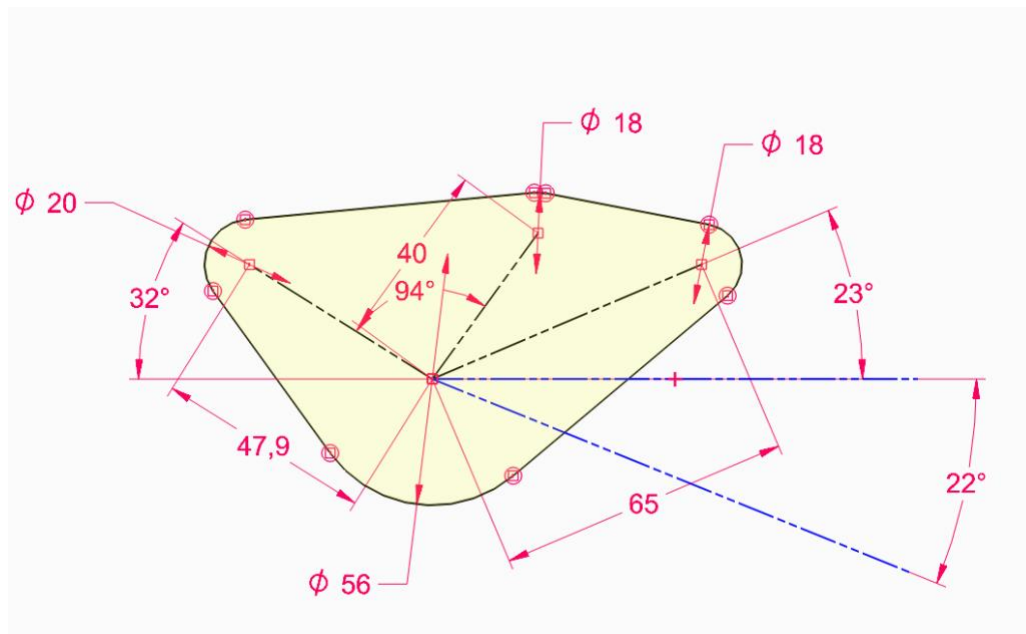


FIGURA 9: Boceto inicial del rocker, elaboración propia

Además, se debe escoger el material. Es habitual emplear un aluminio 7075 T6 para fabricar este tipo de piezas, pues es una aleación ligera y resistente [18]. El límite elástico de esta aleación es de 503 Mpa, el cual no debe ser superado bajo ninguna circunstancia si no que debe mantenerse alejado con un cierto coeficiente de seguridad.

Tabla 2: Propiedades y composición del aluminio [19]

-7075- (ALUMINIO – ZINC)										
COMPOSICIÓN QUÍMICA										
%	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Otros elementos	
Mínimo			1,20		2,10	0,18	5,10		Zr + Ti	Total
Máximo	0,40	0,50	2,00	0,30	2,90	0,28	6,10	0,20	0,25	0,15
										El resto
PROPIEDADES MECÁNICAS TÍPICAS (a temperatura ambiente de 20°C)										
Características a la tracción										
Estado	Espesor	Carga de rotura Rm. N/mm ²	Límite elástico Rp 0,2, N/mm ²	Alargamiento A 5,65%	Límite a la fatiga N/mm ²	Resistencia a la cizalladura τ N/mm ²		Dureza Brinell (HB)		
0		225	105		230	150		60		
T6	6 – 12	530	450	8	300	350		140		
T6	12 – 25	530	450	5	300	350		140		
T6	26 – 50	530	450	3	300	350		140		
T6	51 – 63	500	430	2	300	350		130		
T6	63 – 75	480	410	2	300	350		130		
T6	75 – 100	480	390	2	300	350		130		
T7351		505	435	13	300	305		140		

Finalmente se escoge un espesor de 24 mm, pues el prototipo actual consta de dos placas de 4 mm separadas 16mm.

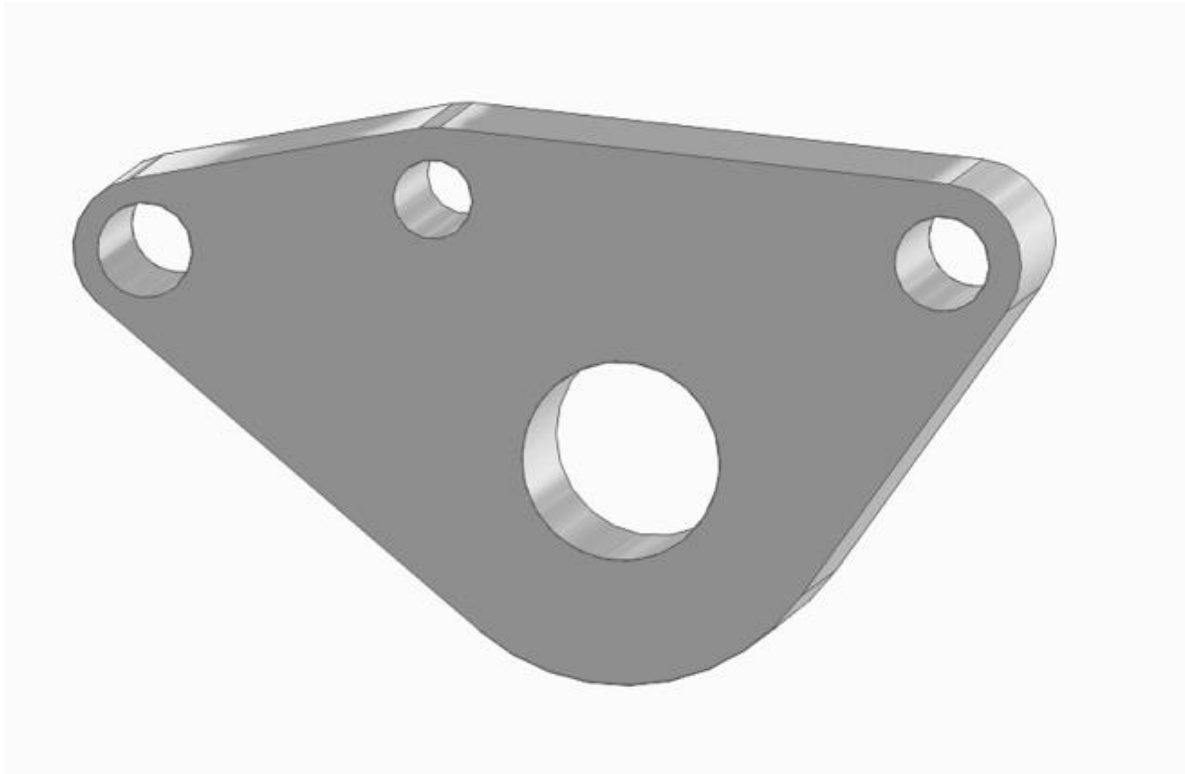


FIGURA 10: Prototipo inicial, elaboración propia

4.1.2 ESTADO DE CARGAS

Un aspecto fundamental a la hora de diseñar la pieza es el previo análisis de los esfuerzos que sufre la misma.

Se ha mencionado en el ESTADO DEL ARTE que la carga actual en el rocker trasero viene dado por la carga que viene de la pushrod, es decir 5937 N en el agujero del medio, en la parte superior. Esta carga también se transmite a lo largo de la pieza creando esfuerzos en las uniones con el resto de las barras. Por ello, se debe realizar una descomposición de las fuerzas en los ejes de las piezas

mediante los ángulos presentados como se muestra en la FIGURA 11: Ángulos principales del rocker trasero, elaboración propia y en la FIGURA 12: Silueta base del rocker trasero, elaboración propia.

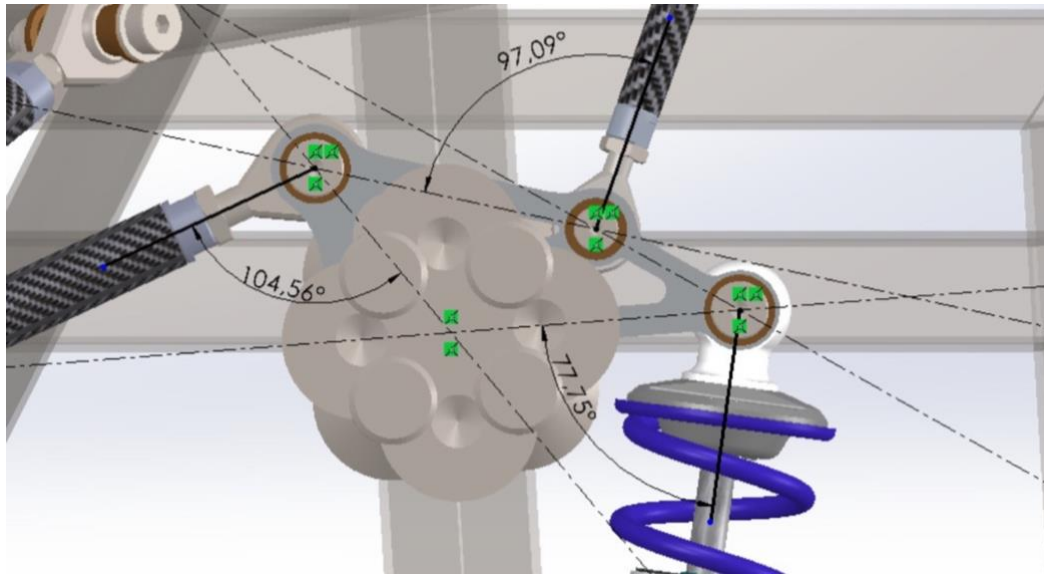


FIGURA 11: Ángulos principales del rocker trasero, elaboración propia

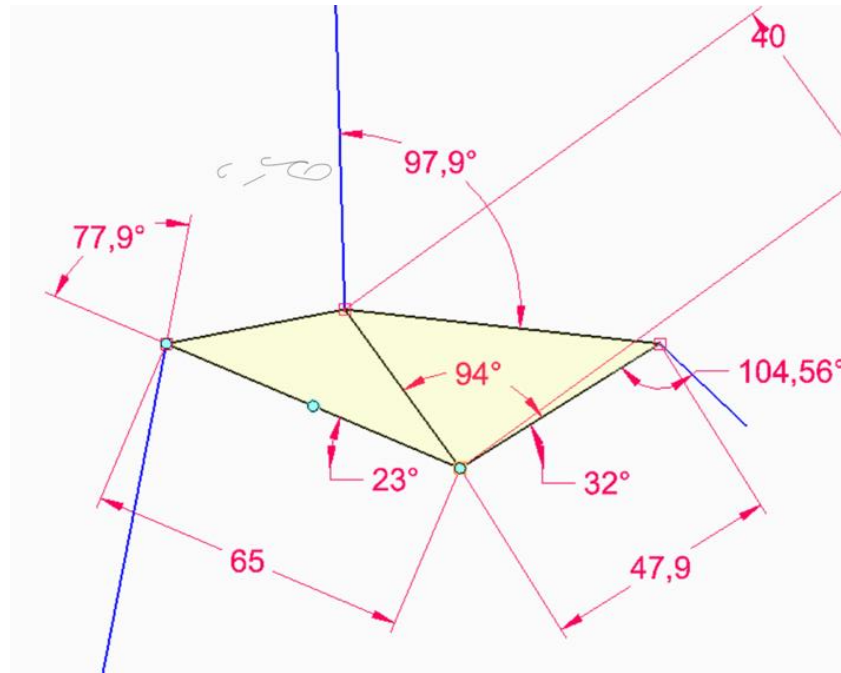


FIGURA 12: Silueta base del rocker trasero, elaboración propia

Para establecer las fuerzas que van a definir las cargas durante las simulaciones, se va a realizar una serie de cálculos para descomponer la carga total mediante los ángulos que forman las barras de la suspensión con los ejes principales del rocker, llegando así a los siguientes resultados:

Ningún agujero cuenta con carga en la dirección del eje z de la pieza (perpendicular a su superficie).

Se muestran en la FIGURA 13: Croquis de los ejes y ángulos del rocker, los ángulos θ_1 , θ_2 y θ_3 correspondientes a los que forman las barras (dirección de las fuerzas) con los ejes x e y de la pieza iguales a 91.69° , 259.1° y 316.56° respectivamente. También se muestra a continuación la descomposición de fuerzas según los ejes de la pieza que se van a utilizar en las condiciones de simulación.

$$\theta_1: \text{componente } x \rightarrow F_x = 5937 * \cos(91.96) = -203.06 \text{ N}$$

$$\text{componente } y \rightarrow F_y = 5937 * \sin(91.96) = 5933.53 \text{ N}$$

$$\theta_2: \text{componente } x \rightarrow F_x = 5937 * \cos(259.1) = -1122.66 \text{ N}$$

$$\text{componente } y \rightarrow F_y = 5937 * \sin(259.1) = -5829.89 \text{ N}$$

$$\theta_3: \text{componente } x \rightarrow F_x = 5937 * \cos(316.56) = -4310.83 \text{ N}$$

$$\text{componente } y \rightarrow F_y = 5937 * \sin(316.56) = -4082.25 \text{ N}$$

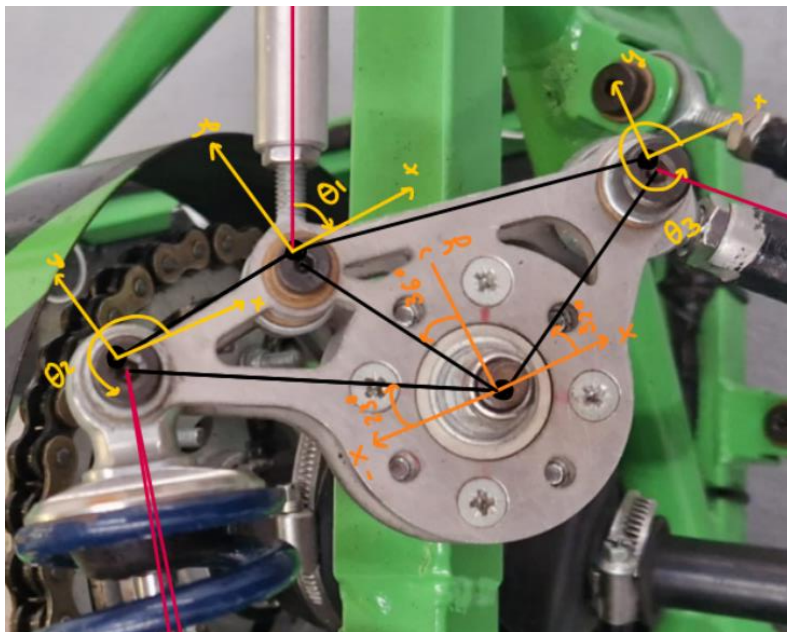


FIGURA 13: Croquis de los ejes y ángulos del rocker, elaboración propia

4.1.3 PRIMERA SIMULACIÓN

Solid Edge, el software escogido para realizar el estudio, presenta un amplio abanico de posibilidades en cuanto a simulaciones y optimización.

