



COMILLAS
UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO ANÁLISIS, DISEÑO GENERATIVO Y FABRICACIÓN DEL PEDAL DE FRENO MEDIANTE IMPRESIÓN 3D PARA APLICACIÓN EN UN VEHÍCULO TURISMO

Autor: Marc Caules Morey

Director: Mariano Jiménez Calzado

Co-Director: Javier Manini Gumz

Madrid

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
“ANÁLISIS, DISEÑO GENERATIVO Y FABRICACIÓN DE COMPONENTES DE USO
FINAL MEDIANTE IMPRESIÓN 3D PARA APLICACIÓN EN UN VEHÍCULO
TURISMO”

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.: Marc Caules Morey

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





GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

ANÁLISIS, DISEÑO GENERATIVO Y FABRICACIÓN DEL PEDAL DE FRENO MEDIANTE IMPRESIÓN 3D PARA APLICACIÓN EN UN VEHÍCULO TURISMO

Autor: Marc Caules Morey

Director: Mariano Jiménez Calzado

Co-Director: Javier Manini Gumz

Madrid

ANÁLISIS, DISEÑO GENERATIVO Y FABRICACIÓN DEL PEDAL DE FRENO MEDIANTE IMPRESIÓN 3D PARA APLICACIÓN EN UN VEHÍCULO TURISMO

Autor: Caules Morey, Marc

Director: Jiménez Calzado, Mariano

Co-director: Manini Gumz, Javier

Entidad Colaboradora: ICAI-Universidad Pontificia de Comillas

RESUMEN

Este TFG se centra en el rediseño y la optimización del pedal de freno de un vehículo mediante técnicas de optimización topológica y diseño generativo, seguido de su fabricación mediante impresión 3D. El objetivo principal es reducir el peso del componente sin comprometer su resistencia, contribuyendo así a la mejora de la eficiencia del vehículo y la sostenibilidad ambiental.

Palabras clave: Optimización topológica, Diseño Generativo, Fabricación Aditiva, Impresión 3D

1. Introducción

La fabricación aditiva o impresión 3D ha revolucionado el diseño de componentes industriales al permitir la creación de piezas más ligeras y eficientes. Este TFG se centra en el rediseño de un pedal de freno de automóvil aplicando técnicas de optimización topológica y diseño generativo, con el objetivo de reducir peso sin comprometer la resistencia estructural del componente.

2. Definición del proyecto

Se ha realizado un primer diseño del componente a optimizar a partir de las medidas de un pedal de freno comercial. Además, tras unos cálculos previos, se ha seleccionado como material final de fabricación, una aleación de aluminio AlSi10Mg.



Ilustración 1: Modelo 3D inicial (fuente: elaboración propia)

Una vez se tiene el modelo sobre el que trabajar, se procederá a realizar una primera simulación FEM del componente, estableciendo primero unas restricciones de movimiento y aplicando fuerzas. Se han fijado los dos agujeros superiores y se ha aplicado una fuerza de 2000 N perpendicular al punto de apoyo del pie, simulando un frenazo brusco.

Una vez realizada la simulación, obtenemos una tensión máxima de 109 MPa, muy inferior al límite elástico del material, 270 MPa.

3. Resultados

Una vez confirmado que el pedal no romperá, procedemos con las iteraciones para la optimización topológica del componente, restringiendo las zonas donde queremos conservar material, alrededor de los agujeros de fijación del pedal y de toda la zona del punto de apoyo del pie, además de aplicar también la carga de 2000 N.

Tras varias iteraciones se llega a dos soluciones finales, una restringida con una reducción total de masa del 43% y otra con una optimización más libre con una reducción de masa del 65%. Se elige como diseño final la solución más restringida dada su mayor solidez estructural.

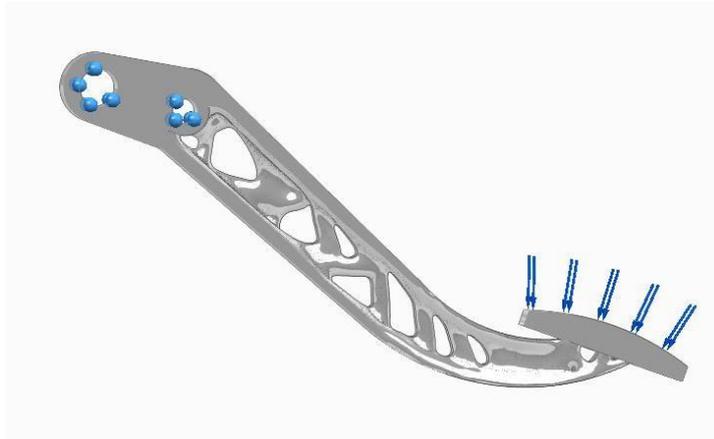


Ilustración 2: Diseño final optimizado (fuente: elaboración propia)

Una vez se tiene el diseño final se procede a la fabricación de dos prototipos, el diseño original sin optimizar, fabricado mediante FDM con PLA como material y el pedal optimizado, fabricado mediante MJF con poliamida 12 como material.



Ilustración 3: Prototipos fabricados mediante I3D (fuente: elaboración propia)

4. Conclusiones

El rediseño del pedal de freno mediante optimización topológica y diseño generativo permitió una reducción de masa del 43%, manteniendo la resistencia estructural con una tensión máxima de 123 MPa, inferior al límite elástico del material AlSi10Mg. Aunque el coste del prototipo optimizado es elevado y no viable para producción masiva, su uso resulta prometedor en vehículos de alto rendimiento, donde la reducción de peso es prioritaria.

Este TFG demuestra el potencial de la fabricación aditiva y el diseño avanzado en el desarrollo de componentes eficientes, aunque presenta retos para su implementación industrial a gran escala.

5. Referencias

Alcantar, C. E. N., Gallardo, L. A. P., Bocanegra, M. A. M., & Sánchez, M. B. (2023). Diseño generativo aplicado en el diseño de un pedal de frenado para automóvil. *Revista de Ciencias Tecnológicas*. <https://doi.org/10.37636/recit.v6n4e299>

ANALYSIS, GENERATIVE DESIGN, AND MANUFACTURING OF THE BRAKE PEDAL USING 3D PRINTING FOR APPLICATION IN A PASSENGER VEHICLE

Author: Caules Morey, Marc

Supervisor: Jiménez Calzado, Mariano

Supervisor: Manini Gumz, Javier

Collaborating Entity: ICAI-Universidad Pontificia de Comillas

ABSTRACT

This Final Degree Project focuses on the redesign and optimization of a vehicle brake pedal using topological optimization and generative design techniques, followed by its manufacturing through 3D printing. The main objective is to reduce the weight of the component without compromising its strength, thus contributing to improved vehicle efficiency and environmental sustainability.

Keywords: Topological Optimization, Generative Design, Additive Manufacturing, 3D Printing

1. Introduction

Additive manufacturing, or 3D printing, has revolutionized the design of industrial components by enabling the creation of lighter and more efficient parts. This Final Degree Project focuses on the redesign of a car brake pedal by applying topological optimization and generative design techniques, with the aim of reducing weight without compromising the structural strength of the component.

2. Project Description

The first design of the component to be optimized was created based on the dimensions of a commercial brake pedal. Additionally, after preliminary calculations, the chosen final manufacturing material was the aluminum alloy AlSi10Mg.



Ilustración 4: 3D initial design (Own source)

Once the model to work on is defined, a first FEM simulation of the component will be done, first establishing motion constraints and applying forces. The two upper holes have been fixed, and a force of 2000 N has been applied perpendicular to the support point of the foot, simulating a sudden braking.

After performing the simulation, a maximum stress of 109 MPa is obtained, well below the material's yield strength of 270 MPa.

3. Results

Once it is confirmed that the pedal will not fail, we proceed with the iterations for the topological optimization of the component, restricting the areas where material must be preserved, around the pedal's fixing holes and the entire foot support area, as well as applying the same 2000 N load.

After several iterations, two final solutions were reached, one constrained, with a total mass reduction of 43%, and another more freely optimized, with a mass reduction of 65%. The constrained solution was chosen as the final design due to its greater structural resistance.

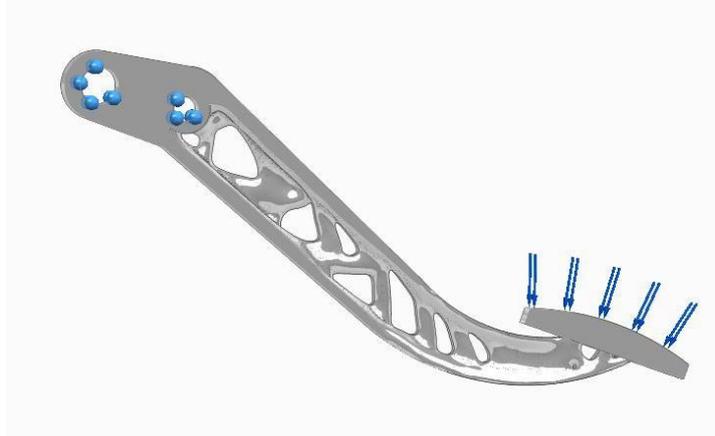


Ilustración 5: Final optimized design (Own source)

Once the final design was completed, two prototypes were manufactured, the original, non-optimized design, produced using FDM with PLA as the material, and the optimized pedal, produced using MJF with polyamide 12 as the material.



Ilustración 6: Manufactured prototypes (Own source)

4. Conclusions

The redesign of the brake pedal through topology optimization and generative design enabled a 43% mass reduction while maintaining structural strength, with a maximum stress of 123 MPa, below the yield strength of the AlSi10Mg material. Although the cost of the optimized prototype is high and not suitable for mass production, its use is promising in high-performance vehicles, where weight reduction is a priority.

This final degree project demonstrates the potential of additive manufacturing and advanced design in the development of efficient components, although it presents challenges for large-scale industrial implementation.

5. References

Alcantar, C. E. N., Gallardo, L. A. P., Bocanegra, M. A. M., & Sánchez, M. B. (2023). Diseño generativo aplicado en el diseño de un pedal de frenado para automóvil. *Revista de Ciencias Tecnológicas*. <https://doi.org/10.37636/recit.v6n4e299>

Índice de la memoria

<i>Índice de la memoria</i>	13
<i>Índice de ilustraciones</i>	15
<i>Índice de tablas</i>	18
Capítulo 1. Introducción	19
1.1 Motivación del proyecto	20
1.2 Objetivos del proyecto	20
1.3 Metodología de trabajo	21
1.4 Recursos a emplear	22
1.5 Objetivos de desarrollo sostenible	23
Capítulo 2. Estado de la cuestión	26
2.1 Optimización topológica.....	26
2.2 Diseño Generativo	27
2.3 Fabricación aditiva.....	31
2.3.1 Orígenes de la fabricación aditiva.....	34
2.3.2 Principales tecnologías de impresión 3D	38
2.4 Aplicaciones de optimización topológica, diseño generativo y fabricación aditiva en el sector automotriz	46
Capítulo 3. Descripción del proyecto	49
3.1 Cálculo de cargas.....	50
3.2 Asignación del material	51
3.3 Simulación modelo inicial	52
Capítulo 4. Optimización del modelo	56
4.1 Restricciones y condiciones de contorno	57
4.2 Proceso de optimización	59
4.2.1 Primera iteración.....	59
4.2.2 Segunda iteración	61

4.2.3 Tercera iteración	63
4.2.4 Cuarta iteración.....	65
4.2.5 Quinta iteración.....	67
4.2.6 Sexta iteración	69
4.3 Refinar geometría	71
4.4 Propuesta de diseño libre	74
Capítulo 5. Fabricación del prototipo	78
5.1 Pedal sin optimizar.....	78
5.2 Pedal optimizado.....	81
5.3 Resultado final de la fabricación.....	84
Capítulo 6. Análisis de costes	86
6.1 Costes prototipo sin optimizar	87
6.2 Costes prototipo optimizado	88
6.3 Costes de impresión en metal	89
Capítulo 7. Análisis de resultados y conclusiones	90
Capítulo 8. Bibliografía	92

Índice de ilustraciones

Ilustración 1: Modelo 3D inicial (fuente: elaboración propia)	6
Ilustración 2: Diseño final optimizado (fuente: elaboración propia)	7
Ilustración 3: Prototipos fabricados mediante I3D (fuente: elaboración propia).....	7
Ilustración 4: 3D initial design (Own source).....	10
Ilustración 5: Final optimized design (Own source).....	11
Ilustración 6: Manufactured prototypes (Own source)	11
Ilustración 7:Diagrama de trabajo a seguir	22
Ilustración 8:Objetivos de desarrollo sostenible (fuente: Naciones Unidas)	23
Ilustración 9:Ejemplo de pieza optimizada topológicamente (fuente: 3dnatives)	26
Ilustración 10:Proceso de diseño generativo (fuente: formlabs).....	28
Ilustración 11: Diseño tabique divisorio Airbus A320 (fuente: Autodesk)	29
Ilustración 12: Sistema de fijación de snowboard elaborado con diseño generativo (fuente:Autodesk).....	30
Ilustración 13: Torneado (fuente:IMH).....	31
Ilustración 14: Fabricación por extrusión (fuente: Portalum).....	32
Ilustración 15: Objeto siendo fabricado mediante impresión 3D (fuente: Bridgewater Studio)	34
Ilustración 16: Tecnología inkjet (fuente: Kao Collins Inc.)	34
Ilustración 17 : Chuck Hull, creador de la impresión 3D (fuente:National Inventors Hall of Fame)	35
Ilustración 18: Impresora SLA-1 (fuente: SPIE.)	36
Ilustración 19: Model de riñón impreso 3D (fuente: ICUA)	36
Ilustración 20: Impresora RepRap (fuente: RepRap bcn).....	37
Ilustración 21: Impresora montable de MarketBot (fuente: xataka)	38
Ilustración 22: Impresión 3D por esterolitografía (fuente: xometry.pro).....	39
Ilustración 23: Dentaduras impresas mediante SLA (fuente: TRD)	40
Ilustración 24:Esquema proceso SLS (fuente: Research Gate)	41