Entre las opciones disponibles se encuentra el análisis estático lineal, que permite evaluar la respuesta estructural bajo cargas constantes aplicadas de manera gradual. Este método es ideal para estudiar tensiones y desplazamientos. Otra opción de simulación es el análisis de frecuencia modal, útil para detectar y evitar que las frecuencias naturales del componente coincidan con las excitaciones externas (pieza en resonancia), lo cual es clave en entornos sometidos a vibraciones. La siguiente posibilidad es el análisis dinámico, este amplía las capacidades del estático-lineal al incorporar la variación de cargas en función del tiempo o la frecuencia, incluyendo efectos como la amortiguación y la rigidez variable. Por último, Solid Edge permite realizar análisis térmicos, tanto en condiciones lineales como transitorias, para estudiar el comportamiento del modelo ante flujos de calor o cambios de temperatura, lo que puede ser relevante en piezas expuestas a ambientes exigentes [20].

Para realizar la primera simulación y evaluar el modelo inicial, se ha escogido un estudio estático lineal de manera que se logra comprobar el alcance de las modificaciones. Para ello se han situado las cargas calculadas anteriormente en la pieza y se ha fijado el agujero central. A continuación, se establece el tamaño de malla en 2.5 mm que dividirá la pieza en pequeños triángulos para realizar el análisis y se resolverá la simulación.

Tras avanzar con la simulación se ha obtenido un valor máximo de tensión de Von Mises de 62 Mpa como se muestra en la FIGURA 14: Resultados de la primera simulación. Con este prototipo inicial se logra un coeficiente de seguridad de 8.11 por lo que aún existe un gran margen de mejora.

También se obtienen unos desplazamientos máximos de 0.0369 mm en la zona externa de la izquierda de la pieza.

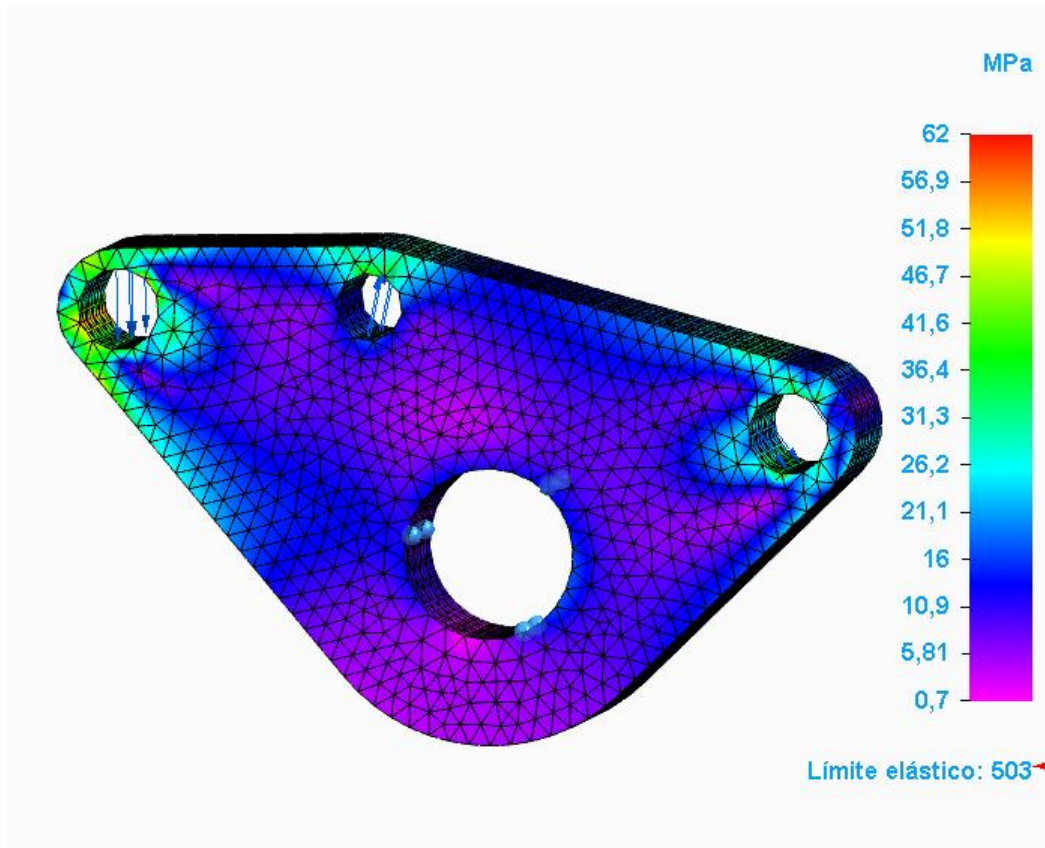


FIGURA 14: Resultados de la primera simulación, elaboración propia

A continuación, se procede a ejecutar el primer estudio generativo. Para ello se van a establecer unas condiciones de contorno iguales a las de las simulaciones. Además, también se establecen parámetros como el porcentaje de reducción de masa.

Para proceder al estudio, se aplican las mismas cargas que en la simulación, según se explica en el ESTADO DE CARGAS. Además, se presenta la Tabla 3: Restricciones de los agujeros referidos a los agujeros de las barras de izquierda a derecha y el central en ese orden.

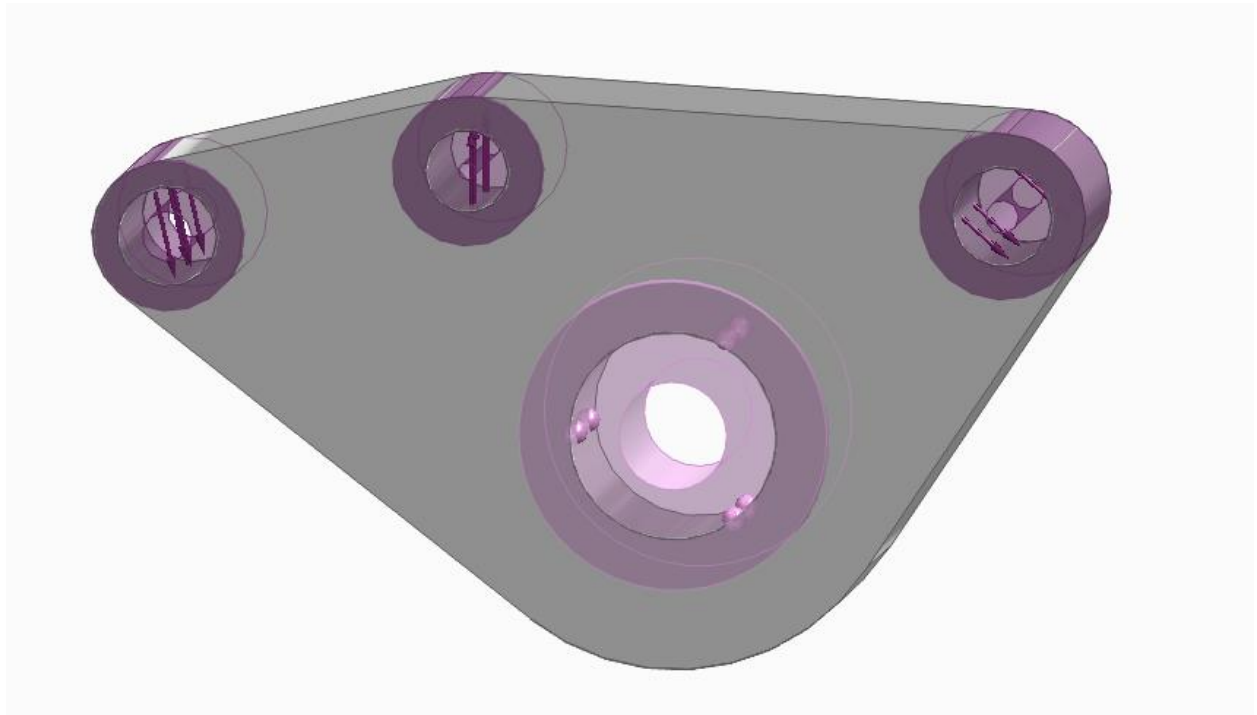


FIGURA 15: Restricción de los agujeros, elaboración propia

Tabla 3: Restricciones de los agujeros, elaboración propia

AGUJERO	RESTRICCIÓN
Izquierda	5937 N con 3 mm de desplazamiento
Medio	5937 N con 4 mm de desplazamiento
Derecha	5937 N con 4 mm de desplazamiento
Central	Fijo con 6 mm de desplazamiento

A continuación, se configuran los parámetros para generar el estudio. Se marca el tamaño de vóxel en 1 mm para lograr un estudio de calidad en un tiempo razonable. Además, se fija un porcentaje

de reducción de masa del 50% para este primer optimizado, de manera que se pasa de una masa del rocker de 310 g a una de 152 g.

Tras establecer los parámetros de simulación, se presenta a continuación en la FIGURA 16: Primer prototipo optimizado, elaboración propia, una imagen del rocker resultante tras el primer estudio generativo.

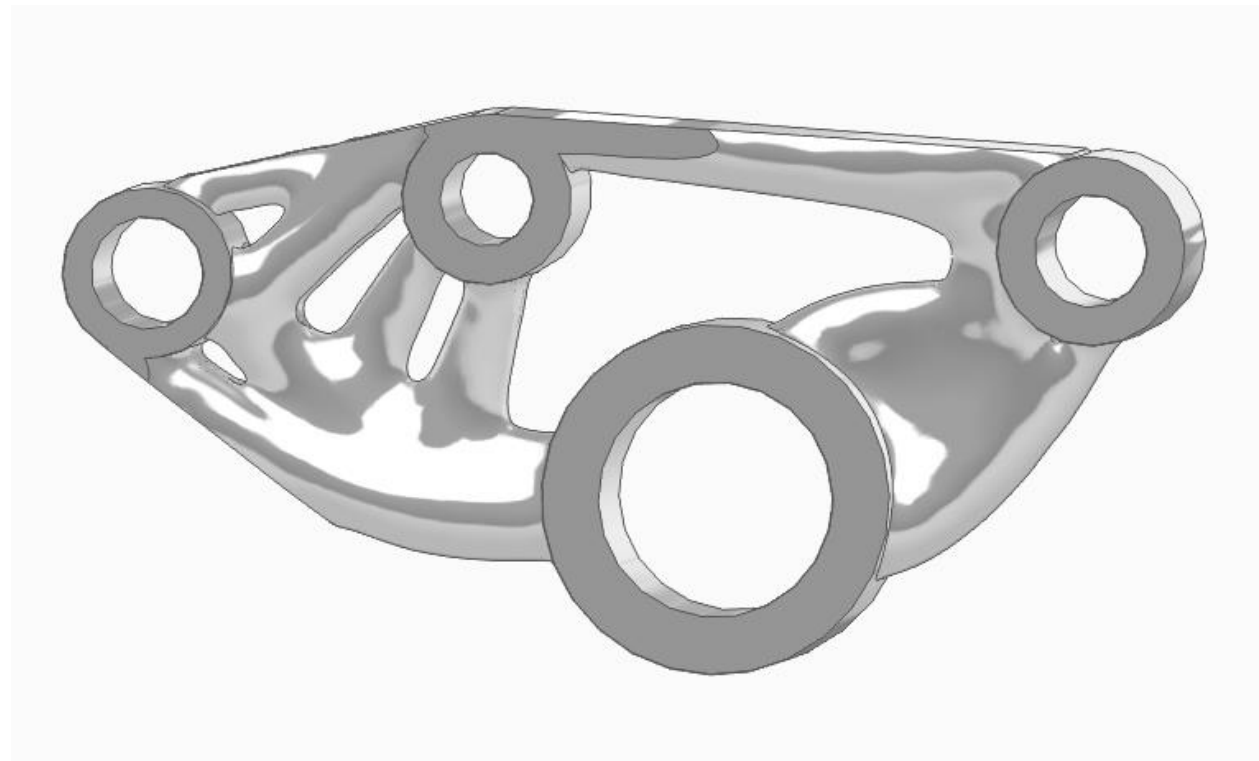


FIGURA 16: Primer prototipo optimizado, elaboración propia

Para continuar, se deben seguir una serie de pasos previos a la validación del diseño, pues el formato del cuerpo no es el adecuado para proceder con la simulación.

Para lograr el objetivo, una vez finalizado el estudio se debe convertir el cuerpo sólido a cuerpo de malla estableciendo una tolerancia de 0.5 y un ángulo de 1° . Este paso se ejecuta para a continuación convertir la malla en un cuerpo de diseño, que son los que permiten ser simulados.

Por último, se debe conmutar la pieza inicial a cuerpo de construcción para evitar inconvenientes durante la simulación de la pieza optimizada.

El siguiente paso es validar el diseño, para ello se realizará el mismo análisis de elementos finitos empleado para validar el prototipo inicial. Se establecen las cargas y las restricciones necesarias en la nueva geometría y se ejecuta la simulación estático-lineal con un tamaño de malla de 2.5 mm.