Ilustración 25: Bisagras impresas mediante impresión 3D (fuente: Rapid Direct).....	41
Ilustración 26: Proceso de modelado por deposición fundida (fuente: todo-3D).....	42
Ilustración 27: Proceso de SLM (fuente: INGENIUS).....	43
Ilustración 28: Proceso de fusión por haz de electrones (fuente: INGENIUS).....	45
Ilustración 29: Caja torácica fabricada mediante I3D (fuente: 3Dnatives).....	46
Ilustración 30: Pilar A vehículo (fuente: CARdesign).....	47
Ilustración 31: Soporte de asiento optimizado (fuente: Autodesk).....	47
Ilustración 32: Colector de admisión fabricado por Ford (fuente:3dnatives).....	48
Ilustración 33: Modelo 3D inicial del pedal de freno (fuente: elaboración propia).....	49
Ilustración 34: Dimensiones modelo inicial (fuente: elaboración propia).....	50
Ilustración 35: Adición de aluminio AlSi10Mg a SolidEdge (fuente: elaboración propia).....	52
Ilustración 36: Carga para simulación (fuente: elaboración propia).....	53
Ilustración 37: Restricciones de movimiento (fuente: elaboración propia).....	54
Ilustración 38: Resultados de simulación (fuente: elaboración propia).....	55
Ilustración 39: Espacio de diseño sobre el que se trabajará (fuente: elaboración propia)...	56
Ilustración 40: Aplicación de la fuerza para optimización topológica (fuente: elaboración propia).....	57
Ilustración 41: Puntos de sujeción para optimización topológica (fuente: elaboración propia).....	58
Ilustración 42: Regiones preservadas (fuente: elaboración propia).....	59
Ilustración 43: Parámetros optimización 10% (fuente: elaboración propia).....	60
Ilustración 44: Resultados iteración 10% (fuente: elaboración propia).....	60
Ilustración 45: Simulación FEM pieza optimizada al 10% (fuente: elaboración propia)....	61
Ilustración 46: Parámetros optimización 20% (fuente: elaboración propia).....	62
Ilustración 47: Resultados optimización 20% (fuente: elaboración propia).....	62
Ilustración 48: Simulación FEM optimización 20% (fuente: elaboración propia).....	63
Ilustración 49: Parámetros optimización 30% (fuente: elaboración propia).....	64
Ilustración 50: Resultado optimización 30% (fuente: elaboración propia).....	64
Ilustración 51: Simulación FEM optimización 30% (fuente: elaboración propia).....	65
Ilustración 52: Parámetros optimización 40% (fuente: elaboración propia).....	66

Ilustración 53: Resultado optimización 40% (fuente: elaboración propia).....	66
Ilustración 54: Simulación FEM optimización 40% (fuente: elaboración propia)	67
Ilustración 55: Parámetros optimización 50% (fuente: elaboración propia).....	68
Ilustración 56: Error optimización 50% (fuente: elaboración propia)	68
Ilustración 57: Parámetros optimización 43% (fuente: elaboración propia).....	69
Ilustración 58: Resultados optimización 43% (fuente: elaboración propia)	69
Ilustración 59: Simulación FEM optimización 43% (fuente: elaboración propia)	70
Ilustración 60: Parámetros para crear PolyNURB (fuente: elaboración propia).....	71
Ilustración 61: Vista lateral pedal refinado (fuente: elaboración propia)	72
Ilustración 62: Vista superior pedal refinado (fuente: elaboración propia)	72
Ilustración 63: Vista inferior pedal refinado (fuente: elaboración propia)	73
Ilustración 64: Simulación FEM diseño final (fuente: elaboración propia).....	73
Ilustración 65: Restricciones y condiciones de contorno para diseño libre (fuente: elaboración propia)	74
Ilustración 66:Parámetros optimización 65% (fuente: elaboración propia).....	75
Ilustración 67: Vista lateral optimización 65% (fuente: elaboración propia)	75
Ilustración 68: Vista inferior optimización 65% (fuente: elaboración propia)	76
Ilustración 69: Simulación FEM optimización 65% (fuente: elaboración propia)	76
Ilustración 70: Impresora Prusa-I3KS (fuente: Prusa).....	78
Ilustración 71: Orientación del pedal sin optimizar en Cura (fuente: elaboración propia) .	79
Ilustración 72: Parámetros de impresión en Cura (fuente: elaboración propia).....	80
Ilustración 73: Modelo final en Cura (fuente: elaboración propia)	81
Ilustración 74: Impresora HP 580C (fuente: HP).....	82
Ilustración 75: Pedal optimizado Cura (fuente: elaboración propia)	83
Ilustración 76: Vista superior de ambos prototipos (fuente: elaboración propia).....	84
Ilustración 77: Vista lateral de ambos prototipos (fuente: elaboración propia).....	85
Ilustración 78: Curvas de coste impresión 3D y fabricación tradicional (fuente: 3Dnatives)	86
Ilustración 79: Presupuesto de impresión metálica (fuente:Xometry).....	89

Índice de tablas

Tabla 1: Costes pedal sin optimizar	87
Tabla 2: Costes pedal optimizado	88

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

La fabricación aditiva, o comúnmente conocida como impresión 3D, ha experimentado un gran crecimiento en la industria automotriz debido a sus ventajas frente a los métodos de fabricación tradicionales. Este avance permite mejorar el rendimiento de los vehículos además de la reducción del impacto ambiental, fabricándose componentes más ligeros sin afectar a su resistencia.

El diseño generativo y la optimización topológica, que consiste en la eliminación de material sobrante de una pieza que no está sufriendo grandes esfuerzos mecánicos, son herramientas clave en este contexto, permitiendo obtener geometrías optimizadas minimizando el uso de material sin comprometer el rendimiento de los componentes.

Estas técnicas, combinadas con la fabricación aditiva, presentan nuevas oportunidades para la producción de componentes de vehículos turismos, reduciendo el coste de estos debido a la optimización del material usado, mejorando la eficiencia del combustible gracias a la reducción de peso del vehículo además de la mejora de la calidad y fiabilidad de las piezas.

La propuesta de este Trabajo de Fin de Grado (TFG), es estudiar el rediseño del pedal de freno para su optimización mediante técnicas de optimización topológica y diseño generativo para su posterior fabricación mediante impresión 3D.

Se buscará mejorar la relación peso-resistencia del componente mediante la eliminación de material innecesario para posteriormente evaluar la viabilidad de su fabricación y aplicación en vehículos convencionales.

1.1 MOTIVACIÓN DEL PROYECTO

La industria automovilística se siente constantemente bajo la presión de ser más sostenible, para lo que la impresión 3D resulta ser muy útil, ayudando a aligerar los vehículos, reduciendo un poco el peso de diversas piezas que afectan al conjunto total del turismo reduciendo el consumo de combustible sin afectar negativamente al rendimiento de este. Una reducción del 10% en el peso genera una mejora del 6% en la eficiencia del combustible.

El pedal de freno de un coche es uno de los elementos clave del sistema de frenado, pudiéndose mejorar su diseño mediante técnicas de diseño generativo y optimización topológica reduciéndose el material utilizado para su fabricación, contribuyendo así a la reducción de peso total del vehículo.

Además, la fabricación aditiva permite fabricar diversas geometrías complejas, muy difíciles de recrear con técnicas convencionales, pudiendo estas ser optimizadas para así reducir el negativo impacto ambiental que tiene hoy en día la industria de la automoción.

En resumen, la motivación de este TFG se basa en la búsqueda de nuevos métodos de fabricación donde se mejore el rendimiento de un vehículo, centrando el proyecto en optimizar un solo componente.

1.2 OBJETIVOS DEL PROYECTO

A continuación, se destacan los cuatro principales objetivos a cumplir del proyecto:

-Análisis del diseño original del pedal de freno de un vehículo: Se analizarán las características originales del componente, materiales utilizados, cantidad de material y su resistencia frente a las cargas recibidas para su correcto rediseño.

-Optimización del modelo original: Se diseñará mediante el uso de CAD el componente a estudiar para optimizarlo topológicamente, observando en qué medida este nuevo modelo sufre una reducción de peso.

-Viabilidad del modelo: Tras haber analizado el modelo original y haberlo rediseñado, se observará la resistencia del nuevo modelo frente al original para estudiar su viabilidad e implementación.

-Impresión del modelo: Finalmente, mediante técnicas de impresión 3D, se fabricará el nuevo modelo en el laboratorio de fabricación aditiva de la ETSI-ICAI.

1.3 METODOLOGÍA DE TRABAJO

Principalmente se llevará a cabo una metodología de trabajo iterativa, donde se realizará un modelo inicial en CAD, dando las especificaciones del componente, tamaño, tolerancias y reglas de diseño. Se validará este primer diseño, observando el material utilizado y las cargas soportadas.

Si el diseño inicial es correcto, soporta las cargas correctamente, éste se someterá a un proceso de optimización topológica, obteniéndose una nueva geometría con la que trabajar. De nuevo validaremos este nuevo diseño, volviendo al paso anterior si este no es correcto o no soporta la carga de trabajo.

Finalmente se llevará a cabo la impresión del modelo final, inspeccionando sus características dimensionales, geométricas y defectos.

A continuación, se presenta una imagen del diagrama de flujo de trabajo que se seguirá para el diseño para una mejor visualización

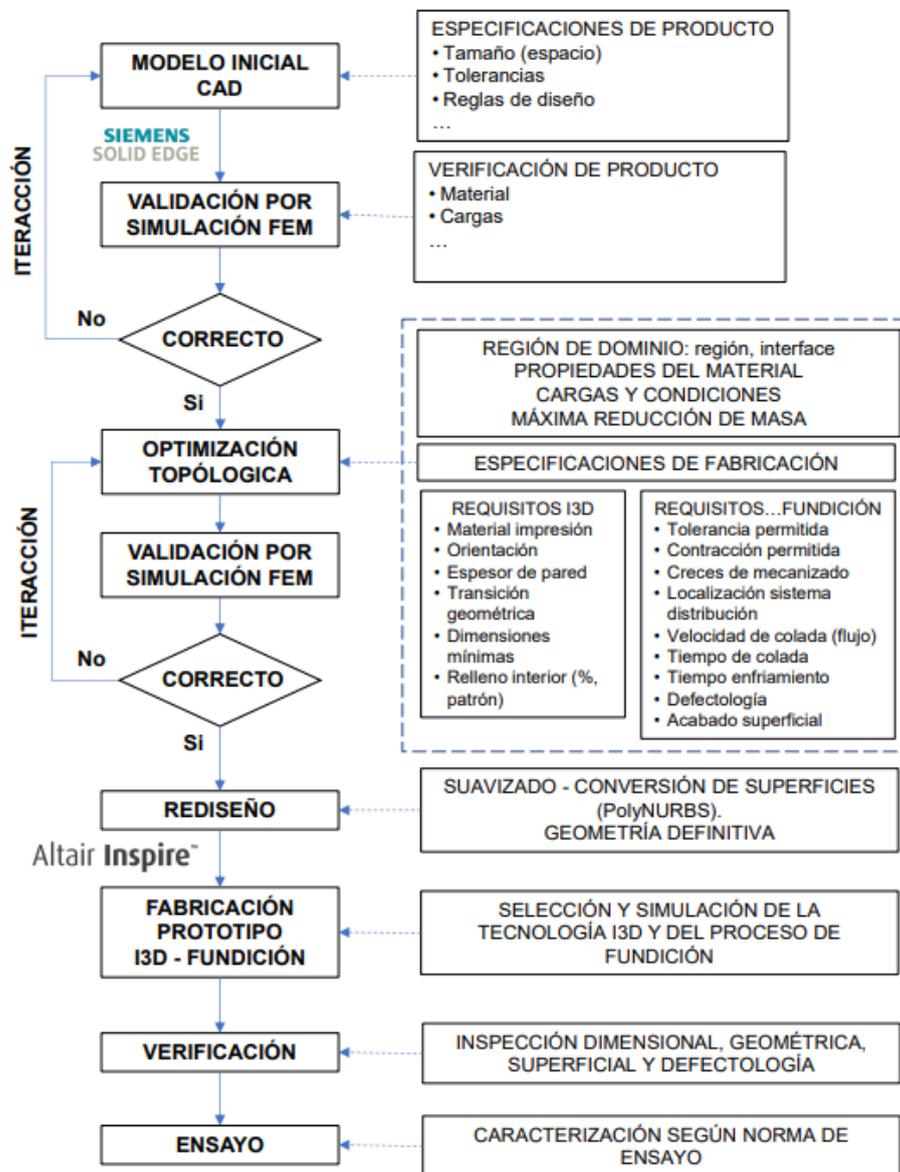


Ilustración 7: Diagrama de trabajo a seguir (fuente: Comillas-ICAI)

1.4 RECURSOS A EMPLEAR

Los recursos que se van a utilizar para la realización del TFG son los siguientes:

-Software de diseño 3D y simulación por elementos finitos: Solid Edge

-Laboratorio de fabricación aditiva de la ETSI-ICAI para la impresión del diseño final del componente

-Software de Microsoft Word

-Software de Zotero

1.5 OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE

Los objetivos de desarrollo sostenible (ODS), son un conjunto de metas, que deberán alcanzarse en el año 2030, que estableció las Naciones Unidas en el año 2015 para lograr un futuro más justo y sostenible para las personas y el planeta.



Producido en colaboración con TROLLBÄCK + COMPANY | TheGlobalGoals@trollback.com | +1.212.529.1010
Para cualquier duda sobre la utilización, por favor comuníquese con: dpicampaign@un.org

Ilustración 8: Objetivos de desarrollo sostenible (fuente: Naciones Unidas)

Este TFG, se alinea principalmente con 3 de los 17 objetivos:

Objetivo 7: Energía asequible y no contaminante

Al optimizar la geometría del pedal de freno de un vehículo, reduciendo el uso de material, se contribuye indirectamente a la mejora de la eficiencia energética del vehículo, al reducir su peso total.

Un componente más ligero disminuye el consumo de combustible, utilizándose los recursos energéticos de una forma más sostenible y reduciendo las emisiones vinculadas al transporte.

Tan solo la mejora del pedal de freno no tendría impacto prácticamente en la eficiencia del vehículo, pero aligerando varias piezas podría ser significativo, un ejemplo en General Motors, líderes en el diseño de vehículos ligeros, que consiguieron reducir 159 kg en sus vehículos. [1]

Objetivo 9: Industria, innovación e infraestructura

Este objetivo, busca principalmente construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización sostenible y fomentar la innovación.

El rediseño del pedal de freno es un ejemplo de innovación dentro de la industria automotriz. Además, el uso de tecnologías como la fabricación aditiva, impulsa el desarrollo de estructuras más sostenibles y resistentes

Objetivo 12: Producción y consumo responsables

Este objetivo busca una gestión sostenible y un uso eficiente de los recursos naturales.

Al usar técnicas de diseño generativo y optimización topológica, conseguimos componentes que cumplen su función a la perfección reduciendo su peso. Al reducir el peso, estamos

reduciendo el material utilizado para su fabricación y así la materia prima necesaria, haciendo un uso más eficiente de los recursos naturales.

Capítulo 2. ESTADO DE LA CUESTIÓN

Anteriormente, se han mencionado varias tecnologías necesarias para la realización del proyecto que analizaremos en detalle a continuación.

2.1 OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA

La optimización topológica es un método matemático utilizado para determinar la distribución óptima de material, dentro de un espacio previamente definido, bajo unas cargas, condiciones y limitaciones. Esta técnica maximiza el rendimiento y la eficiencia del diseño al eliminar material de zonas donde no es estructuralmente necesario, reduciendo el peso total del componente. [3]



Ilustración 9: Ejemplo de pieza optimizada topológicamente (fuente: 3dnatives)

Para llevar a cabo este proceso de optimización, se utiliza comúnmente el Método de Elementos Finitos (FEM), una técnica numérica para resolver problemas de ingeniería complejos, aplicable en muchos campos como la ingeniería estructural, transferencia de calor, dinámica de fluidos o ingeniería biomédica.

En el contexto de la optimización topológica, el FEM se utiliza para dividir el diseño original en elementos más pequeños, simulando cada uno de estos bajo unas cargas y restricciones impuestas, obteniendo la rigidez, conformidad y material redundante de cada elemento. Finalmente se vuelven a unir las piezas habiendo eliminado el material sobrante y obteniéndose la nueva geometría.

Entrando en detalle, estos son los pasos que sigue un proceso de optimización topológica:

1. Se diseña la pieza a optimizar y se aplican las restricciones necesarias, limitando el espacio donde se puede eliminar material, para no comprometer el correcto funcionamiento del componente. Además, se especifican las cargas que actuarán sobre la pieza.
2. Se utiliza el FEM para simular el comportamiento de la estructura bajo las cargas impuestas, evaluando como se comporta el material. Esto sigue un proceso iterativo, hasta obtener un diseño que cumpla los objetivos impuestos, como por ejemplo una reducción del 5% del peso.
3. Finalmente se analiza la geometría obtenida, verificando que sea correcta y funcional. Tras haber obtenido el nuevo diseño, también podemos volver al original e imponer condiciones más estrictas para optimizar al máximo la pieza.

2.2 DISEÑO GENERATIVO

El diseño generativo es un proceso iterativo de diseño que usa la inteligencia artificial para generar un conjunto de soluciones óptimas.

Se parte de unos parámetros de entrada definidos por el diseñador como materiales, dimensiones, restricciones de fabricación o objetivos de rendimiento y luego, un algoritmo genera múltiples soluciones que cumplan estos requisitos, quedando finalmente a criterio del usuario la elección del diseño final. Modificando estos parámetros de diseño iniciales en bucle, siendo estos cada vez más restrictivos, podemos llegar a soluciones altamente optimizadas para cumplir una serie de objetivos como componentes más ligeros, más

resistentes y eficientes. En la ilustración 10, se puede observar un diagrama que resume el proceso de diseño generativo de una forma simple.

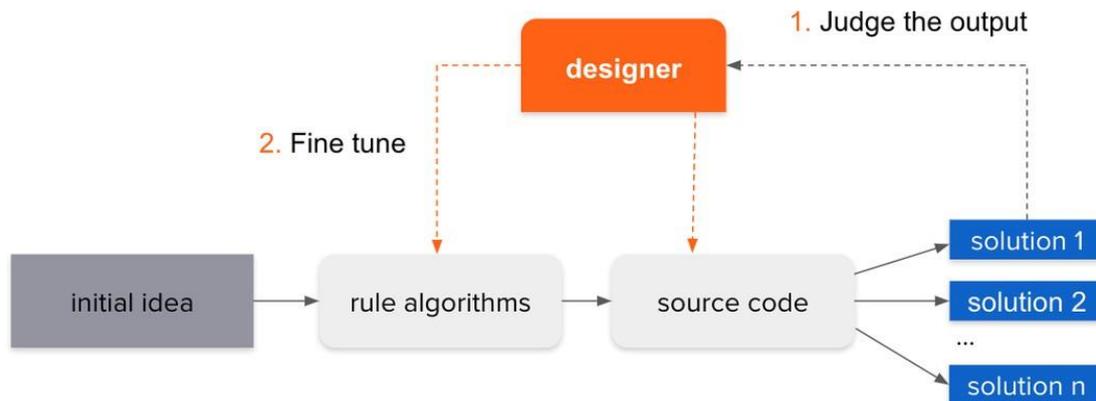


Ilustración 10: Proceso de diseño generativo (fuente: formlabs)

El diseño generativo, puede parecer prácticamente lo mismo que la optimización topológica, definida en el apartado anterior, ya que en ambos se busca el diseño óptimo para un componente. Pero, existe una clara diferencia que distingue a ambas tecnologías, la optimización topológica necesita un primer diseño hecho con CAD por una persona. Se podría decir que este proceso sirve de base para el diseño generativo, llevándose más allá al eliminar el factor humano necesario en la primera fase de diseño, necesitándose solo una serie de condiciones iniciales a definir por el diseñador.

Actualmente, el diseño generativo está tomando importancia en el sector aeroespacial, haciendo aeronaves más eficientes y ligeras. Cabe destacar el trabajo de Andreas Bastian, que consiguió reducir el peso de los asientos de avión en un 54%, reduciendo el peso total de la aeronave significativamente. También, cabe destacar el uso del diseño generativo en este sector por parte de Airbus, produciendo componentes más estables como el tabique divisorio del Airbus A320. [5]

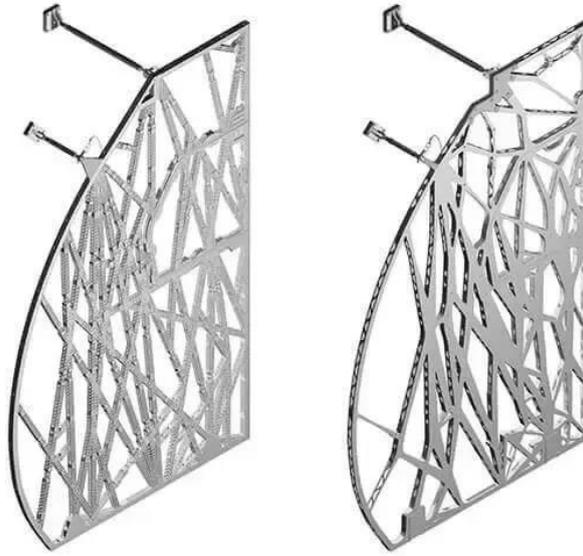


Ilustración 11: Diseño tabique divisorio Airbus A320 (fuente: Autodesk)

Cabe destacar también los usos del diseño generativo fuera de los sectores de la ingeniería, la principal ventaja que nos ofrece este proceso de diseño es la creatividad, generándose miles de alternativas de diseño, algo muy útil en el sector de la moda y equipamiento deportivo, pudiendo ofrecer al consumidor productos con un diseño óptimo y específico para cada persona, además de mejorar el desempeño del atleta.

La empresa suiza Nidecker Group tiene dentro de su catálogo sujetadores para snowboard diseñados con inteligencia artificial.



Ilustración 12: Sistema de fijación de snowboard elaborado con diseño generativo (fuente:Autodesk)

Gracias a la fabricación aditiva y el diseño generativo, esta empresa suiza consiguió crear varios prototipos rápidamente en distintos materiales hasta llegar al más adecuado, finalmente se consiguió un nuevo diseño un 25% más ligero, menos costoso e igual de resistente que el diseño original. [7]

Observamos que el diseño generativo es una técnica muy útil e innovadora, convirtiéndola en una herramienta muy poderosa gracias a su exploración de múltiples soluciones, algo imposible para el ser humano, ya que genera una gran cantidad de alternativas automáticamente, permitiéndonos ahorrar tiempo y recursos.

Además, estos algoritmos pueden buscar las formas más eficientes pudiendo aumentar en gran medida el rendimiento de los productos o ofrecernos diseños personalizados, obteniendo soluciones únicas a cada problema.

2.3 FABRICACIÓN ADITIVA

Existen principalmente 3 tipos de fabricación, sustractiva o mecanizado, formativa y aditiva, esta última también conocida como impresión 3D.

El mecanizado, es el método de fabricación más común y consiste en eliminar material de la pieza bruta para darle forma y crear así el componente de uso final. Es un método tradicionalmente usado en la metalurgia. El proceso comienza con un bloque de material, y mediante técnicas de mecanizado, como el torneado o fresado, se le da forma retirando material. [8]

En la ilustración 13, podemos observar visualmente un proceso de torneado donde la pieza gira y la herramienta de corte avanza o retrocede. En concreto observamos dos técnicas de arranque de material, cilindrado, para reducir el diámetro de la pieza, y refrentado, para reducir la longitud total de la pieza.

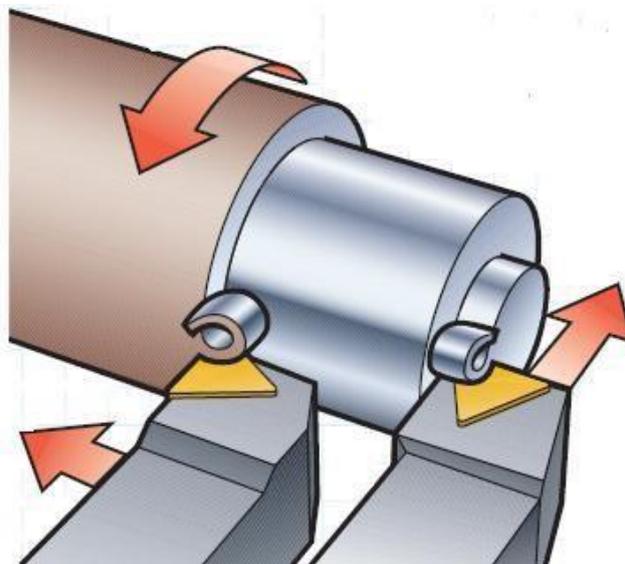


Ilustración 13: Torneado (fuente:IMH)

Principalmente, el mecanizado nos permite crear piezas altamente precisas, con tolerancias muy ajustadas y acabados superficiales de alta calidad. Tiene una amplia cantidad de materiales que pueden ser trabajados con este método de fabricación, incluyendo metales

principalmente como el acero, aluminio o titanio, siendo posible también mecanizar materiales como la madera, plásticos o cerámica.

Finalmente, podemos concluir que el mecanizado es el método más usado debido a su versatilidad además de tener una alta fiabilidad y escalabilidad, siendo un método de fabricación bien establecido y con resultados predecibles, siendo confiable tanto para grandes volúmenes de piezas como para prototipados.

La fabricación formativa, a diferencia de la anterior, consiste en un método donde se da forma al material sin eliminarlo, obligándolo a adoptar una forma deseada, mediante técnicas como el moldeo, estampado, forja o extrusión.