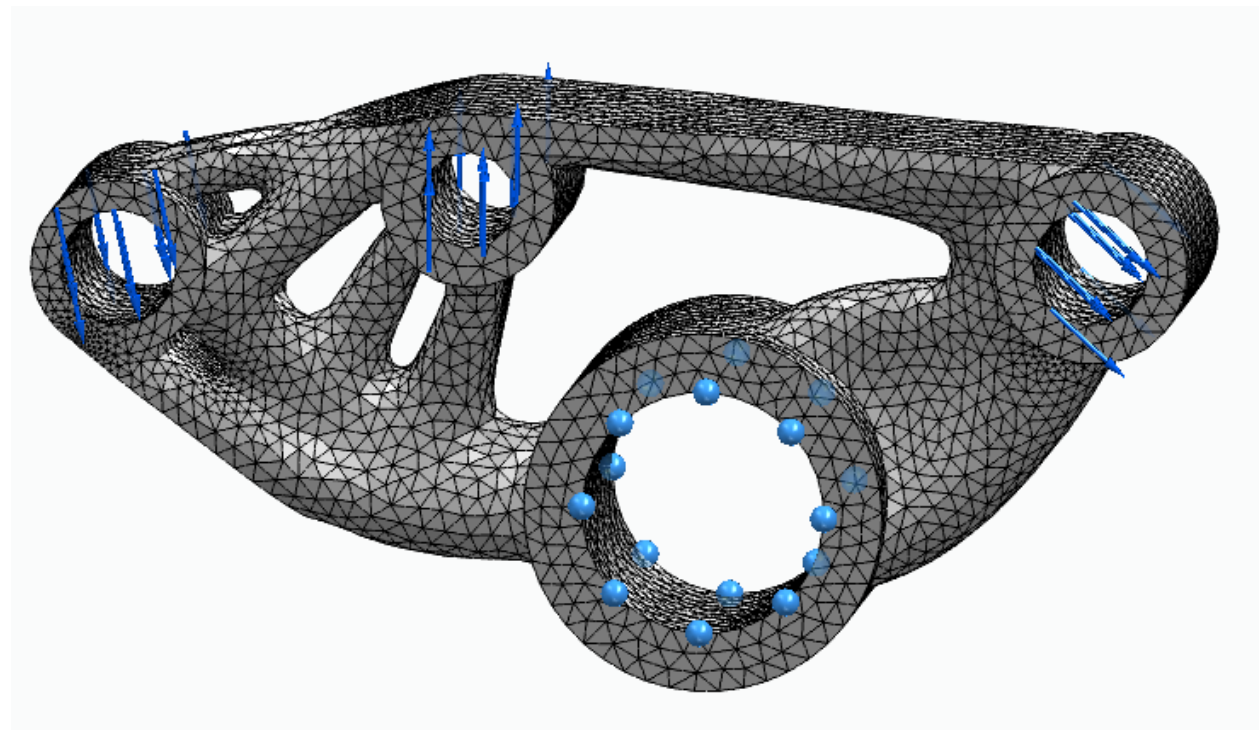


FIGURA 17: Primer prototipo con condiciones de simulación, elaboración propia

Como resultado de la simulación se obtienen una serie de valores como son las tensiones (de Von Mises) y los desplazamientos totales (en mm).

Analizando estos resultados se obtiene que este diseño sufre unas tensiones máximas de 77.4 MPa, mostrado en la FIGURA 18: Resultados de tensiones del primer prototipo, elaboración propia, generando un coeficiente de seguridad de 6.51. Además, el desplazamiento máximo, que ocurre en los extremos de la pieza, son de 0.05 mm, según se muestra en la FIGURA 19: Resultados de desplazamientos del primer prototipo, elaboración propia.

Tabla 4: Comparación entre pieza base y primera optimización, elaboración propia

	Pieza inicial	Pieza optimizada
Tensión de Von Mises	62 MPa	77.4 MPa
Desplazamiento final	0.0369 mm	0.0561 mm
Coeficiente de seguridad	8.11	6.51
Masa	310 g	152 g

Tras observar la Tabla 4: Comparación entre pieza base y primera optimización, se llega a la conclusión de que a pesar de haber reducido aproximadamente un 50% de la masa, las condiciones mecánicas se mantienen generando un coeficiente de seguridad de 6,51, muy superior al establecido.

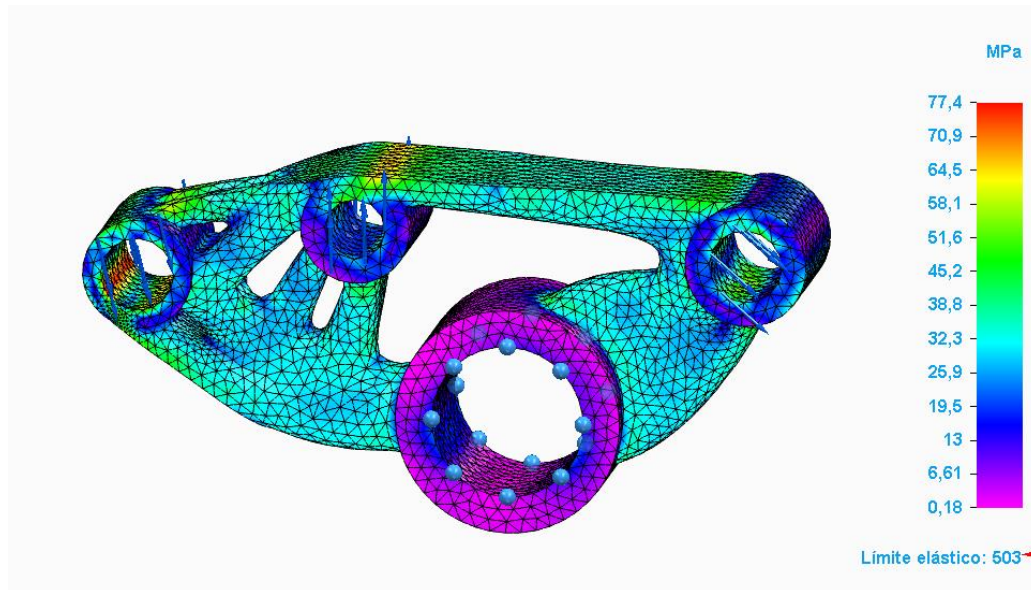


FIGURA 18: Resultados de tensiones del primer prototipo, elaboración propia

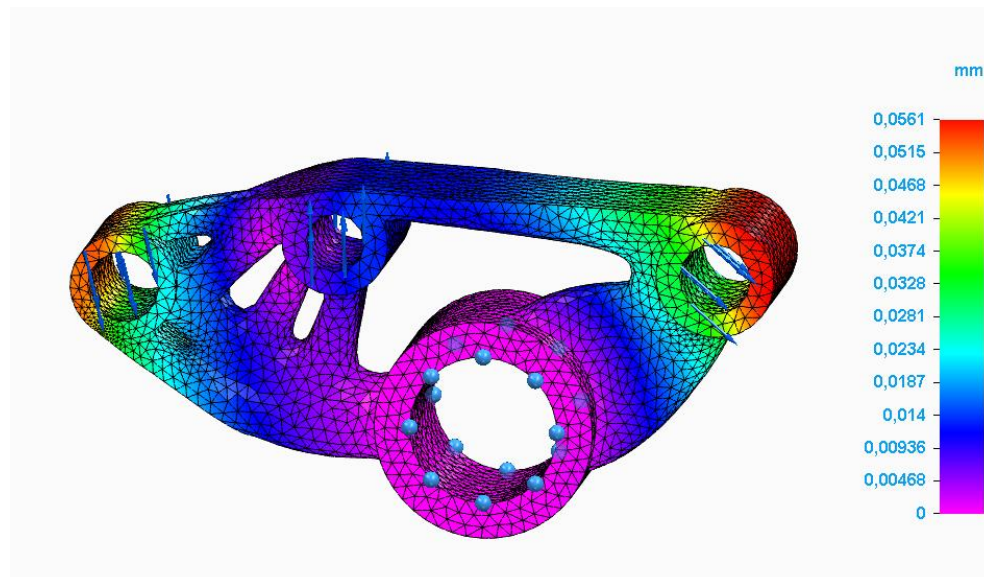


FIGURA 19: Resultados de desplazamientos del primer prototipo, elaboración propia

Tras esta primera optimización ya se observa una reducción de 2 gramos respecto del rocker actual de la fórmula student, sin embargo, aún existe margen para continuar con la optimización y reducción de la masa de la pieza. Por ello, se van a realizar simulaciones de manera progresiva hasta llegar a la pieza final, con un coeficiente de seguridad de aproximadamente 2.

4.1.4 DISEÑO FINAL

Tras realizar reducciones progresivas de la masa de la pieza, se ha obtenido el rocker mostrado en la FIGURA 20: Pieza final, elaboración propia. Se ha realizado un diseño generativo con un porcentaje de reducción de masa de casi 70% respecto de la inicial preservando las regiones que mantienen las barras de suspensión. De esta manera se ha llegado a una pieza de 97 gramos de masa frente a los 310 gramos del prototipo inicial.

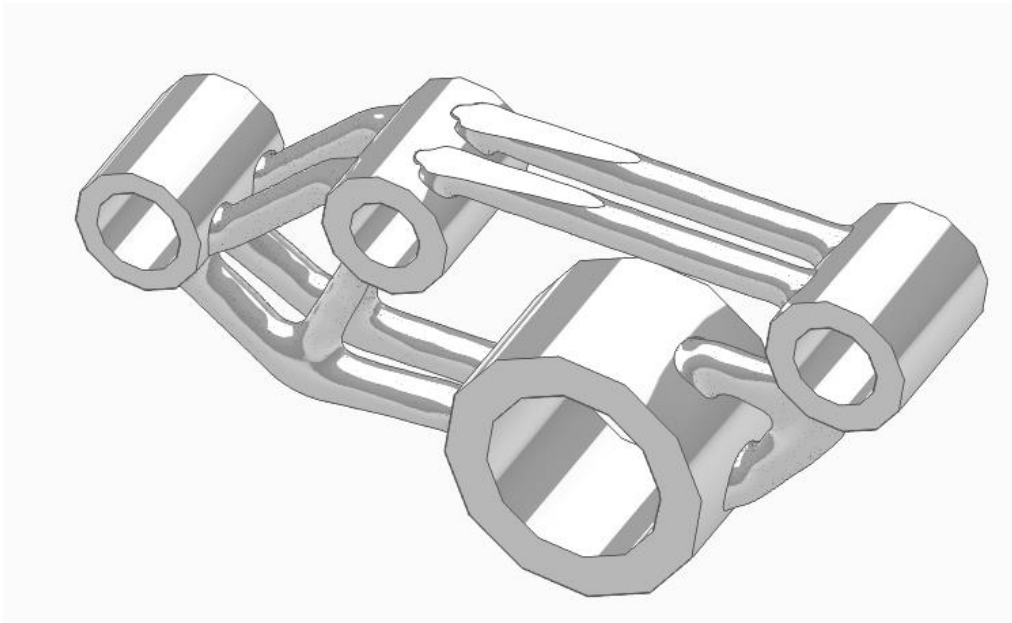


FIGURA 20: Pieza final, elaboración propia

4.1.5 SIMULACIÓN FINAL

Una vez obtenido el diseño optimizado de la pieza, es necesario comprobar que la misma cumple con los requisitos indicados. Para ello se repite el proceso mostrado en el apartado PRIMERA SIMULACIÓN llegando a los siguientes resultados de tensión, desplazamiento y coeficiente de seguridad.

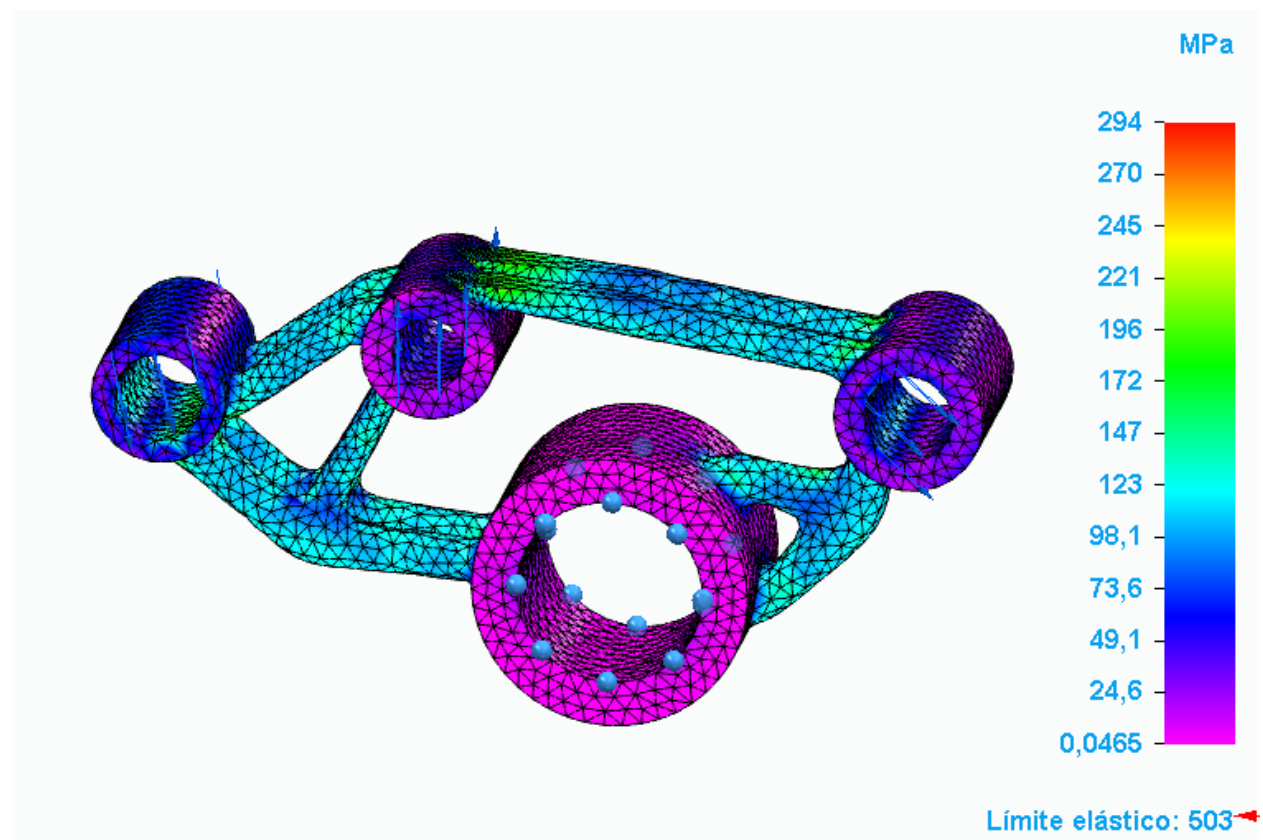


FIGURA 21: Resultados de tensiones de la pieza final, elaboración propia

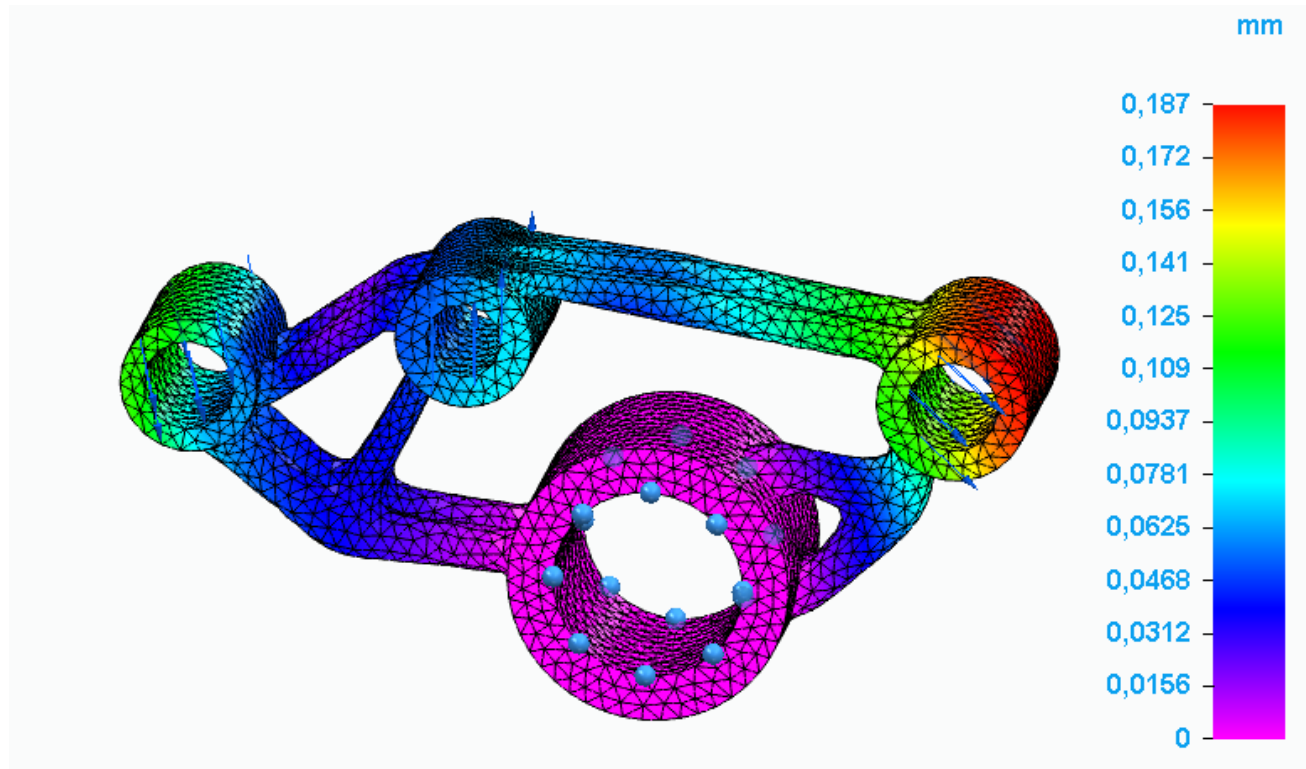


FIGURA 22: Resultados de desplazamientos de la pieza final, elaboración propia

Tabla 5: Comparación entre pieza base y pieza final, elaboración propia

	Pieza inicial	Pieza optimizada
Tensión de Von Mises	62 MPa	294 MPa
Desplazamiento final	0.0369 mm	0.187 mm
Coefficiente de seguridad	8.11	1.71
Masa	310 g	97 g

Según se indica en la Tabla 5: Comparación entre pieza base y pieza final, la tensión de Von Mises máxima que sufre la pieza en condiciones de carga es de 294 MPa, que, frente a los 503 MPa de

límite elástico del material dejan un coeficiente de seguridad de 1,7. Además, se ha obtenido una importante reducción en la masa total respecto de la pieza inicial y el rocker que posee actualmente el equipo, llegando a un diseño de 97 gramos de peso. Por último, Se ha obtenido en la simulación un desplazamiento máximo de menos de 0,2 milímetros.

4.1.6 REFINAMIENTO

Como se observa en la FIGURA 23: Pieza mallada en PolyNurbs, elaboración propia, la pieza final contiene una serie de geometrías que deben ser suavizadas para hacer posible la fabricación final. Para lograr el objetivo, se va a emplear el software de Altair inspire en su apartado de PolyNURBS.

En primer lugar, se debe cargar la pieza optimizada desde SolidEdge en formato STP, de manera que se traslada una nube de puntos que conserva las distancias. Una vez se tiene la pieza cargada y dentro de la herramienta “ajustar” (del apartado de PolyNURBS) se procede al refinamiento. Para ello, se deben ajustar los parámetros adecuados para la creación de la PolyNURB como es el número de polígonos que aparecerán alrededor de la pieza seleccionada, en este caso 500 PolyNURBS. A continuación, una vez creada la malla, se procede a retocar los vértices, las aristas o las caras de la misma.

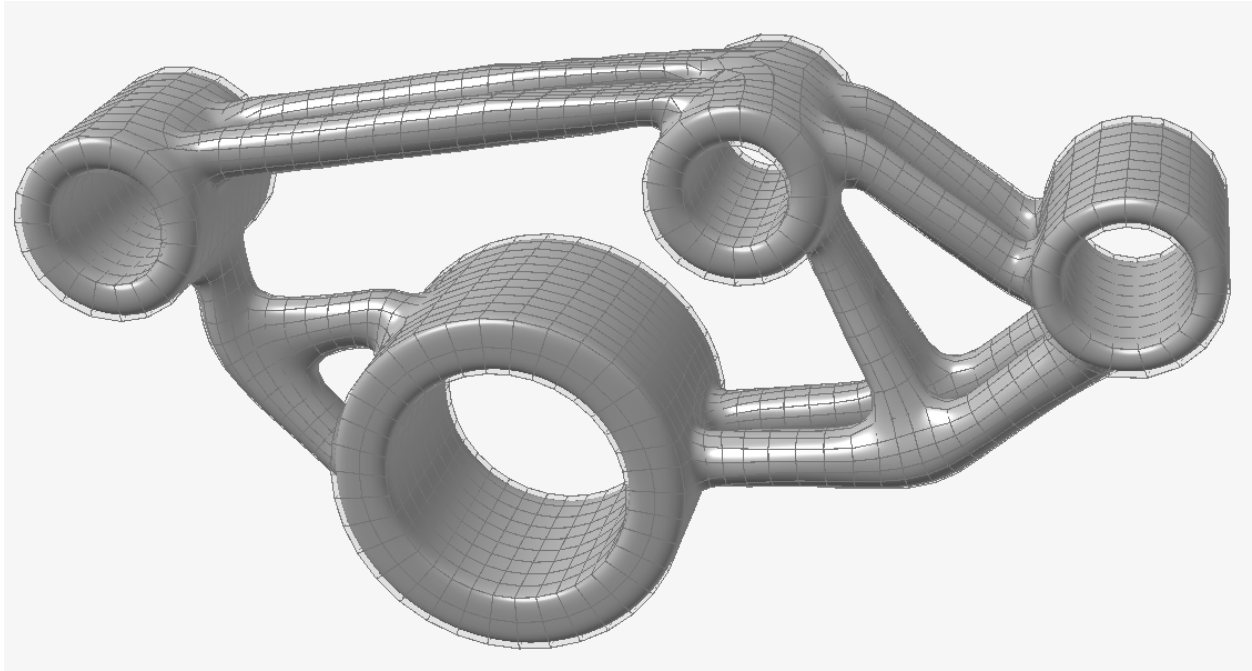


FIGURA 23: Pieza mallada en PolyNurbs, elaboración propia

Uno de los pasos más importantes del refinamiento es seleccionar un número adecuado de Nurbs (polígonos) y suavizar los vástagos, pues estos contienen una geometría irregular que puede complicar en gran medida la fabricación final de la pieza. Para lograr que estos tengan una geometría cilíndrica (sencilla de imprimir), se procede a eliminar las aristas que recorren el vástago dejando solo las de los extremos, que, al unirse, crean una superficie continua en forma de cilindro recto.

Tras realizar estas modificaciones se obtiene la pieza mostrada en la FIGURA 24: Pieza refinada, elaboración propia.

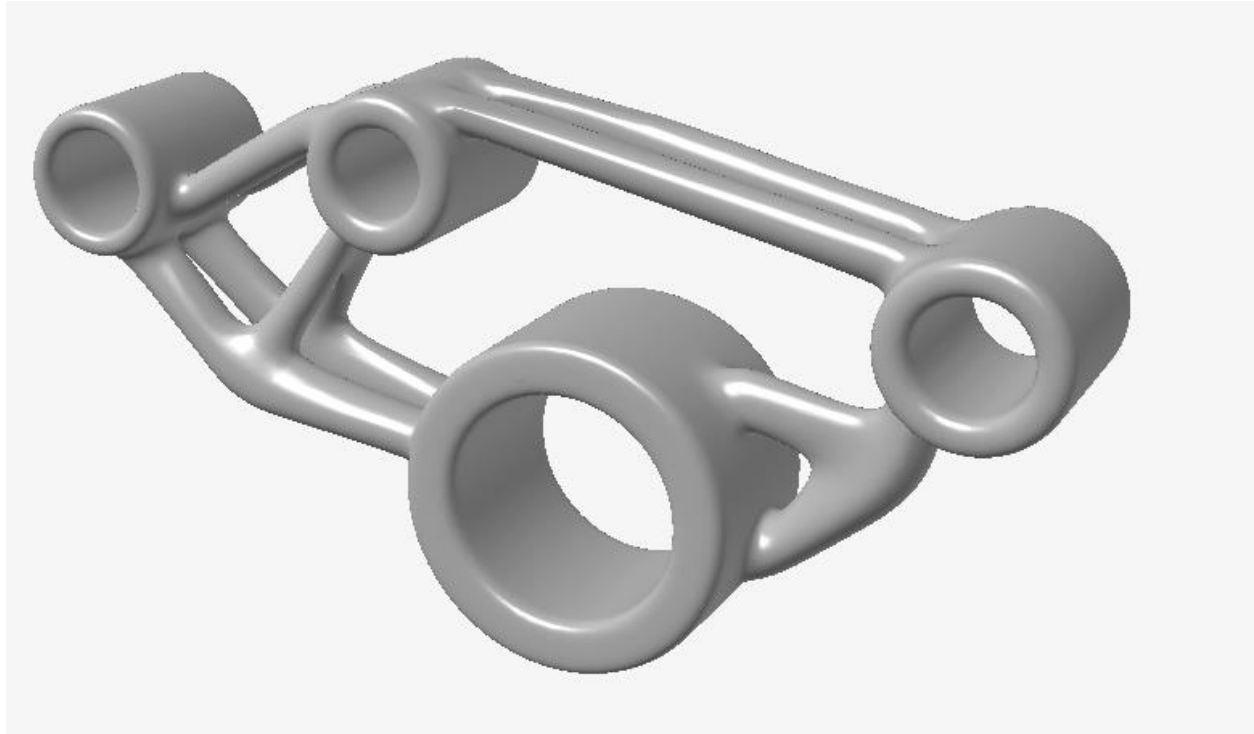


FIGURA 24: Pieza refinada, elaboración propia

Por último, se deben restaurar las regiones fijas que se desean preservar de la pieza original.

Para ello, se debe cargar la pieza original y realizar una serie de cortes y extrusiones. Se extruirán cuatro cilindros macizos de dimensiones mostradas en la FIGURA 9: Boceto inicial del rocker, elaboración propia y se realizará un corte en la pieza original en las mismas regiones que se desean mantener, es decir, en las zonas de anclaje a las barras de la suspensión y en el agujero fijo. Para lograr unir esta parte con la pieza optimizada y suavizada, se realizará una sustracción booleana (con los cilindros macizos) de la geometría obtenida con los PolyNURBS y, posteriormente, una unión booleana (con los cilindros de la pieza inicial) de la pieza resultante de la operación anterior.

Tras realizar estas operaciones se obtiene la pieza final, mostrada en la FIGURA 25: Pieza final para fabricación, elaboración propia, que se exportará en formato STL para su posterior laminación y fabricación en el laboratorio.