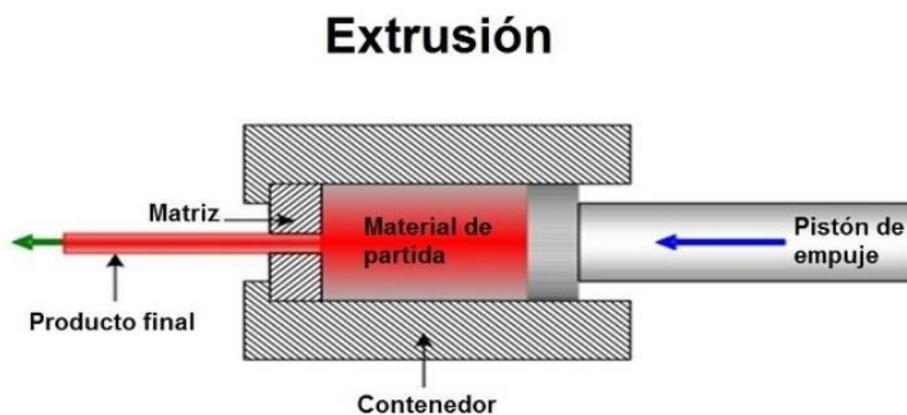


Ilustración 14: Fabricación por extrusión (fuente: Portalum)

En la ilustración 14, podemos observar la técnica de extrusión directa, donde el pistón empuja el material a través de la matriz, dándole forma a la pieza y obteniéndose el producto final.

La fabricación formativa o por conformación, resulta muy útil, al mejorar las propiedades mecánicas de la pieza final ya que el conformado puede aumentar la dureza y resistencia del material. Pueden crearse piezas altamente precisas, minimizando el desperdicio de material,

al no producirse arranque de viruta, además es útil para grandes volúmenes de producción al tener costes relativamente bajos.

Este método tiene algunas limitaciones, como restricciones de espesor en el material que se puede procesar o posibles tensiones internas debido a la deformación plástica, requiriéndose tratamientos posteriores para aliviarlas y aunque es un método muy versátil, hay límites, siendo difícil conformar piezas con geometrías muy complejas.

Finalmente, la fabricación aditiva o impresión 3D, es el método más reciente de los tres y en el que más se entrará en detalle, al ser el proceso de fabricación seleccionado para este proyecto.

La impresión 3D, es una tecnología de fabricación avanzada que permite crear objetos a partir de un modelo digital. Este proceso se lleva a cabo mediante diversas técnicas, analizadas en detalle más adelante, como la deposición de material fundido o el laminado de hojas. Durante el proceso, el material seleccionado, comúnmente plástico, pero también se pueden usar metales o materiales compuestos como la fibra de carbono, se va depositando por capas. Esto último, es una característica clave de la fabricación aditiva, ya que a diferencia de los métodos convencionales de fabricación no se parte de estructuras sólidas de metal o plástico, el material se va depositando solo donde es necesario, pudiéndose generar geometrías complejas, facilitando así la implementación de la optimización topológica.

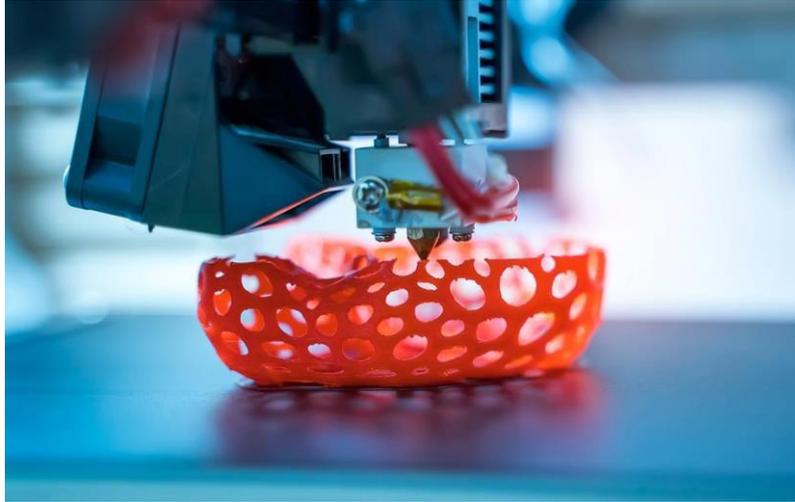


Ilustración 15: Objeto siendo fabricado mediante impresión 3D (fuente: Bridgewater Studio)

2.3.1 ORÍGENES DE LA FABRICACIÓN ADITIVA

La impresión 3D, tiene sus inicios a principios de los años setenta. La tecnología *inkjet*, fue inventada por Teletype Corporation en los años 60, un método por el cual se podía extraer tinta de una boquilla mediante control electrónico. El resultado, fue un dispositivo capaz de escribir 120 caracteres por segundo sentando las bases de las impresoras de hoy en día.

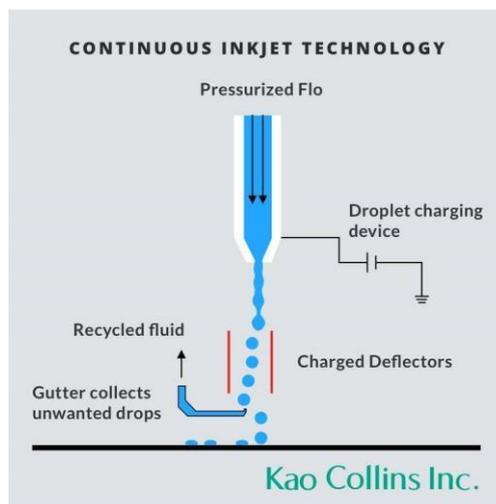


Ilustración 16: Tecnología inkjet (fuente: Kao Collins Inc.)

Siguiendo con esta idea, Teletype lanzó una propuesta, utilizar metal fundido para formar objetos que adquirirían la forma deseada gracias al movimiento controlado de la boquilla, que depositaba el material por capas. Este dispositivo es conocido como *Liquid Metal Recorder*, y fue una de las primeras ideas que planteó que la impresión podía ir más allá del papel. Estos fueron los primeros pasos en el proceso de la extrusión de material, donde un termoplástico se introduce en una boquilla calentada, depositando ésta el material sobre una superficie por capas, principio que usan hoy en día las impresoras 3D domésticas. [11]

Sentadas las bases de la impresión 3D, en 1981, Hideo Kodama desarrolló una de las primeras máquinas de prototipado rápido. Esta máquina fabricaba piezas capa a capa usando una resina que solidificaba al exponerse a luz ultravioleta. Años más tarde, en 1986, Charles W. Hull, conocido como Chuck Hull, presentó la primera patente de la estereolitografía (SLA), una técnica de impresión 3D, además de crear el formato *.stl*, el más utilizado en la impresión 3D. Gracias a estos méritos, Chuck Hull es conocido como el inventor de la impresión 3D.



Ilustración 17 : Chuck Hull, creador de la impresión 3D (fuente: National Inventors Hall of Fame)

En 1988, Carl Deckard, desarrolló la tecnología de sinterizado selectivo por láser (SLS), otra técnica de impresión 3D, que utiliza un láser para fusionar partículas de material en polvo, formando así estructuras sólidas. Poco después, en 1989, Scott Crump patentó la tecnología

de modelado por deposición fundida (FDM), también conocida como fabricación con filamento fundido (FFF), y fundó la empresa Stratasys, que continúa siendo una de las compañías líderes en la industria de la impresión 3D. Ese mismo año, la empresa de Chuck Hull, 3D Systems Corporation, lanzó al mercado la impresora SLA-1, uno de los primeros modelos comerciales de impresoras 3D. [12]



Ilustración 18: Impresora SLA-1 (fuente: SPIE.)

En menos de 10 años, se patentaron tres principales tecnologías de fabricación aditiva, SLA, SLS y FDM, lo que marcó oficialmente el nacimiento de la impresión 3D.

En los años 2000, la impresión 3D ganó mucha visibilidad, en el año 2002 se imprimió un riñón en miniatura completamente funcional que fue probado en animales, teniendo una baja tasa de rechazo.



Ilustración 19: Model de riñón impreso 3D (fuente: ICUA)

Años más tarde, en el 2005, la fabricación aditiva tuvo un punto de inflexión con el proyecto RepRap, fundado por Adrian Bowyer. Tenía como objetivo crear una impresora 3D autorreplicable y era un proyecto de código abierto, pudiéndose utilizar y modificar por cualquiera. El resultado final fue la impresora 3D RepRap, que era capaz de imprimir componentes necesarios para crearse a sí misma, empezando así un movimiento global de impresoras 3D de bajo coste.

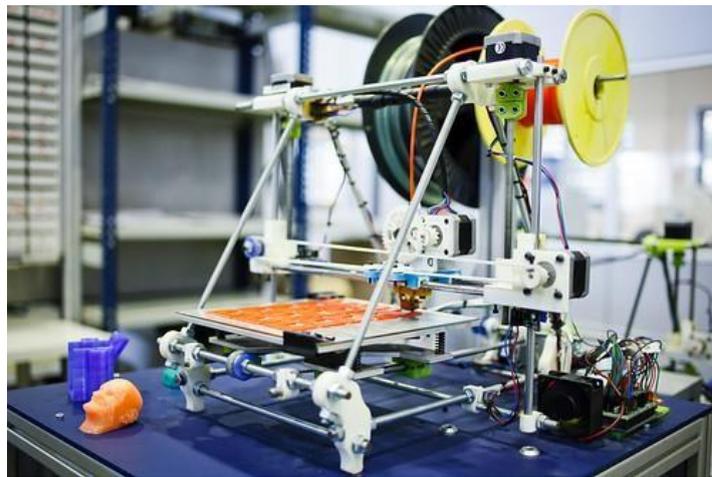


Ilustración 20: Impresora RepRap (fuente: RepRap bcn)

El éxito del proyecto RepRap, junto con el hecho de que muchas patentes relacionadas con la tecnología FDM pasaron a dominio público en el año 2006, impulsó la expansión de las impresoras 3D comerciales. Aparecieron muchos fabricantes de impresoras 3D, destacando el caso de MarketBot. Esta empresa vendía kits de montaje de impresoras 3D de código abierto, pudiendo así los usuarios montar sus propias máquinas, así como modificarlas y proponer nuevos diseños. MarketBot también creó Thingiverse, una comunidad digital de la que se podían descargar miles de archivos para impresión 3D.

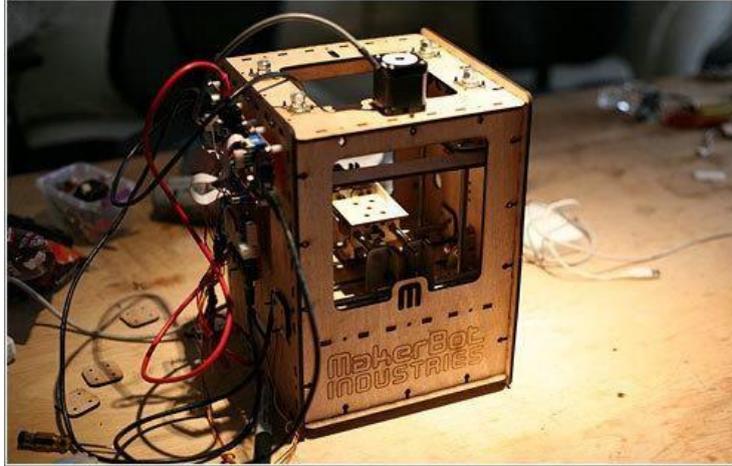


Ilustración 21: Impresora montable de MarketBot (fuente: xataka)

Desde el auge de las impresoras 3D comerciales se ha seguido innovando en estas tecnologías, utilizándose hoy en día en diversas industrias para la creación de prototipos o productos finales. Su versatilidad y capacidad para crear piezas complejas con alta precisión, la hacen una herramienta muy útil en sectores como el aeroespacial, el automotriz o la medicina.

Además, la fabricación aditiva seguirá evolucionando en un futuro, destacando el creciente uso del metal. Esta innovación permite imaginar un futuro en el que se utilicen impresoras 3D para la producción en serie de piezas metálicas, fabricándolas de una forma mucho más económica y rápida.

2.3.2 PRINCIPALES TECNOLOGÍAS DE IMPRESIÓN 3D

En la anterior sección se han mencionado algunas tecnologías de impresión 3D como la estereolitografía, el sinterizado selectivo por láser o la fabricación con filamento fundido, a continuación, se analizarán con detalle las principales tecnologías de impresión 3D:

Estereolitografía (SLS)

La estereolitografía es una tecnología de fabricación aditiva que utiliza una fuente luz, un láser o proyector, para curar resina líquida, solidificándola capa por capa y pudiendo así construir objetos tridimensionales.

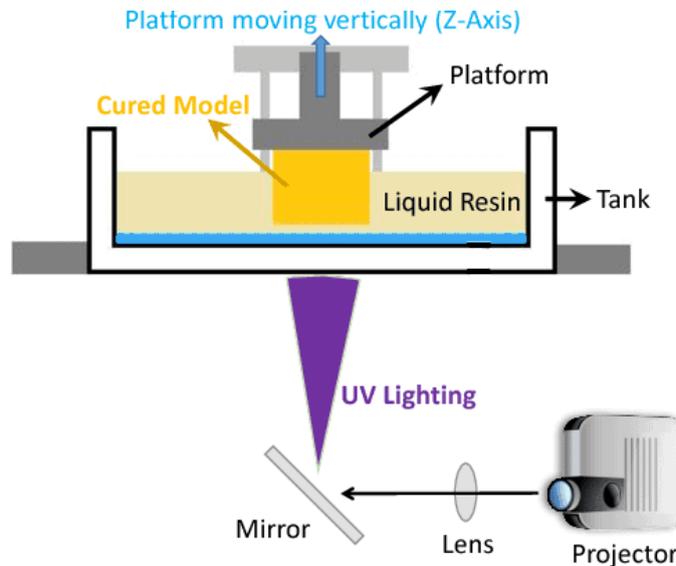


Ilustración 22: Impresión 3D por estereolitografía (fuente: xometry.pro)

La técnica de estereolitografía (SLA) destaca por la homogeneidad que se logra durante la impresión. Dado que la resina no se cura completamente al aplicar cada capa, los grupos polimerizables de la resina establecen enlaces fuertes entre capas. Esto no solo aumenta la resistencia de la pieza, sino que también la hace homogénea e impermeable tras su curado total. También, es una técnica altamente precisa y fiable, al tener un tanque de resina calentado y un entorno cerrado donde imprimir, las condiciones de fabricación son siempre las mismas. Además, se consiguen impresiones muy limpias, no se requiere prácticamente ningún mecanizado ni lijado posterior. [16]

Esta técnica se utiliza sobre todo para la creación de prototipos y piezas funcionales con alta precisión y detalle. Tiene aplicaciones en diversos sectores como el automotriz, la joyería o el aeroespacial, pero cabe destacar la SLA en la odontología, donde más importancia tiene.

Con la estereolitografía se fabrican protectores bucales, coronas, puentes, moldes, alineadores, prótesis y réplicas precisas de dentaduras para estudios. Además, esta tecnología

permite un ahorro significativo para los pacientes, ya que los costes de producción de estas piezas son considerablemente menores en comparación con otros métodos. [17]



Ilustración 23: Dentaduras impresas mediante SLA (fuente: TRD)

Sinterizado selectivo por láser (SLS)

El sinterizado selectivo por láser es una técnica de fabricación aditiva basada en la fusión de lecho de polvo. Consiste en crear objetos tridimensionales mediante un láser que calienta selectivamente partículas de polvo para que se fusionen y formen una estructura sólida. Durante el proceso de sinterizado, el material se calienta lo justo para iniciar la difusión atómica entre partículas, lo que permite su unión sin llegar a fundirse completamente. Las máquinas SLS emplean un láser pulsado para sinterizar con precisión partículas de polvo, logrando imprimir en 3D piezas de geometrías complejas utilizando materiales como plástico, metal, cerámica o vidrio. [18]

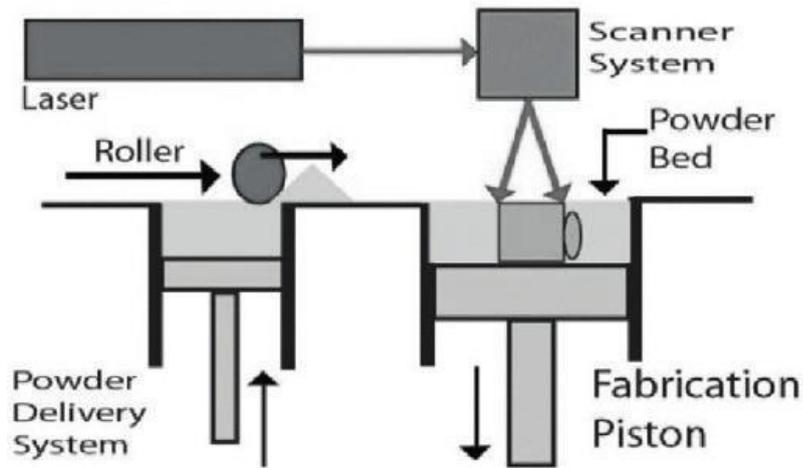


Ilustración 24: Esquema proceso SLS (fuente: Research Gate)

El sinterizado selectivo por láser no necesita estructuras de soporte, lo que permite la creación de geometrías complejas. Además, las piezas fabricadas con esta tecnología presentan una alta resistencia mecánica, pudiéndose fabricar bisagras flexibles, juntas mecánicas, carcasas rígidas y piezas con cierre a presión entre muchas otras.



Ilustración 25: Bisagras impresas mediante impresión 3D (fuente: Rapid Direct)

Modelado por deposición fundida (FDM)

La técnica FDM se considera el método de fabricación aditiva más básico y accesible de todos. Dado que esta técnica se patentó en 1989 por Scott Crump y más tarde se comercializó por su empresa, Stratasys, solo ellos podían usar el acrónimo FDM. Por esto, también se conoce a este método como fabricación por filamento fundido (FFF).

Utiliza un filamento termoplástico enrollado en un carrete que se introduce en un cabezal de extrusión. Este cabezal, equipado con una boquilla, se calienta para derretir el filamento y lo expulsa sobre una plataforma de construcción. La boquilla se desplaza por la plataforma siguiendo las indicaciones de un archivo digital que detalla las capas del objeto. Tras depositar una capa, el material se enfría y endurece, permitiendo que se coloque la siguiente capa encima.

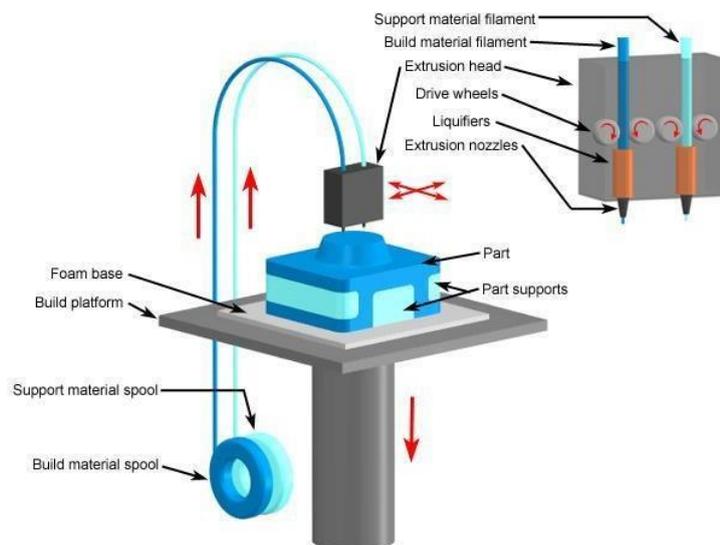


Ilustración 26: Proceso de modelado por deposición fundida (fuente: todo-3D)

Para la impresión FDM se pueden usar una amplia variedad de materiales, ABS, PLA, PET, nylon y materiales compuestos con fibra de carbono, teniendo así muchas aplicaciones. Esta técnica es usada para la fabricación de prototipos, para evaluar diseños antes de la producción final. También se puede usar para la fabricación de piezas de uso final en series cortas de producción.

Fusión selectiva por láser (SLM)

La fusión selectiva por láser es un proceso de impresión 3D, que utiliza un láser de alta potencia para fundir polvo metálico en finas capas, obteniendo así piezas tridimensionales. El proceso comienza con un modelo 3D en CAD. A continuación, la máquina deposita una capa de polvo metálico que el láser funde selectivamente fusionando las partículas capa por capa siguiendo el código de impresión. [20]

La principal diferencia con SLS, es que el SLM utiliza una estructura de soporte, como observamos en la siguiente ilustración.

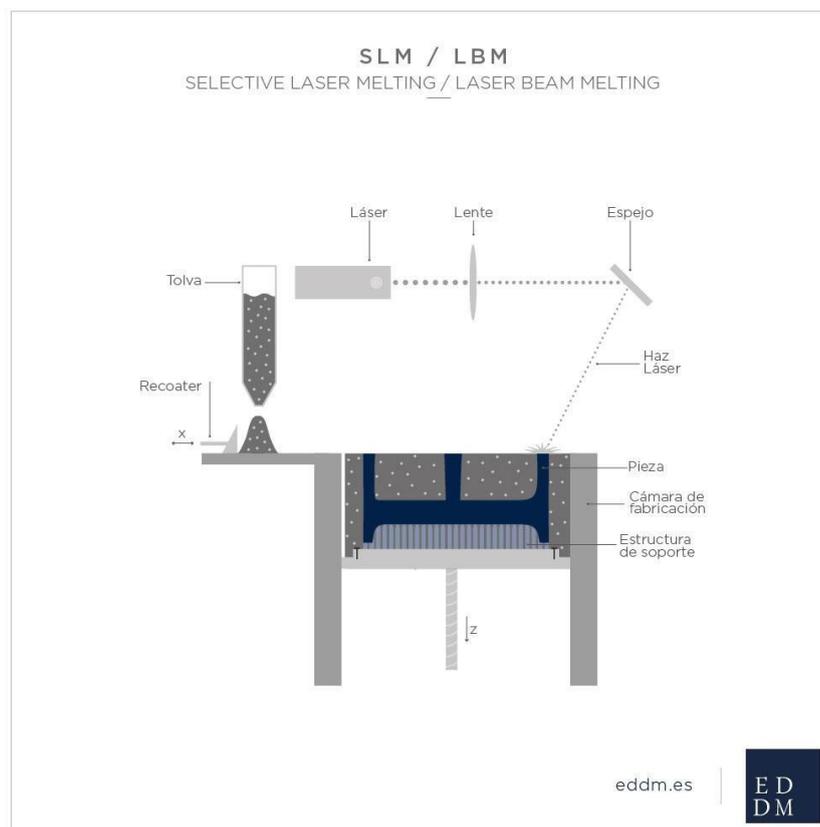


Ilustración 27: Proceso de SLM (fuente: INGENIUS)

Como se ha mencionado antes, esta tecnología usa polvo metálico y actualmente se están desarrollando numerosos materiales, polvos de aluminio, titanio o acero inoxidable, pero cabe destacar el Scalmalloy, un material desarrollado específicamente para esta tecnología. Se trata de una aleación de aluminio, escandio y magnesio que destaca por su alta relación resistencia-peso y su resistencia a la corrosión. [23]

Dado que se pueden crear piezas metálicas de geometría compleja con una alta calidad y resistencia, esta técnica tiene una amplia variedad de aplicaciones como la fabricación de prototipos funcionales, estructuras ligeras para uso en el sector aeroespacial, carcasas rígidas, disipadores térmicos e intercambiadores de calor, entre muchas otras.

Fusión por haz de electrones (EBM)

La fusión por haz de electrones es una variante de la SLM, se funde polvo metálico en finas capas para formar objetos en 3D, y sigue el mismo proceso mencionado anteriormente. La principal diferencia con el SLM es la forma de conseguir el calor necesario para fundir el material, usándose en este caso un haz de electrones extraídos de un filamento de tungsteno al vacío. A parte, el proceso de impresión es más rápido dado que el haz de electrones se extiende a múltiples lugares y precalienta cada capa y puede soportar temperaturas más elevadas.

En contraposición a la fusión selectiva por láser, esta técnica tiene una selección de materiales más limitada utilizando sobre todo titanio y aleaciones de alto rendimiento.

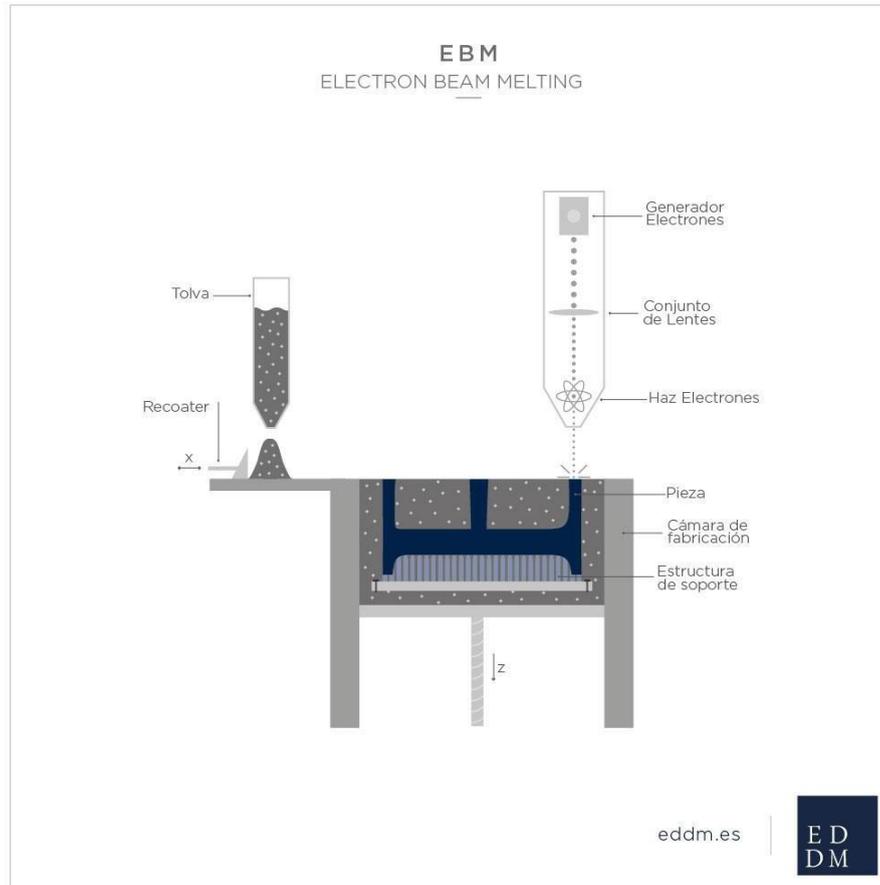


Ilustración 28: Proceso de fusión por haz de electrones (fuente: INGENIUS)

Al igual que la SLM, la fusión por haz de electrones también tiene innumerables aplicaciones, en la industria aeroespacial para fabricar componentes ligeros o en la microelectrónica para la fabricación de componentes. Destaca en el sector médico por la fabricación de implantes de titanio personalizados y la producción de dispositivos médicos.



Ilustración 29: Caja torácica fabricada mediante I3D (fuente: 3Dnatives)

2.4 APLICACIONES DE OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA, DISEÑO GENERATIVO Y FABRICACIÓN ADITIVA EN EL SECTOR AUTOMOTRIZ

El sector de la automoción, solo superado por el aeroespacial, es el principal usuario de la impresión 3D para la fabricación de componentes de vehículos, ambos buscando un mismo objetivo, mejorar la eficiencia del combustible y así el rendimiento total del vehículo o aeronave en cuestión.