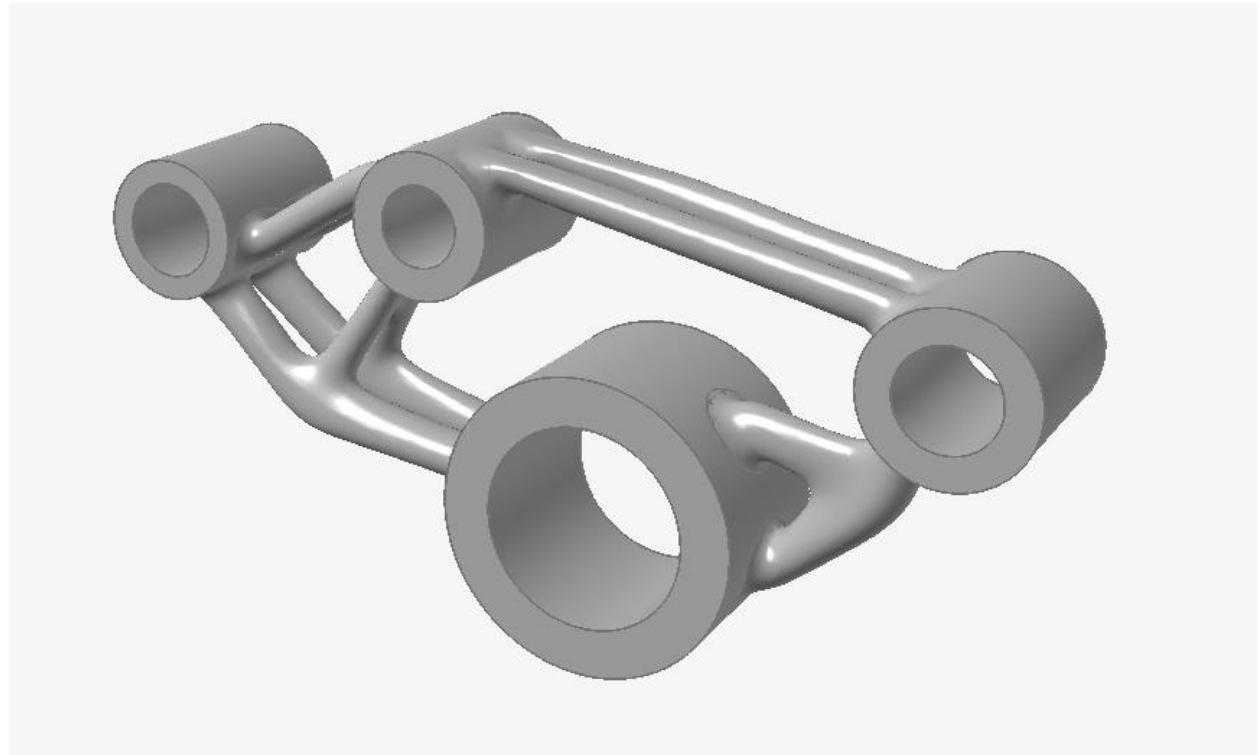


FIGURA 25: Pieza final para fabricación, elaboración propia

4.1.7 VERIFICACIÓN

Por último, en cuanto al diseño del rocker final, se debe realizar una última verificación de la pieza refinada, ya que el prototipo que se simuló ha sufrido algún cambio. Esta simulación se realiza igual que las anteriores, mediante un análisis de elementos finitos en Solid Edge, situando las cargas y condiciones iniciales de simulación. Sin embargo, estos cambios son mínimos y apenas han alterado la geometría, en ciertos lugares, incluso ha sido reforzada.

Por ello, se va a suponer que tras simular de nuevo el prototipo, se cumplen las condiciones indicadas inicialmente y se puede proceder a la fabricación final.

4.1.8 IMPRESIÓN

Una vez refinada la pieza, se procede al último paso de preparación para el método escogido de fabricación aditiva.

Este paso es el laminado por capas del rocker final y para ello, se empleará el software de UltiMaker-Cura, escogiendo el material adecuado, en este caso PLA.

Para realizar la impresión se deben tener en cuenta una serie de variables de impresión que van a permitir fabricar la pieza con mayor precisión.

Se establece como calidad 0.2 mm, esta variable se encarga de establecer el grosor máximo de capa en las que se va a dividir la pieza a la hora de imprimir. Además, también se incluyen parámetros como el número de capas de pared y fondo, en este caso tres en cada una de ellas. Por último, en cuanto a parámetros a establecer, se fija un relleno del 20% en volumen y forma de rejilla.

Todas estas variables de impresión se fijan en la pestaña de ajustes de impresión, como se muestra en la FIGURA 26: Variables de impresión, elaboración propia y en la FIGURA 27: Otras variables de impresión, elaboración propia.

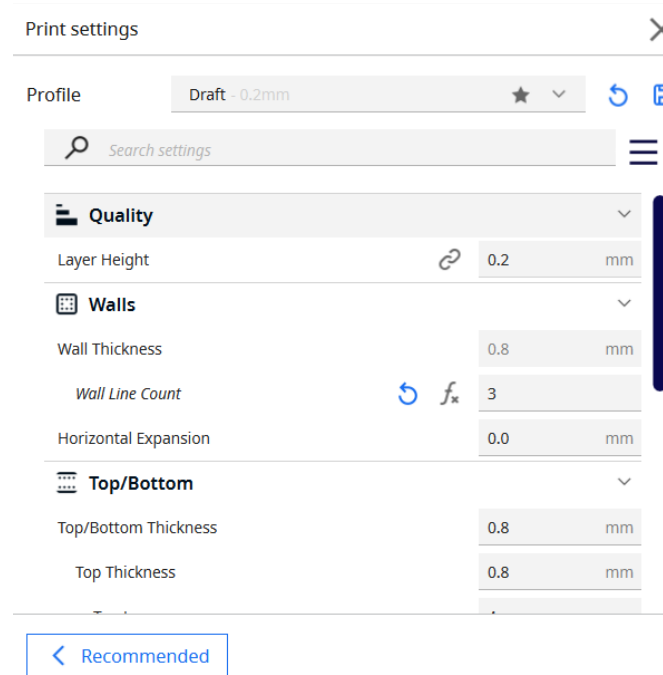


FIGURA 26: Variables de impresión, elaboración propia

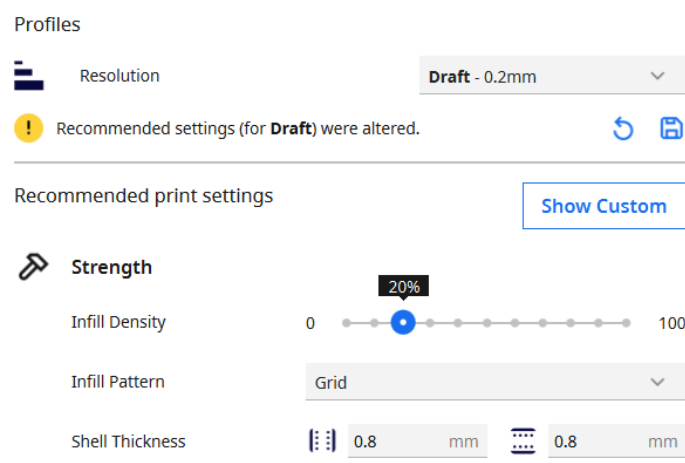


FIGURA 27: Otras variables de impresión, elaboración propia

Se carga la pieza refinada en formato STL y se selecciona la impresora con la que se va a fabricar, en este caso, la Hp MJF cuya ficha técnica se incluye en el anexo FICHA TÉCNICA DE LA IMPRESORA. El propio software se encarga de diseñar los pasos necesarios durante el proceso y genera un desplegable con una estimación de tiempo y material necesario, como se muestra en la FIGURA 28: Resultados de la simulación mediante impresión 3D.

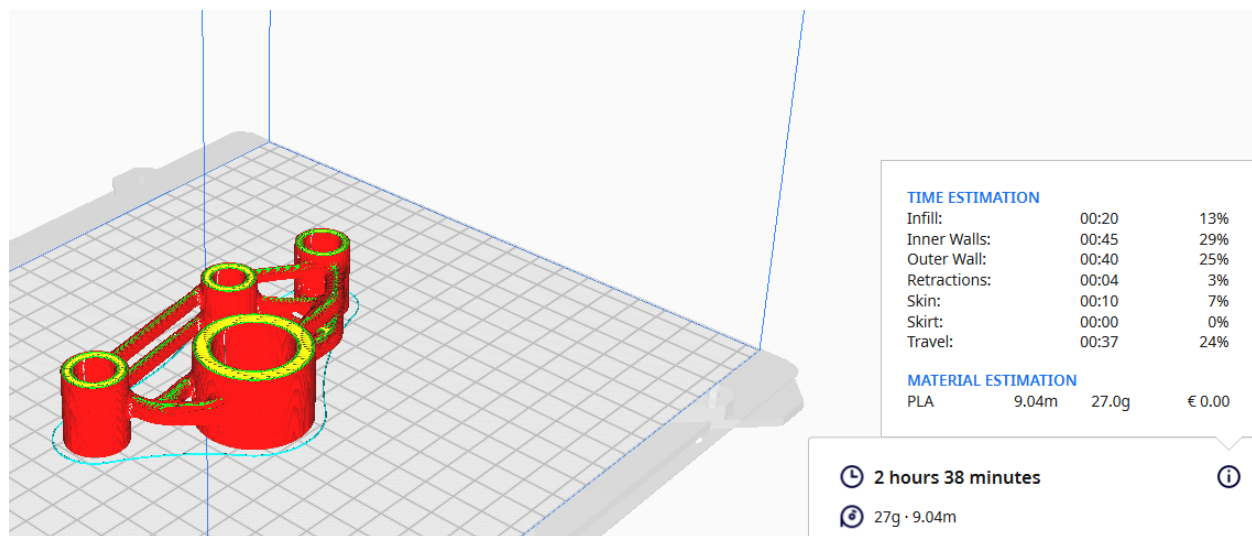


FIGURA 28: Resultados de la simulación mediante impresión 3D, elaboración propia

UltiMaker-Cura también genera una animación del proceso total de la impresión donde se pueden observar las diferentes capas que componen el diseño final, como se muestra en la FIGURA 29: Etapa de la impresión 3D.

Una vez terminado el laminado de la pieza, ya se puede exportar a la impresora para la fabricación final.

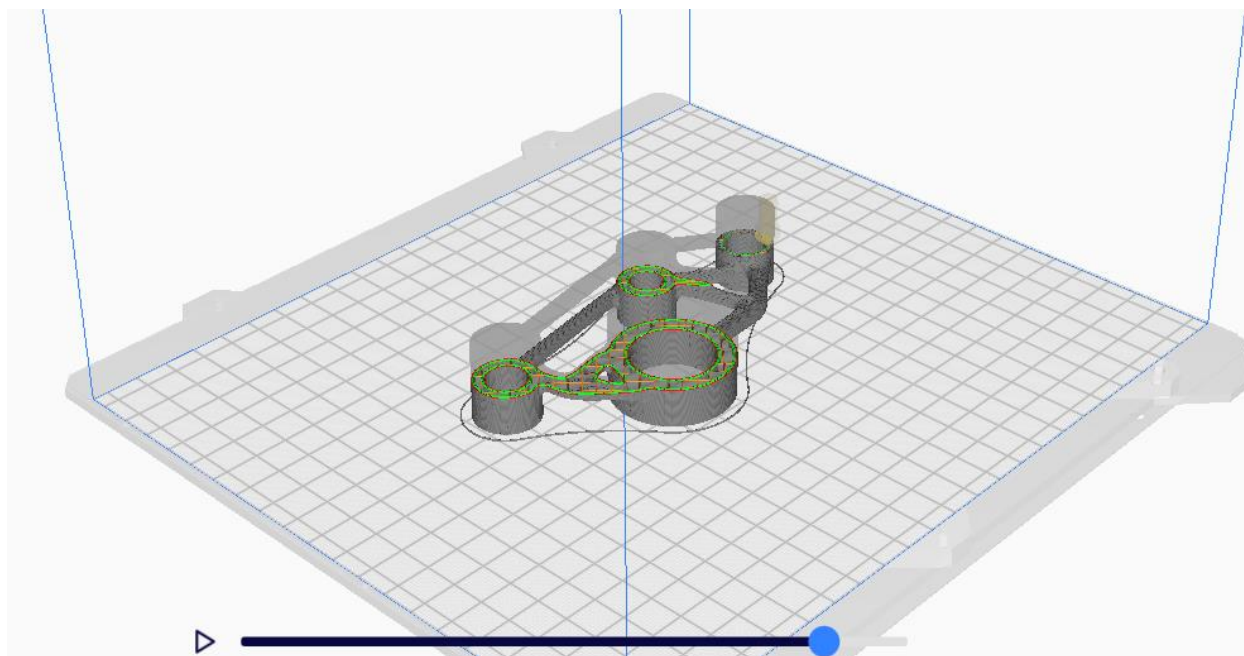


FIGURA 29: Etapa de la impresión 3D, elaboración propia

CAPÍTULO 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Una vez concluido el proceso de diseño, optimización y fabricación de los prototipos mediante tecnologías de fabricación aditiva, resulta muy interesante evaluar de forma objetiva los resultados obtenidos.

En este capítulo se tiene como finalidad analizar el comportamiento estructural de los prototipos fabricados, su viabilidad funcional dentro del conjunto del monoplaça de Fórmula Student, y su adecuación a los requisitos establecidos durante la fase de diseño. Para ello, se presentan los resultados extraídos de simulaciones y validaciones anteriores, junto con otros aspectos observados durante el proceso de impresión. Además del análisis técnico, se va a realizar una estimación detallada de los costes asociados al proceso de fabricación, incluyendo el consumo de material, los tiempos de impresión, y otros requerimientos de postprocesado y posibles iteraciones de rediseño. Este estudio económico permite comparar la fabricación aditiva frente a otros métodos tradicionales y valorar su viabilidad dentro del contexto de un proyecto de ingeniería orientado a la competición.