Las aplicaciones de la fabricación aditiva en el sector automotriz son muchas, permite crear prototipos rápidos en horas para poder realizar pruebas e iteraciones en las primeras etapas de fabricación, permite crear piezas más ligeras y resistentes, minimiza los desechos de materia prima, simplifica la personalización de los vehículos de los clientes entre muchas otras cosas.

Entrando en detalle, Volkswagen lleva 25 años utilizando la fabricación aditiva, acelerando los procesos de producción y minimizando los costes. Su última aplicación de fabricación aditiva ha sido utilizada para fabricar piezas del pilar A, que da soporte al parabrisas, del Volkswagen T-Roc descapotable, reduciendo en un 50% el peso con respecto a las piezas convencionales, fabricadas con láminas de acero. Se ha usado una técnica de fabricación aditiva, la inyección aglutinante o *binder jetting* donde se deposita un adhesivo sobre capas de material en polvo para la fabricación de la pieza metálica, posteriormente se calienta y se

le da forma. En comparación con otras técnicas de impresión 3D, esta no se calienta durante su fabricación, evitando así la creación de tensiones residuales internas.

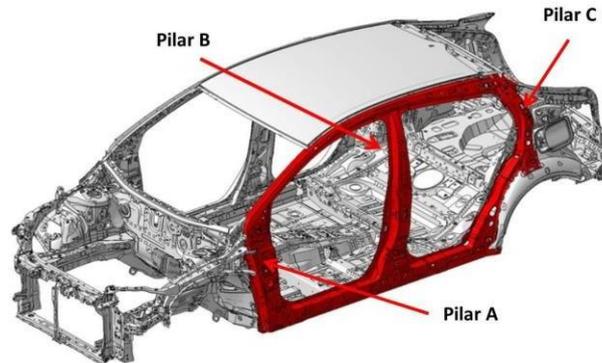


Ilustración 30: Pilar A vehículo (fuente: CARdesign)

También aparece el caso de General Motors que se asoció con Autodesk para diseñar componentes de automóvil mediante la fabricación aditiva obteniendo reducciones totales de unos 159 kilogramos por vehículo. Cabe destacar el rediseño del soporte del asiento donde se sujetan los cinturones de seguridad, se obtuvo un soporte un 40% más ligero y a su vez un 20% más resistente.

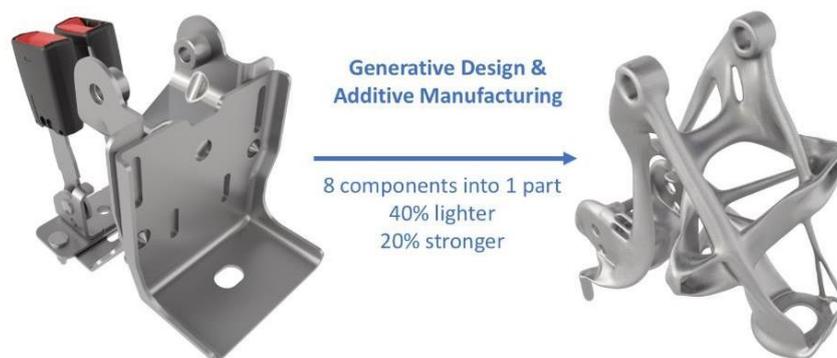


Ilustración 31: Soporte de asiento optimizado (fuente: Autodesk)

Porsche también ha utilizado la fabricación aditiva para la producción de piezas específicas de sus modelos más antiguos y exclusivos. Actualmente está fabricando la palanca de liberación del embrague del Porsche 959 mediante impresión 3D. Al haberse producido solo 300 modelos del coche, el volumen de la demanda de esta pieza era escaso, por lo que la

utilización de la fabricación aditiva para su producción fue clave. Además, actualmente Porsche está estudiando la viabilidad de fabricar otros 20 componentes mediante técnicas de fabricación aditiva. [25]

Además, hay que destacar que Bentley Motors ha invertido cerca de tres millones de libras para duplicar su capacidad de impresión 3D en su sede en Inglaterra, donde se producen todos los modelos del coche. En 2021, produjo más de 15000 componentes, incluyendo bloques de lijado o herramientas para fabricar el modelo Blower Continuation, uno de sus vehículos más exclusivos, además de producir también varios componentes para prototipos para el estudio aerodinámico de automóviles en túneles de viento o modelos del tren motriz a escala real.

Finalmente, Ford fabricó un colector de admisión de aluminio, un componente que se encarga de suministrar el aire desde los turbocompresores hasta los cilindros del motor. Esta pieza se instaló en un Hoonitruck de 1977, y se trata de la pieza de repuesto más grande fabricada con técnicas de fabricación aditiva. [28]

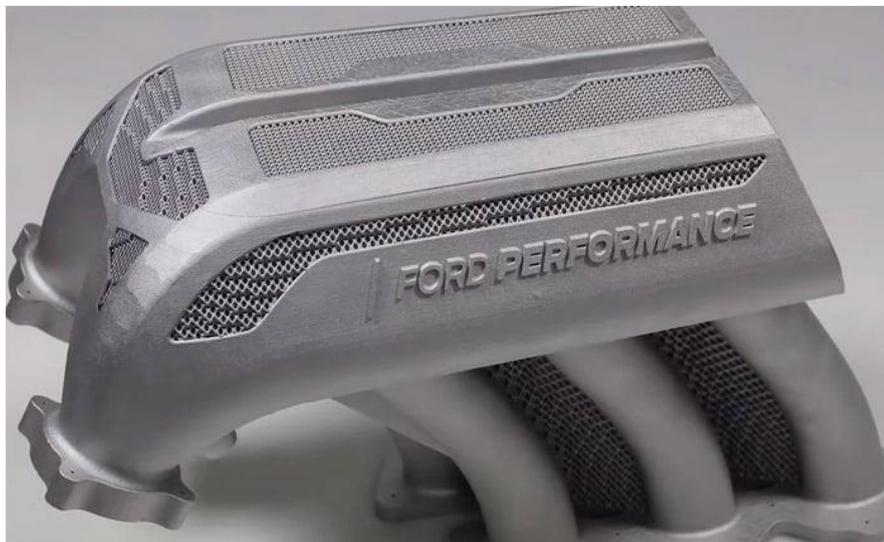


Ilustración 32: Colector de admisión fabricado por Ford (fuente:3dnatives)

Capítulo 3. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

El principal objetivo de este proyecto será rediseñar el pedal de freno de un vehículo turismo utilizando criterios de optimización topológica.

Para el primer diseño, usaremos un modelo similar a un pedal de freno comercial y realizaremos un modelo 3D mediante Solid Edge. [29]



Ilustración 33: Modelo 3D inicial del pedal de freno (fuente: elaboración propia)

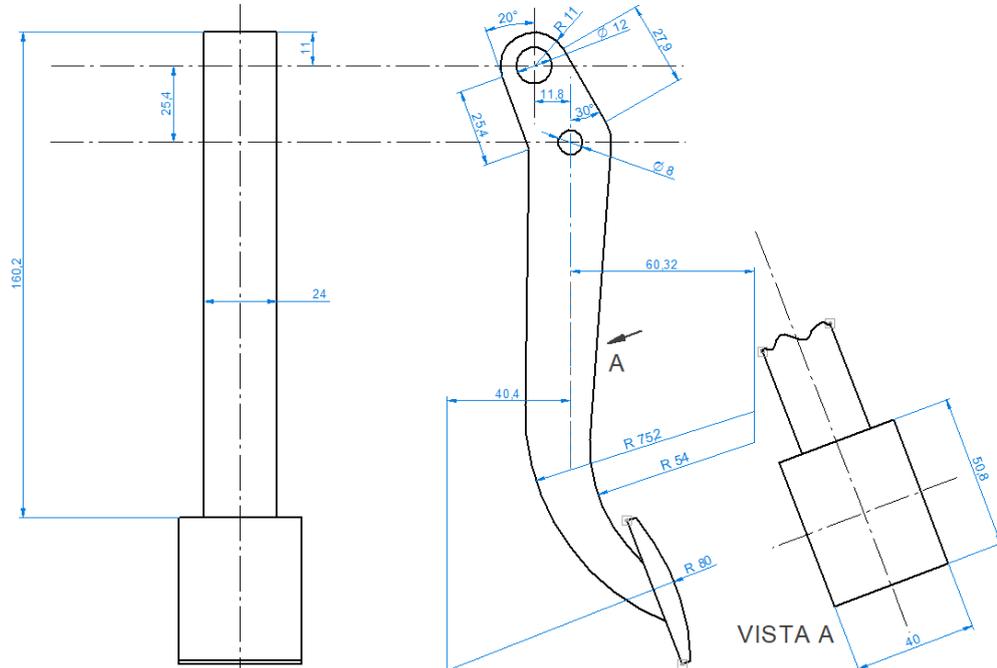


Ilustración 34: Dimensiones modelo inicial (fuente: elaboración propia)

3.1 CÁLCULO DE CARGAS

Según las normas de la FSAE (Formula Society of Automotive Engineers), los pedales de freno para sus vehículos de competición se diseñan para soportar cargas de 2000 N. Supondremos ese valor como fuerza de frenado máxima que puede ejercer una persona en caso de un frenazo repentino y haremos los cálculos en base a ese valor.

Realizaremos un cálculo de la tensión máxima aproximada que soportará el pedal para la selección del material. Para ello tomaremos primero la longitud desde el centro del punto de apoyo del pie, donde se aplica la fuerza, hasta la parte superior del pedal, y nos calcularemos el momento flexor máximo.

$$L = 160,2 + 50,8 = 185,6 \text{ mm}$$

$$M = F * L = 2000 * 0,1856 = 371,2 \text{ Nm}$$

Ahora calcularemos la sección del pedal para calcular la tensión máxima, esta sección, es aproximadamente un rectángulo de 24x27 mm. Además, la distancia desde el punto de aplicación de la fuerza a la fibra neutra es de unos 22 mm. Con estos datos y el momento de inercia de un rectángulo, obtenemos la tensión máxima aproximada que soportará el pedal.

$$I = \frac{1}{12} * b * h^3 = \frac{1}{12} * 24 * 27^3 = 39366 \text{ mm}^4$$

$$\sigma = \frac{M * y}{I} = \frac{371,2 * 10^3 * 18}{39366} = 169,73 \text{ MPa}$$

3.2 ASIGNACIÓN DEL MATERIAL

Una vez tenemos las cargas aproximadas que soportará el pedal podemos elegir el material de fabricación, donde buscaremos un límite elástico mayor que la tensión máxima para evitar deformaciones permanentes en nuestro componente.

El material seleccionado para la fabricación final es AlSi10Mg, una aleación de aluminio que contiene silicio y magnesio. Es un material ampliamente utilizado en la impresión 3D metálica, presenta una alta relación resistencia-peso, muy útil en nuestro caso dado que buscamos optimizar el componente manteniendo las prestaciones mecánicas, además de una buena resistencia a la corrosión

Dado que el material no está dentro de Solid Edge, lo añadiremos con los datos de la ficha técnica.

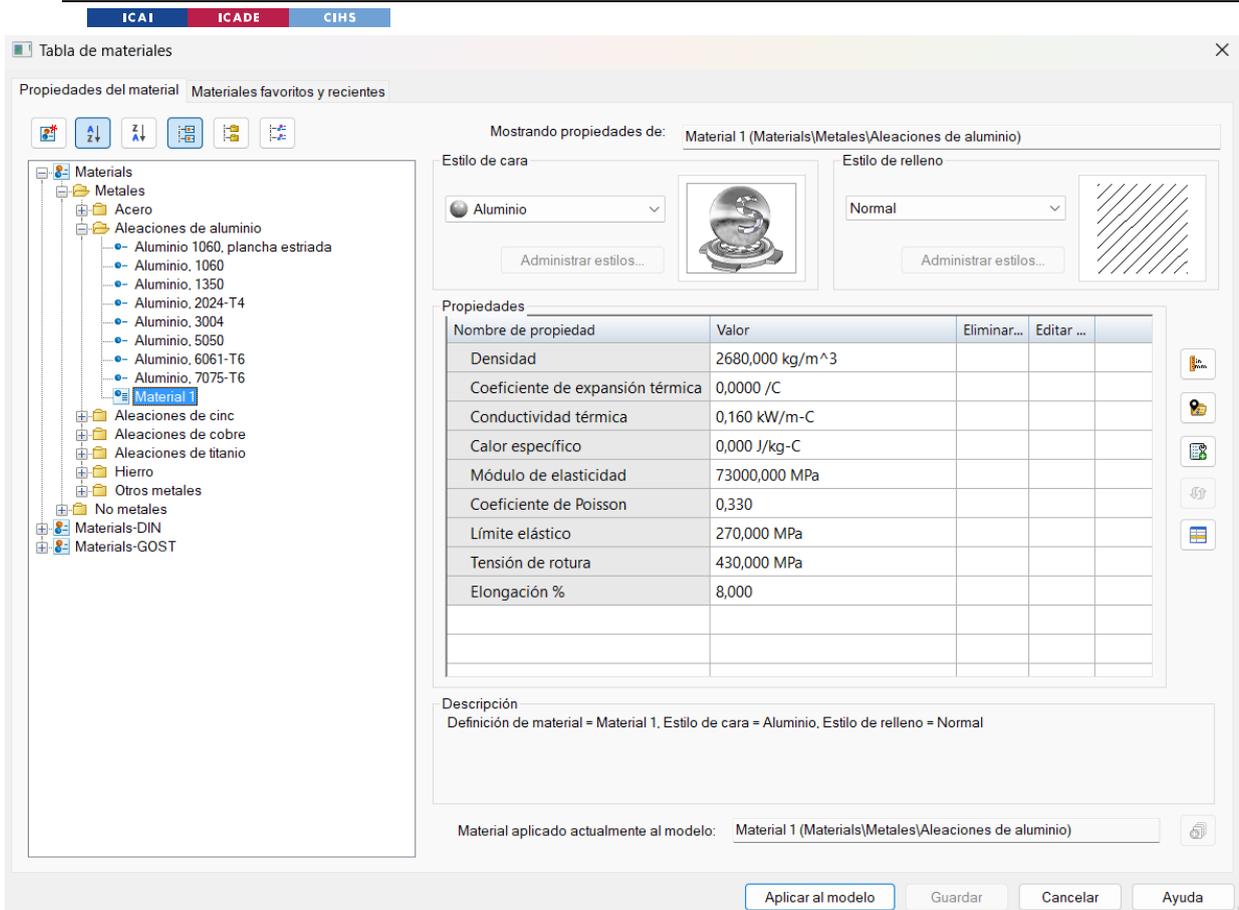


Ilustración 35: Adición de aluminio AlSi10Mg a SolidEdge (fuente: elaboración propia)

Observamos que el material presenta un límite elástico bastante mayor que nuestra carga máxima calculada por lo que en un principio no habrá deformación plástica, más tarde se comprobará mediante simulaciones.