5.1 ANÁLISIS DE COSTES

Con el objetivo de evaluar la viabilidad económica del prototipo final, esta sección analiza los costes asociados a su fabricación tanto en el entorno del laboratorio universitario como en varias empresas externas especializadas en impresión 3D. Esta comparación permite valorar tanto el impacto económico de cada alternativa como otros aspectos clave (el tiempo de producción, la calidad del acabado, la capacidad de postprocesado y la eficiencia en el uso de materiales).

5.1.1 COSTES INTERNOS

Para analizar los costes internos de producción, se ha considerado la fabricación del rocker trasero dentro del laboratorio universitario, utilizando una impresora HP con tecnología Multi Jet Fusion (MJF) cuya ficha técnica se incluye en el anexo FICHA TÉCNICA DE LA IMPRESORA. Este análisis de costes permite tener un control más directo sobre el proceso de fabricación. Los costes asociados a este entorno incluyen principalmente el material utilizado (PLA) la energía consumida durante el proceso de impresión, el tiempo de uso de la máquina, y las tareas de postprocesado, como la limpieza del polvo residual y de la máquina.

También se deben tener en cuenta los costes indirectos, como el mantenimiento de la impresora, el desgaste de componentes y las horas de trabajo del personal técnico. Aunque el coste unitario puede parecer menor al no existir una facturación externa por servicio, es importante considerar que la producción en laboratorio no siempre garantiza el mismo acabado y la misma calidad que una empresa profesional. Sin embargo, para proyectos académicos como el presente, la fabricación interna con tecnología MJF representa una alternativa rápida y flexible, rentable para la producción de prototipos funcionales, especialmente cuando se prioriza la experimentación y el aprendizaje técnico.

Para realizar el cálculo de los costes, se va a utilizar el método de bitfab [21]. Para ello, en primer lugar se deben establecer los datos del servicio. En primer lugar, los datos de la impresora, con un coste de 80000€ y 5 años de amortización. Además, se establecen datos estándar como son 8 horas de uso de la máquina, equivalente a una jornada laboral, un coste de personal de 20 €/hora y un coste del PLA de también 20 €/hora. Se obtiene un precio de 0.12 € por cada kilovatio/hora. Por último, la potencia media de la impresora se obtiene de la ficha técnica incluida en el FICHA TÉCNICA DE LA IMPRESORA.

Se muestra a continuación el conjunto de los datos necesarios para realizar los cálculos en la Tabla 6: Datos del servicio, elaboración propia, y los resultados del coste del servicio en la Tabla 7: Cálculo de los costes del servicio, elaboración propia.

Tabla 6: Datos del servicio, elaboración propia

Datos del servicio		
Coste de la impresora	80000	[€]
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	6,3	[kW]
Coste de material	20	[€/kg]
Coste por hora de personal	20	[€/h]

Tabla 7: Cálculo de los costes del servicio, elaboración propia

Cálculo de los costes del servicio	
Costes pedido	
Coste por hora preparación/postprocesado	20 [€]
Costes por hora de impresión	
Coste de amortización de la impresora	8,00 [€/h]
Coste de la electricidad	0,32 [€/h]
Coste por hora total	8,32 [€/h]
Costes de consumibles	
Coste de material	20 [€/kg]

Posteriormente se van a calcular los costes del pedido. Se establece un tiempo medio de preparación del pedido de 2 horas. Los datos de la pieza se han obtenido de la simulación en el apartado de IMPRESIÓN, con un tiempo de 2,56 horas y una masa de 0,027 kg. Se desea calcular el coste unitario, por lo que se establece el volumen de pedido en 1 unidad.

Tabla 8: Datos del pedido y de la pieza, elaboración propia

Datos del pedido		
Tiempo de preparación/postprocesado	2	[h]
Datos de la pieza		
Tiempo de impresión	2,56	[h]
Masa	0,027	[kg]
Cantidad	1	[u]

Se han realizado los cálculos del coste de pedido y se incluyen a continuación en la Tabla 9:
Costes del pedido.

Tabla 9: Costes del pedido, elaboración propia

Coste de pedido	
Costes de pedido	
Preparación/postprocesado del pedido	40 [€]
Coste de la pieza	
Material	0,54 [€/u]
Horas de impresión	21,29 [€/u]
Coste por pieza	21,83 [€/u]
Coste de todas las piezas	21,83 [€]
Costes totales del pedido	
Coste total del pedido	61,83 [€]
Cada unidad adicional	21,83 [€]

5.1.2 COSTES EXTERNOS

En cuanto a la fabricación mediante empresas externas, se ha analizado el coste del prototipo mediante plataformas especializadas como Xometry e i.materialise, dos de las más reconocidas en el ámbito de la fabricación aditiva. Estas compañías ofrecen presupuestos automáticos a partir de la subida de archivos CAD en formato STL o STEP, permitiendo al usuario seleccionar el material, la tecnología de impresión y el acabado superficial deseado. Estas empresas tienen una alta gama de posibilidades, las cuales son imposibles de alcanzar en el laboratorio.

En el caso concreto del *rocker* trasero que se ha diseñado, el uso de PA12 mediante tecnología MJF ha sido una de las opciones más recomendadas por su resistencia mecánica, buena precisión dimensional y coste competitivo. A través de estas plataformas, se puede observar cómo los costes se ven influidos directamente por factores como el volumen de la pieza, la orientación de impresión, el tiempo estimado de fabricación, los requisitos de postprocesado y el volumen de producción de piezas, ya que el coste unitario puede ser más elevado en comparación con una producción en serie.

En primer lugar, se carga la pieza en la página web de ProtoLabs Network. Se selecciona la tecnología deseada, en este caso MJF, y a continuación se obtiene el presupuesto.

Se observa en la FIGURA 30: Costes proporcionados por la empresa Protolabs, elaboración propia, que el coste unitario de la pieza es de 31.9 €, sin embargo, se agregan cargos adicionales que elevan el coste de la pieza hasta 114.96 € ya que existe un valor mínimo de pedido para que la empresa rentabilice la fabricación. Además, se le debe sumar el coste de envío, por lo que el precio final llega a ser de 129.96 €.

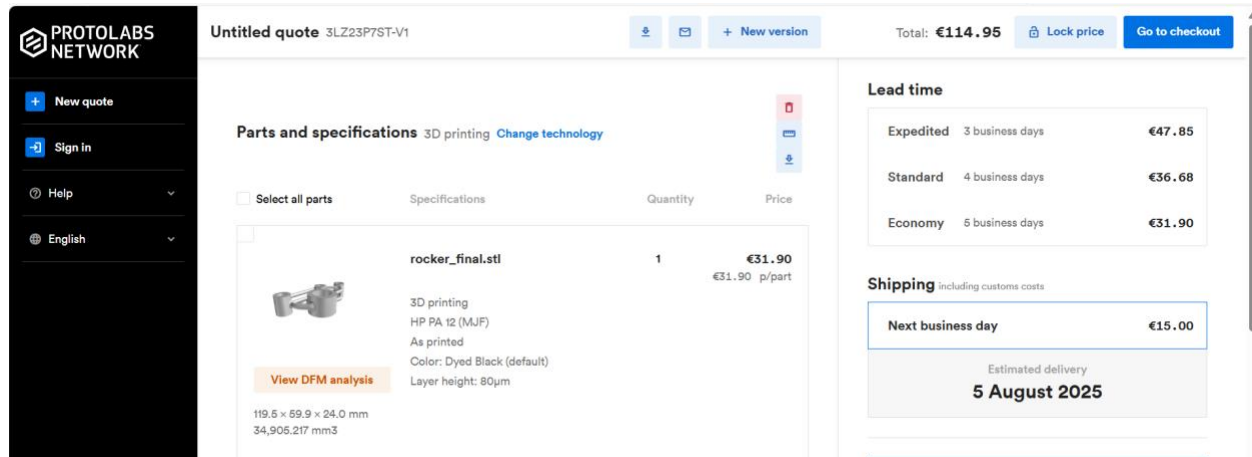


FIGURA 30: Costes proporcionados por la empresa Protolabs, elaboración propia

A continuación, se va a realizar el mismo análisis para la empresa Xometry.

Como se observa en la FIGURA 31: Costes proporcionados por la empresa Xometry, elaboración propia, de nuevo se está analizando el coste de un único rocker. En este caso, se obtiene un coste unitario un poco más elevado, de 35.88 €. Sin embargo, esta empresa no cuenta con un recargo para llegar hasta el valor mínimo de pedido, por lo que teniendo en cuenta el precio del envío, el precio total asciende a 42.70 €, un precio mucho menor que el anterior.

① Sugerencia: Por favor, añada su información de facturación y envío.

Información de facturación

[Añadir cuenta de facturación](#)

Información de envío

Spain

[Añadir dirección de envío](#)

Detalles del pedido

#	Ficheros	Nombre del cargo	Muestras	Cant.	Precio unitario	Precio pos.
10		rocker_final.stl 3D Printing MJF - HP Multi Jet Fusion Nylon PA12 Gray / Whitish (MJF)	-	1	35,88 €	35,88 €
Coste del transporte						0,00 €
Total neto:						35,88 €
IVA (19%):						6,82 €
Valor total del pedido:						42,70 €

Resumen del pedido:

Fecha de envío: ① 7 días laborables

1 pieza (1 pza): 35,88 €

Gastos de envío (Spain): 0,00 €

 Envío gratuito

Aplicar código promocional [+](#)

✉ Ahorre 7% en este pedido

[Suscríbete](#) a nuestro boletín de noticias con ofertas especiales y descuentos y reciba un código de descuento inmediatamente.

Valor del pedido (neto) 35,88 €

IVA (19%) 6,82 €

Valor del pedido Incl. IVA 42,70 €

Pago (EUR):  Incl. IVA **42,70 €**
Ganará 36 X-points ①

⚠ Por favor, introduzca sus datos de facturación y envío para continuar.

FIGURA 31: Costes proporcionados por la empresa Xometry, elaboración propia

Por último, se va a obtener el presupuesto de la empresa i-materialise.

Como se muestra en laFIGURA 32: Costes parciales proporcionados por la empresa i-materialise, elaboración propia e propia, en este caso se obtiene un presupuesto para una única pieza de 24.28 €, sin embargo, vuelve a existir un pedido mínimo de 40 €. Tras tener en cuenta estos recargos y el precio del envío, el coste del rocker llega a ser 64.13€.

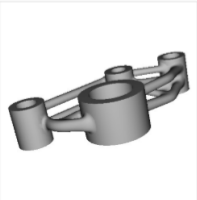
 Minimum order amount is EUR 40.00. There is room for more items in your cart.				
ITEM	DETAILS	QUANTITY	UNIT PRICE	TOTAL PRICE
	rocker_final.stl 119.48 x 59.87 x 24.00 mm  Polyamide (MJF) Natural	- 1 +	24.28 €	24.28 € 
 UPLOAD SINGLE FILE  UPLOAD MULTIPLE FILES  ADD RECENT MODELS				
Expected Shipment Date		August 1		Subtotal 24.28 € VAT excluded

FIGURA 32: Costes parciales proporcionados por la empresa i-materialise, elaboración propia

Total

Subtotal	24.28 €
Minimum order charge 	15.72 €
Shipping	13.00 €
VAT (Do I have to pay VAT?)	11.13 €
Total:	64.13 €

FIGURA 33: Costes totales proporcionados por la empresa i-materialise, elaboración propia

5.1.3 COMPARACIÓN

Mientras que la fabricación en el laboratorio puede resultar más accesible y flexible para iteraciones rápidas durante el desarrollo del proyecto, la fabricación en una empresa externa ofrece procesos más estandarizados, mayor capacidad de producción y calidad industrial. Este análisis resulta fundamental para determinar la mejor estrategia de fabricación en función del contexto del proyecto y su posible escalabilidad hacia la producción de componentes reales para competición.

A continuación, se muestra una tabla con los datos del laboratorio y de las tres empresas externas que facilita la comparación de los costes de fabricación según el lugar o la empresa donde se fabrique.

Tabla 10: Comparación de costes finales, elaboración propia

COMPARACIÓN				
Lugar de fabricación	Metodo	Material	Precio total [€]	Tiempo de envío [días]
Laboratorio	MJF	PLA	61,83	0
Empresa Protolabs	MJF	PA12	129,96	11
Empresa Xometry	MJF	PA12	42,7	7
Empresa i-materialise	MJF	Poliamida	64,13	9

Tras observar los resultados mostrados en la Tabla 10: Comparación de costes finales, se llega a la conclusión de que la fabricación en laboratorio es la opción especialmente adecuada para componentes funcionales listos para ser instalados en un entorno real de competición. Esto es debido a que el precio unitario puede llegar a ser similar al de empresas externas y la calidad que se obtiene en el proceso es suficiente para el proyecto deseado. A todo esto se le suma la rapidez de entrega, factor importante a tener en cuenta a la hora de fabricar o recibir una pieza.

5.2 ANÁLISIS TÉCNICO

Una vez finalizadas las simulaciones y fabricadas las piezas, se procede a realizar un análisis técnico de los resultados.

El rocker inicial parte de un conjunto de dos piezas base mostradas en la FIGURA 34: Rocker actual impreso en 3D, elaboración propia, unidas a través de un inserto y ocho tornillos de cabeza avellanada. Esta pieza en total tiene una masa de 154,7 gramos.



FIGURA 34: Rocker actual impreso en 3D, elaboración propia

Para proceder a las simulaciones, se ha transformado esta pieza base en una maciza del mismo espesor total (24 mm) para dar más espacio a geometrías propias de la optimización topológica (menos geométricas y tradicionales). De esta primera modificación se obtiene el prototipo inicial, mostrado en la FIGURA 35: Rocker inicial impreso en 3D, elaboración propia, cuya masa son 310 gramos.

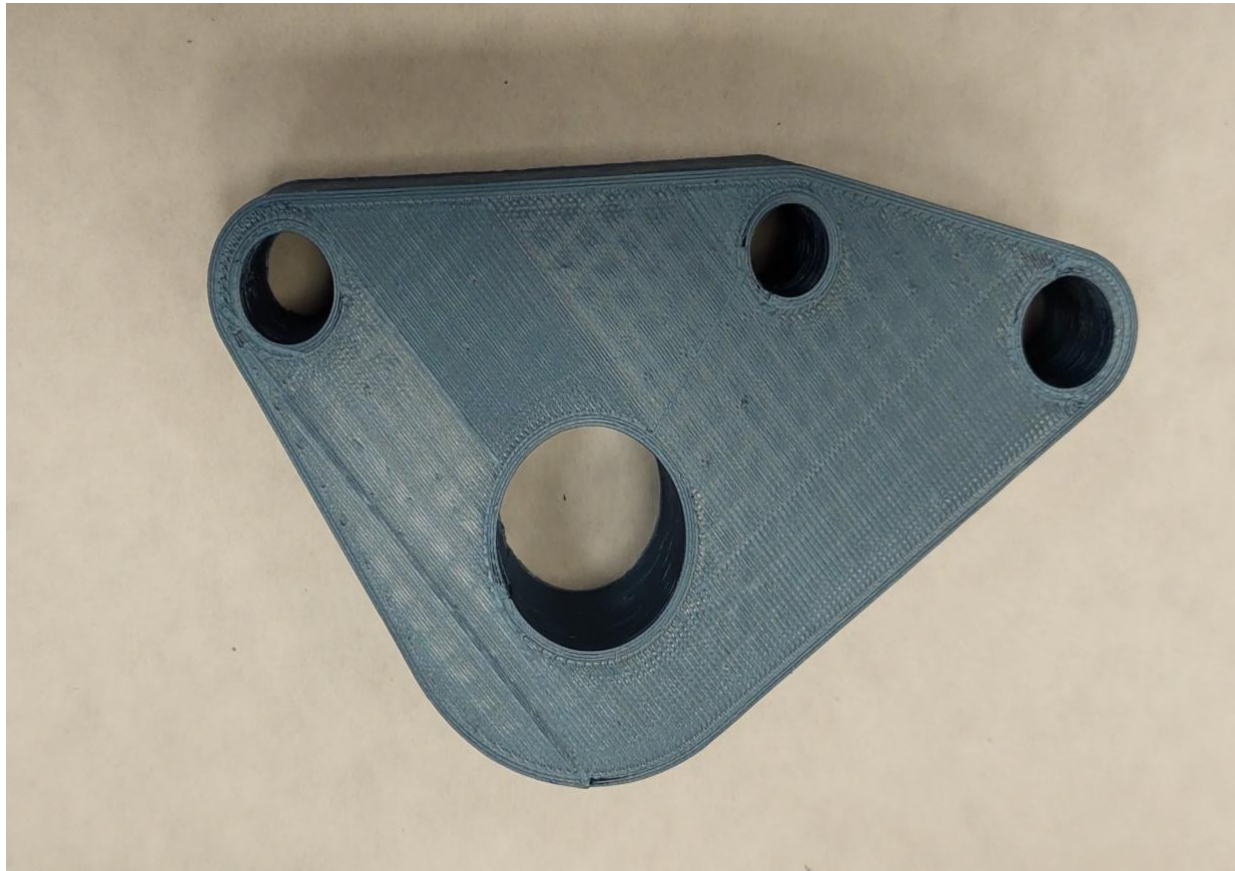


FIGURA 35: Rocker inicial impreso en 3D, elaboración propia

Tras cumplir con el proceso iterativo, se ha llegado al rocker mostrado en la FIGURA 36: Rocker final impreso en 3D, elaboración propia, cuya masa total es de 97 gramos. Este prototipo final sufre una carga máxima de 294 MPa, lejos de los 503 MPa de límite elástico, generando así un coeficiente de seguridad de 1,7.

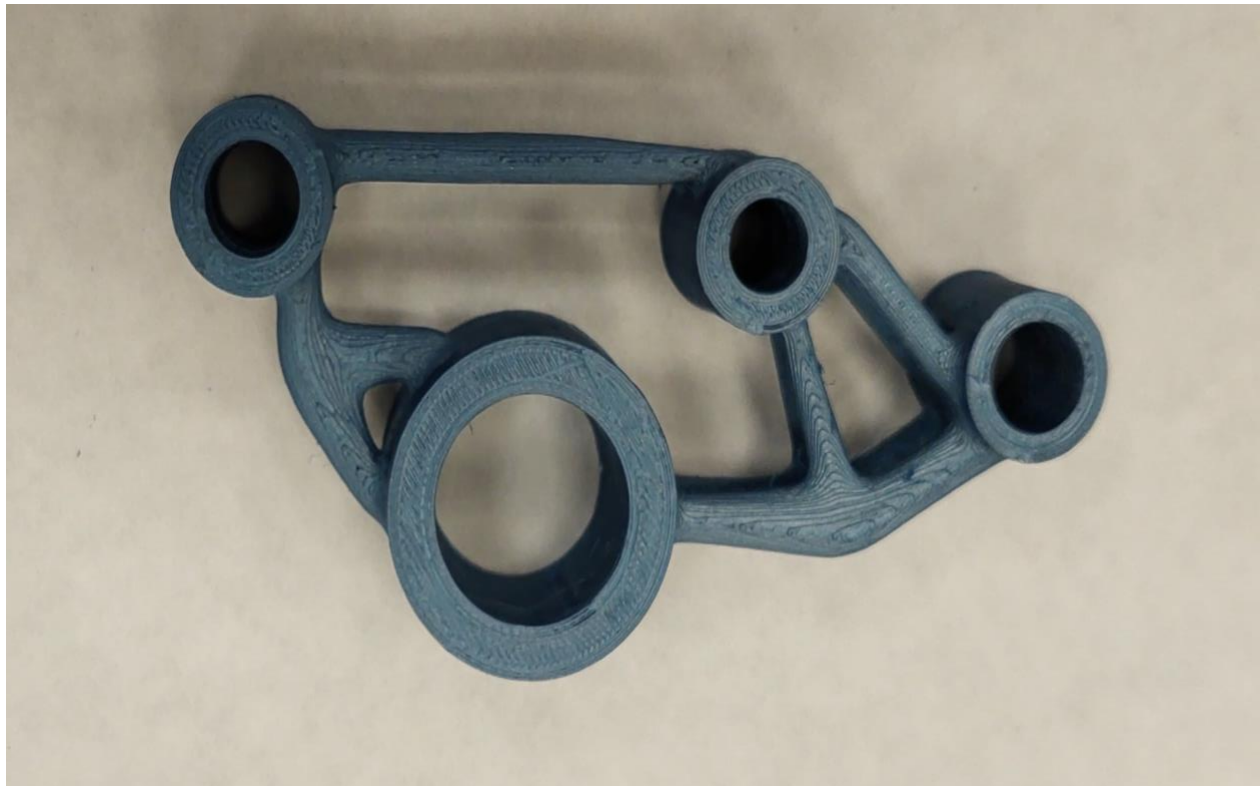


FIGURA 36: Rocker final impreso en 3D, elaboración propia

Para lograr un mejor acabado, se ha suavizado la geometría mediante el software de Altair Inspire y se obtiene la pieza mostrada en la FIGURA 37: Rocker final suavizado impreso en 3D, elaboración propia.

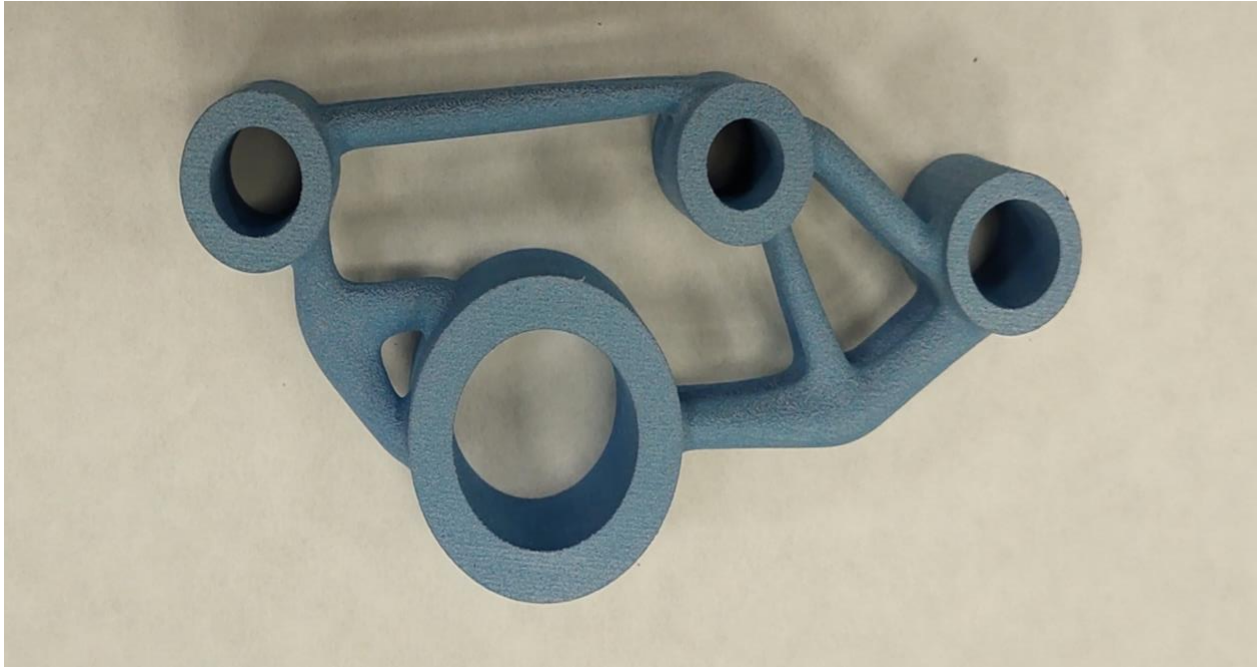


FIGURA 37: Rocker final suavizado impreso en 3D, elaboración propia

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

6.1 CONCLUSIONES

El presente Trabajo Fin de Grado ha permitido abordar de forma completa el rediseño, el análisis estructural y la fabricación de un componente funcional de uso final del sistema de suspensión de un monoplaza de Fórmula Student. Esto se ha logrado aplicando metodologías avanzadas de ingeniería como el diseño generativo y la fabricación aditiva.

A partir del estudio detallado del rocker trasero, se ha logrado desarrollar una pieza significativamente más ligera, con una reducción del 70 % respecto al diseño inicial y del 40 % en comparación con el componente actualmente en uso, sin comprometer su integridad estructural ni funcional. Este resultado ha sido posible gracias al empleo de herramientas de diseño asistido por ordenador tales como Solid Edge y Altair Inspire, que han permitido llevar a cabo simulaciones por elementos finitos (FEA), optimización topológica, validación estructural y preparación para una futura fabricación.

Asimismo, el uso de impresión 3D ha demostrado ser una alternativa altamente eficaz para el prototipado y validación rápida de componentes mecánicos, con claras ventajas en términos de reducción de tiempos, costes de iteración y libertad geométrica.

Para profundizar en sus costes, se ha realizado el análisis comparativo entre los costes de fabricación interna en laboratorio (mediante tecnología HP Multi Jet Fusion) y la fabricación externa con empresas especializadas como Protolabs, Xometry o i.materialise que han permitido valorar la viabilidad económica del proceso, destacando los beneficios de la producción interna en

fases de desarrollo y la rapidez de entrega a pesar de la mayor calidad industrial obtenida con servicios externos en fases finales.

Además, el proyecto contribuye a los Objetivos de Desarrollo Sostenible, promoviendo prácticas de fabricación más responsables, optimizando el uso de materiales y fomentando la innovación tecnológica en el ámbito del diseño y la ingeniería mecánica.

En conjunto, el trabajo realizado demuestra que es posible aplicar de manera eficaz tecnologías emergentes al diseño de componentes de uso real en contextos exigentes como la competición automovilística, abriendo nuevas posibilidades para el futuro de la ingeniería.

6.2 PROYECTOS FUTUROS

De cara a futuros desarrollos, este proyecto plantea una base sobre la cual se pueden desarrollar nuevas líneas de investigación y aplicación práctica.

Una de las más interesantes sería la fabricación del componente optimizado mediante otra técnica de impresión 3D metálica, como puede ser la fabricación en el aluminio 7075-T6, seleccionado para realizar las simulaciones. La técnica escogida puede ser el sinterizado selectivo por láser de metal (SLS), presentado en el apartado de TIPOS DE FABRICACIÓN ADITIVA. Esto permitiría obtener una versión completamente funcional y definitiva del *rocker*, adecuada para resistir las cargas reales a las que se somete en pista, y someterla a ensayos físicos de tracción, compresión y fatiga, que permitirían contrastar los resultados experimentales con los obtenidos mediante simulación. De esta manera, y en caso de cumplir los requisitos demandados, se podría incluir la pieza diseñada en el monoplaza del equipo.

Adicionalmente, tras imprimir las piezas en el material seleccionado, se podría explorar la posibilidad de incorporar galgas extensométricas o sensores de carga en los componentes impresos, con el fin de obtener datos en tiempo real sobre esfuerzos y deformaciones durante el funcionamiento del vehículo. Esto permitiría abrir una vía de investigación en el ámbito del diseño estructural.

Todo ello convierte este TFG no solo en una aportación válida al equipo de Fórmula Student, sino también en un ejemplo aplicable a las técnicas incorporadas en la ingeniería del futuro.