3.3 SIMULACIÓN MODELO INICIAL

Mediante el software SolidEdge realizaremos una primera simulación del pedal de freno para observar su comportamiento bajo carga y verificar que no hay deformación plástica ni rotura.

Primero deberemos crear un nuevo estudio de simulación, estático lineal, y con el tipo de malla tetraédrico y aplicar las condiciones de contorno necesarias. Empezaremos asignando la carga, perpendicular a la superficie de apoyo del pie y con un valor de 2000000 mN, ya que son las unidades que tiene predeterminadas Solid Edge.

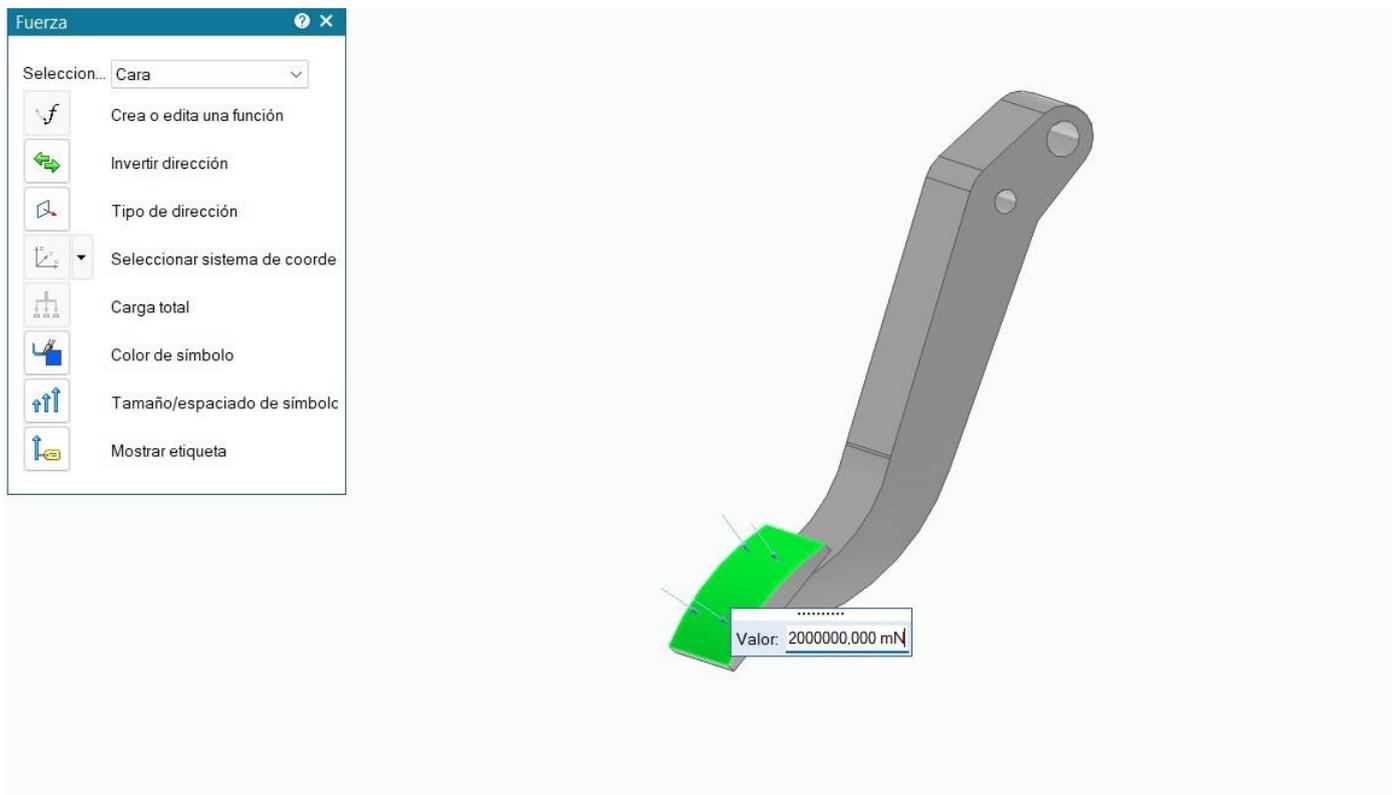


Ilustración 36: Carga para simulación (fuente: elaboración propia)

También restringiremos los desplazamientos y giros en los dos puntos de apoyo del pedal.

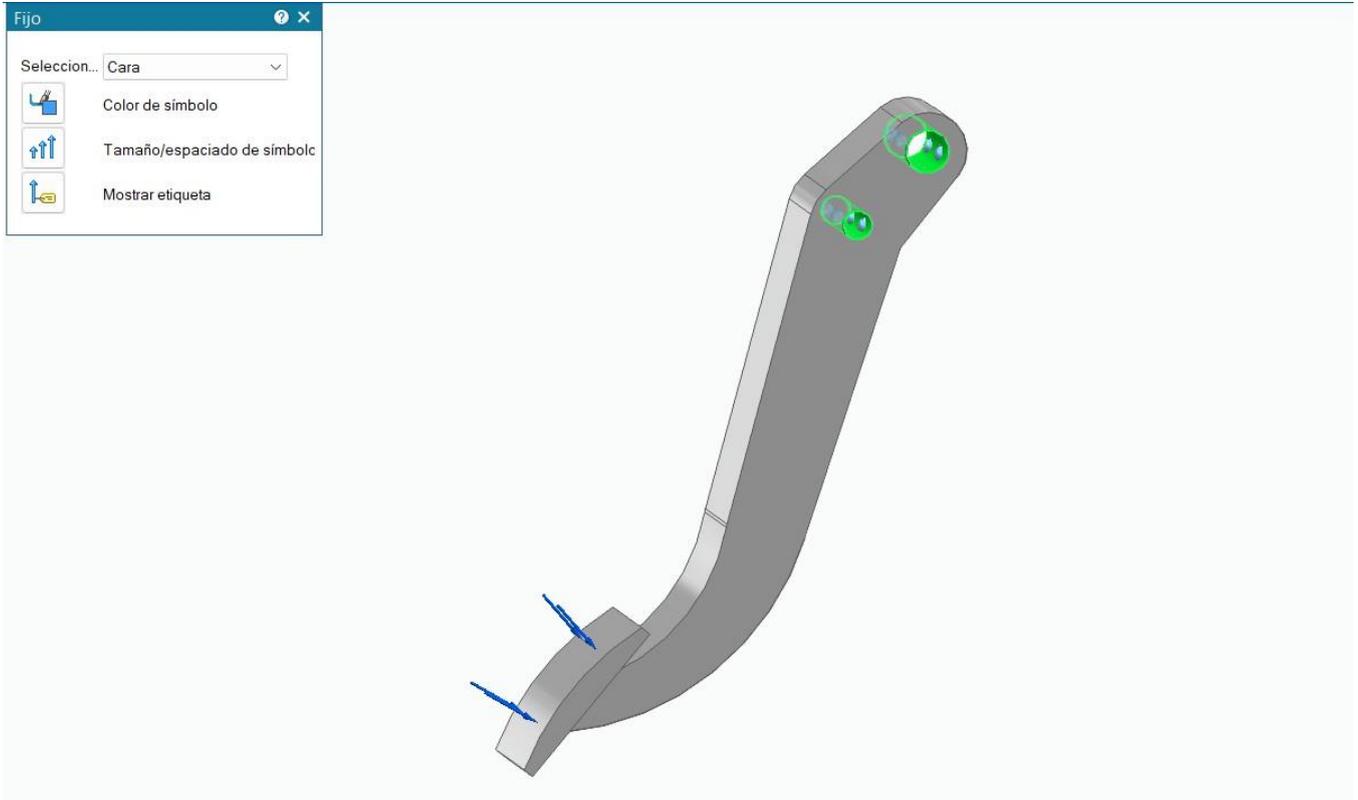


Ilustración 37: Restricciones de movimiento (fuente: elaboración propia)

Una vez impuestas las condiciones de contorno, y con el material correctamente aplicado, procederemos a realizar la simulación.

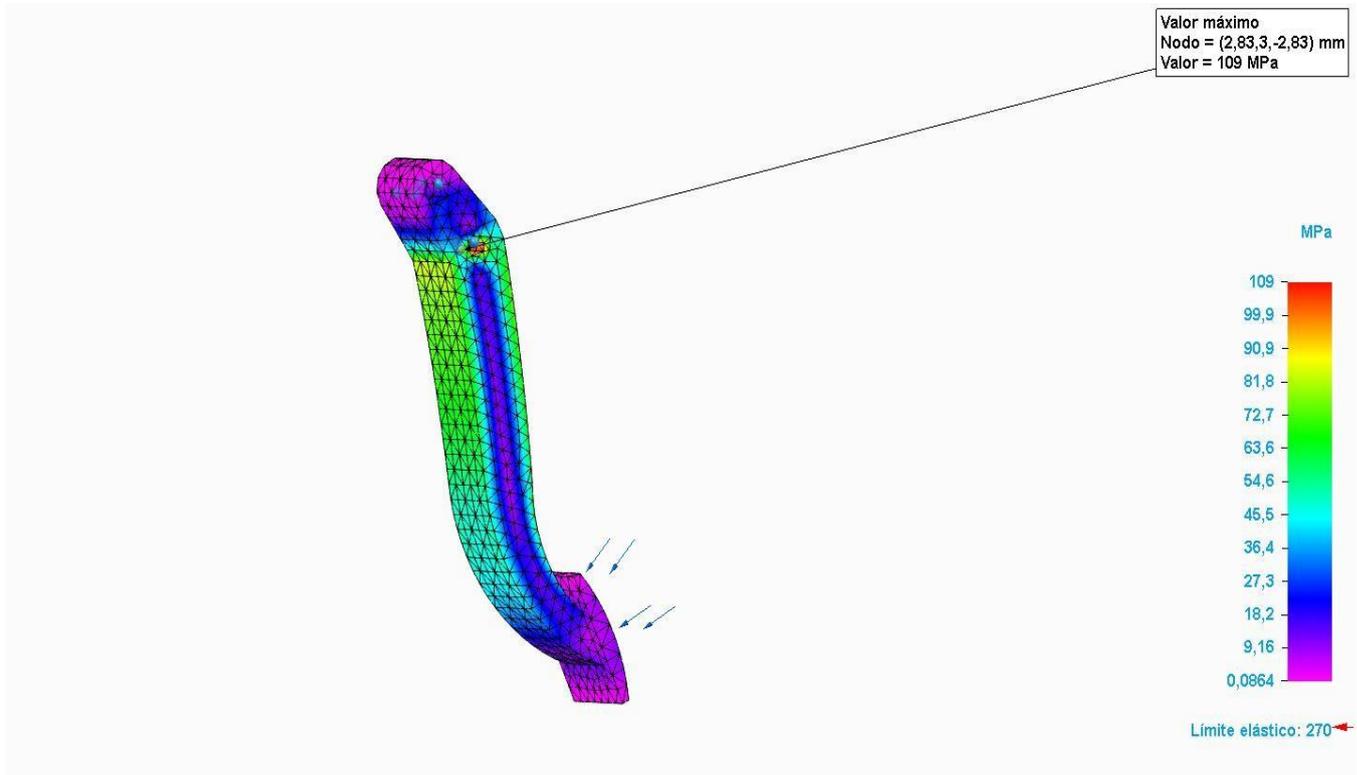


Ilustración 38: Resultados de simulación (fuente: elaboración propia)

Tras esta primera simulación, observamos que no se supera el límite elástico en ningún momento, con una tensión máxima, obtenida con el criterio de Von Mises, de 109 MPa, en el primer punto de apoyo. Observamos que el pedal está correctamente diseñado, con bastante margen hasta llegar a la tensión de límite elástico, obteniéndose un coeficiente de seguridad de prácticamente 2,5, por lo que a continuación podremos proceder con la optimización del modelo.

Capítulo 4. OPTIMIZACIÓN DEL MODELO

Procederemos con la optimización del modelo inicial del pedal de freno también utilizando el software Solid Edge. Para ello realizaremos una serie de iteraciones buscando reducir la masa y después simulando la nueva geometría para observar su comportamiento bajo carga, hasta obtener una reducción considerable que no comprometa el componente.