CAPÍTULO 7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. J. Gamez, «Objetivos y metas de desarrollo sostenible», Desarrollo Sostenible.
- [2] N. G. Ochoa y J. R. J. Octavio, «DISEÑO Y FABRICACIÓN DEL FONDO PLANO PARA FORMULA STUDENT».
- [3] J. A. Carrasco y J. N. Moriñigo, «DISEÑO Y FABRICACIÓN DE LA TRANSMISIÓN DE UN FORMULA STUDENT ELÉCTRICO».
- [4] «TFG- Borreguero Alaez, Pablo.pdf». Accedido: 12 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.comillas.edu/jspui/bitstream/11531/35370/1/TFG-%20Borreguero%20Alaez,%20Pablo.pdf>
- [5] M. C. Fernández-Pedraza, «Mejora de la suspension del vehículo Formula Student 2017».
- [6] «TFG+Diseño+y+Optimización+Topológica+de+Rockers+para+un+modelo+de+Formula+Student_Cristina+Silvestre+Gómez.pdf». Accedido: 20 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/91255/fichero/TFG+Dise%C3%B1o+y+Optimizaci%C3%B3n+Topol%C3%B3gica+de+Rockers+para+un+modelo+de+Formula+Student_Cristina+Silvestre+G%C3%B3mez.pdf
- [7] S. Belgamwar, S. Sable, T. Trivedi, G. Sable, y N. Zarad, «Design & Analysis of Rocker Arm Suspension System Used in FSAE», vol. 9, n.º 5.
- [8] «PA_SP_2002_N-Main Plate (Rear)».
- [9] L. García Menéndez, «Diseño generativo: el estado del arte», *Téc. Ind.*, vol. 327, n.º 327, pp. 44-49, nov. 2020, doi: 10.23800/10417.
- [10] C. A. Meza, F. Tamayo, y E. E. Franco, «Optimización topológica aplicada al diseño de componentes estructurales mecánicos de peso reducido», n.º 44, 2014.
- [11] R. Jaisawal y V. Agrawal, «Generative Design Method (GDM) – A State of Art», *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 1104, n.º 1, p. 012036, mar. 2021, doi: 10.1088/1757-899X/1104/1/012036.
- [12] «Impresion_3D_la_digitalizacion_de_la_fabricacion-libre.pdf». Accedido: 26 de diciembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/54175969/Impresion_3D_la_digitalizacion_de_la_fabricacion-libre.pdf?1503074117=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DImpresion_3D_la_digitalizacion_de_la_fab.pdf&Expires=1735226273&Signature=W3JuRx+BukH4HLtoTxEnR9gZEizX7J3MoLXo4Cz9jpX7KyL5PdS1m4ewiw9k22Eqv1iA3d-YN-

Esf8dLK4IC5namju7lRHrMOjHCcMakXHpNpTeQV4SpP1YfqUYROPdtzQT1OTGmgvyegcur-4D0qcUNwReToXZNBuhM0toNLnXhdx7ulMKn1ODVmUL3HWDWQVOFP5vCtAhbmerHaEmU2bOKBX-sCLCYOqn7yNhZLHydHEoV18fikfUW8CRjn7R1Cncf8hPI9tHAtbQ1as8vMlrQCUxXbtsgzwJLqJVsXSz6OQcEtf75LWB2MEpC412MRW-WUbhGW22DwpBhkUUIhg__&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA

- [13] «Revision de las tecnicas de fabricacion aditiva y sus aplicaciones».
- [14] R. Jaisawal y V. Agrawal, «Generative Design Method (GDM) – A State of Art», *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 1104, n.º 1, p. 012036, mar. 2021, doi: 10.1088/1757-899X/1104/1/012036.
- [15] impresoras3d.com, «Fabricacion aditiva: Qué es, tipos y ejemplos», impresoras3d.com. Accedido: 27 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.impresoras3d.com/fabricacion-aditiva/>
- [16] D. Santoro, «Simulation Analysis | Finite Element Analysis», Solid Edge. Accedido: 26 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://solidedge.siemens.com/en/solutions/products/simulation/solid-edge-simulation/>
- [17] «Altair_Generative_Design_Report.pdf». Accedido: 26 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://cdn2.hubspot.net/hubfs/47251/Altair_Generative_Design_Report.pdf
- [18] «Trabajo Fin de Grado Jorge Bernabeu Meseguer.pdf». Accedido: 12 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/393371/Trabajo%20Fin%20de%20Grado%20Jorge%20Bernabeu%20Meseguer.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
- [19] «Aluminio 7075: Composición, Propiedades y Aplicaciones», studylib.es. Accedido: 27 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://studylib.es/doc/4907872/-7075---aluminio-zinc->
- [20] «Análisis de elementos finitos en Solid Edge Simulation». Accedido: 26 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://docs.sw.siemens.com/es-ES/doc/246738425/PL20190201104957790.sesim/analyze1p>
- [21] P. M. Corchado y D. Trapero, «15 comentarios en “¿Cuánto cuesta imprimir en 3D? Calculadora del precio de imprimir en 3D”».

CAPÍTULO 8. ANEXOS

8.1 ALUMINIO 7075 T6


**ACP
Materials**

ACP MATERIALS S.L.

FICHA TÉCNICA

Aluminios, Bronces, Casquillos autolubricados, Plásticos técnicos, Estratificados, etc.

Aluminio AW7075

Composición química

ELEMENTOS	Mg	Mn	Fe	Si	Al	Cu	Zn	Cr	Mn	Ti	Bi	Ni	Pb	Sn	Zr
Máximo	2.5 0.5	0.30	0.050	0.10	-	1.0 0.20	0.1 0.1	0.15 0.08	-	0.20	-	-	-	-	-

Propiedades técnicas

NORMA E.N.	AW7075
Norma U.N.E.	L-3710 / 38.371
Densidad	g/cm3 2.80
Estado del tratamiento	T-6
PROPIEDADES GENERALES	
Carga de rotura	N/mm2 480-530
Límite elástico	N/mm2 390-450
Módulo elástico	N/mm2 72000
Alargamiento a 5,65%	2-8
Dureza	Brinell 130-140
PROPIEDADES FÍSICAS	
Punto de fusión	°C 475-635
Conductividad térmica	W/(K*m) 134
Coeff. dilatación termal lineal	m/(m*K) 23.5
Conductividad eléctrica	%IACS 33
CAPACIDAD TECNOLÓGICA	
Ambiente industrial	R
Ambiente Rural	R
Ambiente marino	M
En agua de mar	M
MECANIZACIÓN	
Fragmentación viruta	B
Brillo superficial	B
SOLDADURA	
A la llama	B
Al arco bajo gas argón	M
Por resistencia eléctrica	B
Braseado	R
ANODIZADO	
De protección	B
Decorativo	R
Duro	MB

Características principales

Aleación de alta resistencia. Alto límite elástico, adecuado para piezas sometidas a grandes fatigas.

Uso habitual

Moldes soplado, troqueles, maquinaria, armamento, blindajes, industria automóvil, piezas estampadas, etc.

Leyenda:

- MB Muy Bueno
- B Bueno
- C Correcto
- R Regular
- M Malo
- (t) Valores típicos

CODIFICACION INTERNACIONAL DE LAS ALEACIONES DE ALUMINIO

- 1xxx Aluminios cuya riqueza es > 99%
- 2xxx Aleaciones al cobre.
- 3xxx Aleaciones al manganeso.
- 4xxx Aleaciones al silicio.
- 5xxx Aleaciones al magnesio.
- 6xxx Aleaciones al magnesio-silicio.
- 7xxx Aleaciones al zinc.
- 8xxx Otras aleaciones.

La primera cifra indica el componente principal de adición y el grupo al que pertenece la aleación.

Nota: Aunque nos hemos esforzado por asegurar la exactitud de los datos provistos, ACP Materials S.L., no garantiza ni acepta ninguna responsabilidad por la exactitud de los mismos.

ACP MATERIALS, S.L.
Pol. Ind. del Mediterráneo
C/ Jaime I, Naves 10-11-14
46560 MASSALFASAR - VALENCIA - ESPAÑA

Tel.: +34 96 140 05 56
Fax: +34 96 141 70 65
Mail: info@acpmaterials.es

ISO 9001
BUREAU VERITAS
Certification



8.2 FICHA TÉCNICA DE LA IMPRESORA



Escuela Técnica Superior de Ingeniería - I.C.A.I.

HP 580C



Información técnica

Impresora 3D HP Jet Fusion 580 Color

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

8.3 FICHA TÉCNICA DEL MATERIAL PLA USADO

Ficha de datos técnicos PLA Ultimaker																									
Denominación química	Ácido poliláctico																								
Descripción	El filamento de PLA Ultimaker ofrece una experiencia de impresión 3D sencilla gracias a su fiabilidad y buena calidad superficial. Nuestro PLA está fabricado con materiales orgánicos y renovables. Es seguro, fácil de utilizar en la impresión y se adecua a una amplia gama de aplicaciones para usuarios nuevos y experimentados.																								
Características principales	El PLA ofrece una buena resistencia a la tracción y calidad superficial, facilita el trabajo a altas velocidades de impresión, simplifica el uso en entornos domésticos y de oficina y permite la creación de piezas de alta resolución. Existe una amplia gama de opciones de color disponibles.																								
Aplicaciones	Herramientas domésticas, juguetes, proyectos educativos, objetos de exposición, prototipado, modelos arquitectónicos y también métodos de fundición a la cera perdida para crear piezas de metal.																								
No adecuado para	Aplicaciones en contacto con alimentos e in vivo. Uso prolongado en exteriores o aplicaciones en las cuales la parte impresa está expuesta a temperaturas superiores a 50 °C.																								
<u>Especificaciones del filamento</u>	<table> <tr> <th><u>Valor</u></th><th><u>Método</u></th></tr> <tr> <td>Diámetro</td><td>2,85 ± 0,10 mm</td></tr> <tr> <td>Desviación de redondez máxima</td><td>0,10 mm</td></tr> <tr> <td>Peso neto del filamento</td><td>350 g / 750 g</td></tr> <tr> <td>Longitud del filamento</td><td>~44 m / ~95 m</td></tr> </table>	<u>Valor</u>	<u>Método</u>	Diámetro	2,85 ± 0,10 mm	Desviación de redondez máxima	0,10 mm	Peso neto del filamento	350 g / 750 g	Longitud del filamento	~44 m / ~95 m														
<u>Valor</u>	<u>Método</u>																								
Diámetro	2,85 ± 0,10 mm																								
Desviación de redondez máxima	0,10 mm																								
Peso neto del filamento	350 g / 750 g																								
Longitud del filamento	~44 m / ~95 m																								
<u>Información sobre el color</u>	<table> <tr> <th><u>Color</u></th><th><u>Código de color</u></th></tr> <tr> <td>PLA verde</td><td>RAL 6018</td></tr> <tr> <td>PLA negro</td><td>RAL 9005</td></tr> <tr> <td>PLA plata metalizado</td><td>RAL 9006</td></tr> <tr> <td>PLA blanco</td><td>RAL 9010</td></tr> <tr> <td>PLA transparente</td><td>n.p.</td></tr> <tr> <td>PLA naranja</td><td>RAL 2008</td></tr> <tr> <td>PLA azul</td><td>RAL 5002</td></tr> <tr> <td>PLA magenta</td><td>RAL 4010</td></tr> <tr> <td>PLA rojo</td><td>RAL 3020</td></tr> <tr> <td>PLA amarillo</td><td>RAL 1003</td></tr> <tr> <td>PLA blanco nacarado</td><td>RAL 1013</td></tr> </table>	<u>Color</u>	<u>Código de color</u>	PLA verde	RAL 6018	PLA negro	RAL 9005	PLA plata metalizado	RAL 9006	PLA blanco	RAL 9010	PLA transparente	n.p.	PLA naranja	RAL 2008	PLA azul	RAL 5002	PLA magenta	RAL 4010	PLA rojo	RAL 3020	PLA amarillo	RAL 1003	PLA blanco nacarado	RAL 1013
<u>Color</u>	<u>Código de color</u>																								
PLA verde	RAL 6018																								
PLA negro	RAL 9005																								
PLA plata metalizado	RAL 9006																								
PLA blanco	RAL 9010																								
PLA transparente	n.p.																								
PLA naranja	RAL 2008																								
PLA azul	RAL 5002																								
PLA magenta	RAL 4010																								
PLA rojo	RAL 3020																								
PLA amarillo	RAL 1003																								
PLA blanco nacarado	RAL 1013																								
Ficha de datos técnicos — PLA Ultimaker	Página 1																								

<u>Propiedades mecánicas (*)</u>	<u>Moldeo por inyección</u>		<u>Impresión 3D</u>	
	Valor típico	Método de ensayo	Valor típico	Método de ensayo
Módulo de elasticidad a la tracción	-	-	2346,5 MPa	ISO 527 (1 mm/min)
Esfuerzo de tracción a la deformación	-	-	49,5 MPa	ISO 527 (50 mm/min)
Esfuerzo de tracción a la rotura	-	-	45,6 MPa	ISO 527 (50 mm/min)
Alargamiento a la deformación	-	-	3,3 %	ISO 527 (50 mm/min)
Alargamiento a la rotura	-	-	5,2 %	ISO 527 (50 mm/min)
Resistencia a la flexión	-	-	103,0 MPa	ISO 178
Módulo de flexión	-	-	3150,0 MPa	ISO 178
Resistencia a la prueba de impacto Izod, con mella (a 23 °C)	-	-	5,1 kJ/m²	ISO 180
Resistencia a la prueba de impacto Charpy (a 23 °C)	-	-	-	-
Dureza	-	-	83 (Shore D)	Durómetro
<u>Propiedades térmicas</u>	<u>Valor típico</u>	<u>Método de ensayo</u>		
Índice de fluidez (MFR)	6,09 g/10 min	ISO 1133 (210 °C, 2,16 kg)		
Deformación térmica (HDT) a 0,455 MPa	-	-		
Deformación térmica (HDT) a 1,82 MPa	-	-		
Transición vítrea	-60 °C	ISO 11357		
Coefficiente de expansión térmica	-	-		
Temperatura de fusión	145-160 °C	ISO 11357		
Contracción térmica	-	-		
<u>Otras propiedades</u>	<u>Valor típico</u>	<u>Método de ensayo</u>		
Gravedad específica	1,24	ASTM D1505		
Clasificación de llama	-	-		

(*) Ver las notas.