Para ello, dentro de Solid Edge iremos al apartado de diseño generativo y seleccionaremos el espacio de diseño sobre el que queremos trabajar, que será todo el pedal en nuestro caso.

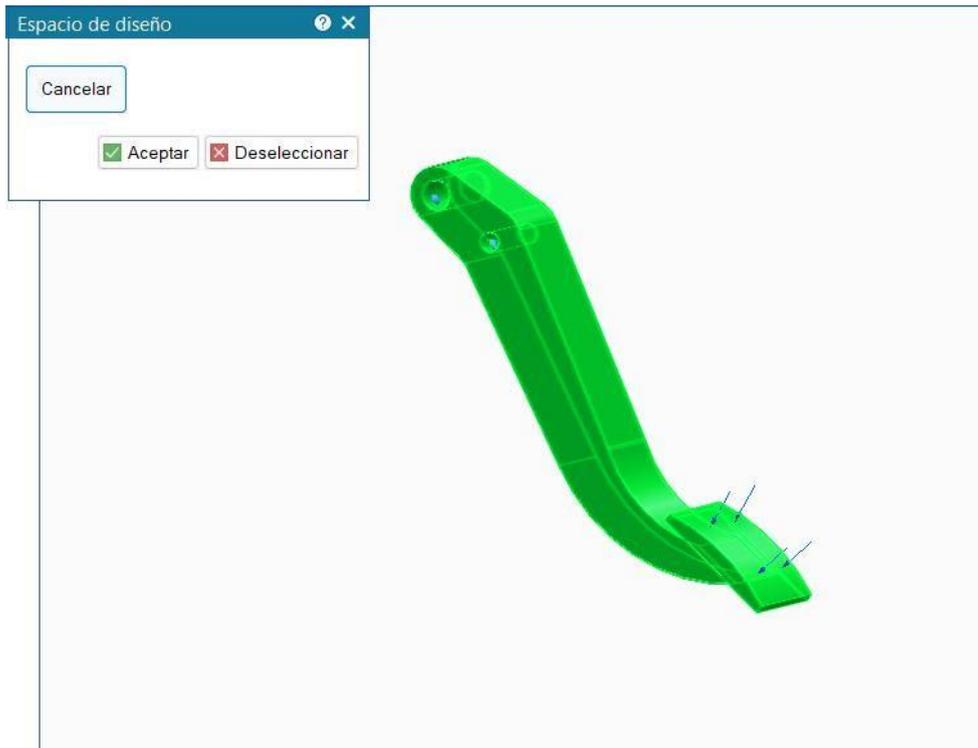


Ilustración 39: Espacio de diseño sobre el que se trabajará (fuente: elaboración propia)

4.1 RESTRICCIONES Y CONDICIONES DE CONTORNO

A continuación, se realizará un proceso muy similar al que se hizo durante la simulación FEM. Primero deberemos poner la carga que soportará nuestro componente, pero en este caso aparece un nuevo campo, donde tendremos que poner cuanto material alrededor de la zona de la fuerza queremos que se respete durante la simulación.

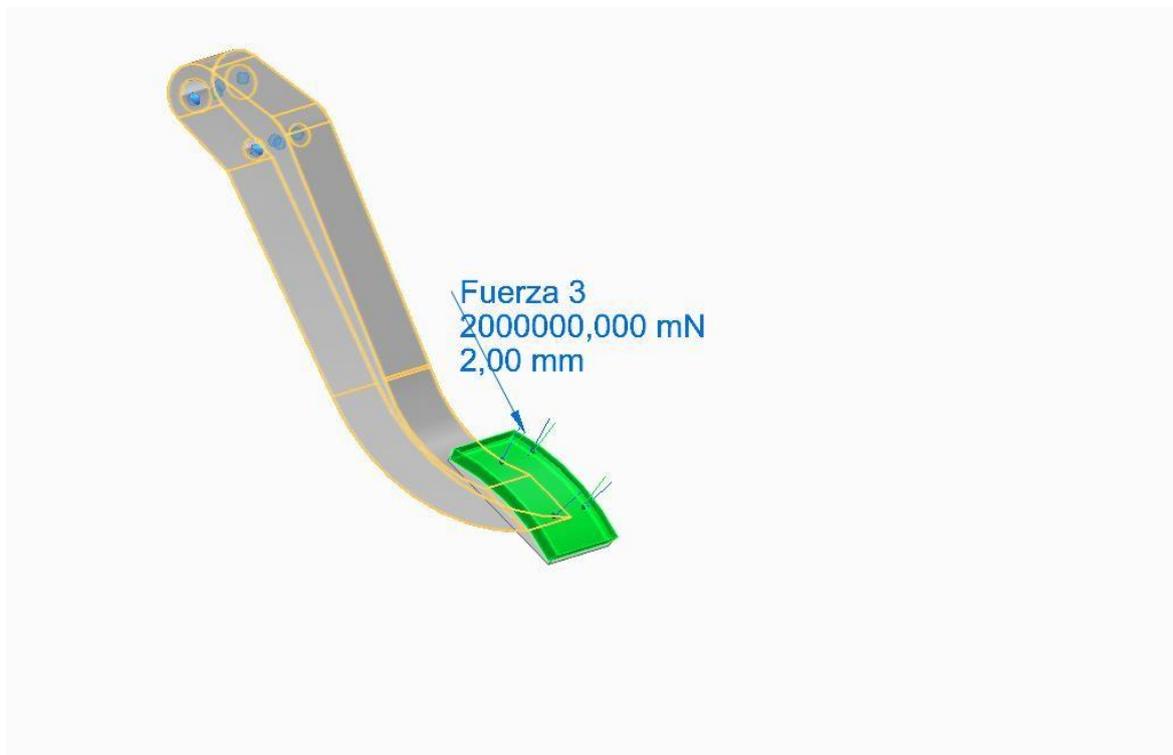


Ilustración 40: Aplicación de la fuerza para optimización topológica (fuente: elaboración propia)

En la ilustración 40, observamos que se aplica la fuerza de la misma manera, perpendicular al punto de apoyo del pie y de mismo valor, además de preservar 2 mm alrededor de ella, no alterando así la superficie del punto de apoyo del pie.

También deberemos restringir los movimientos en los puntos de sujeción del pedal, además de conservar material alrededor de los agujeros.

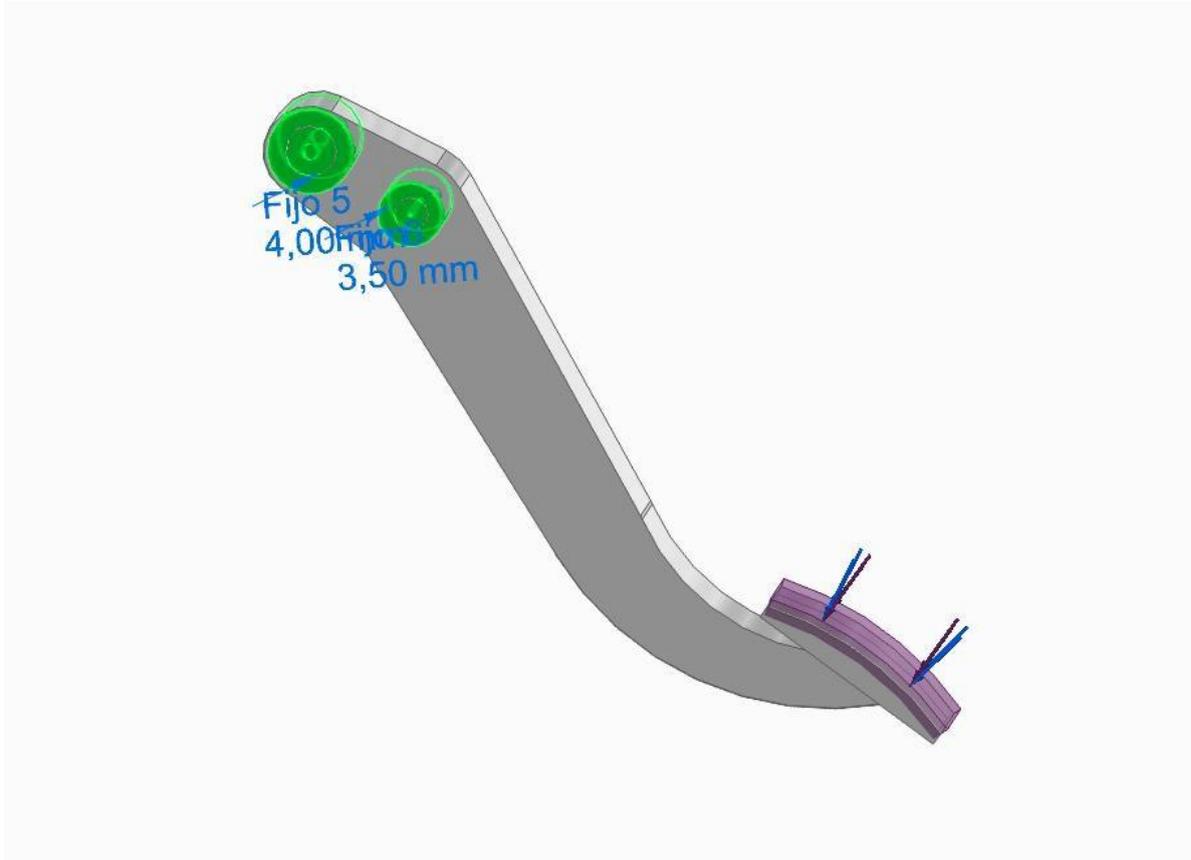


Ilustración 41: Puntos de sujeción para optimización topológica (fuente: elaboración propia)

Finalmente, una vez aplicadas la fuerza y la fijación de los agujeros, preservaremos dos regiones, toda la zona alrededor de los agujeros, para no comprometer la región alrededor de los puntos de apoyo y toda la zona de aplicación de la fuerza, como observamos en la siguiente ilustración.

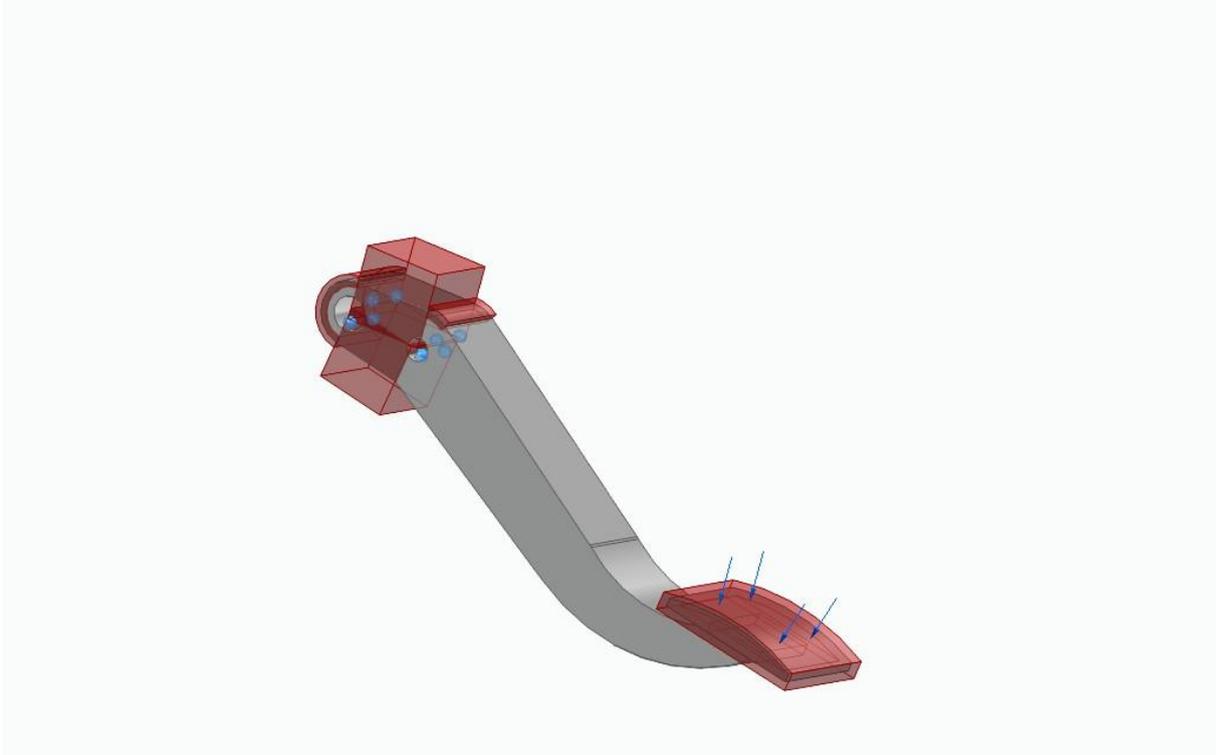


Ilustración 42: Regiones preservadas (fuente: elaboración propia)

Una vez seleccionado el espacio de diseño y aplicadas las condiciones de contorno podremos proceder con la primera iteración.

4.2 PROCESO DE OPTIMIZACIÓN

4.2.1 PRIMERA ITERACIÓN

Para la primera iteración se buscará reducir la masa del pedal en un 10% con una calidad de estudio de 50.

ICAI ICADE CIHS

Generar estudio

Calidad del estudio

Bajo Alto

Tamaño de vóxel: 0,92 mm ⓘ

Reducción de masa

Reducir por este porcentaje

5% 95%

Masa original: 0,362 kg

Masa objetivo: 0,326 kg

Ilustración 43: Parámetros optimización 10% (fuente: elaboración propia)

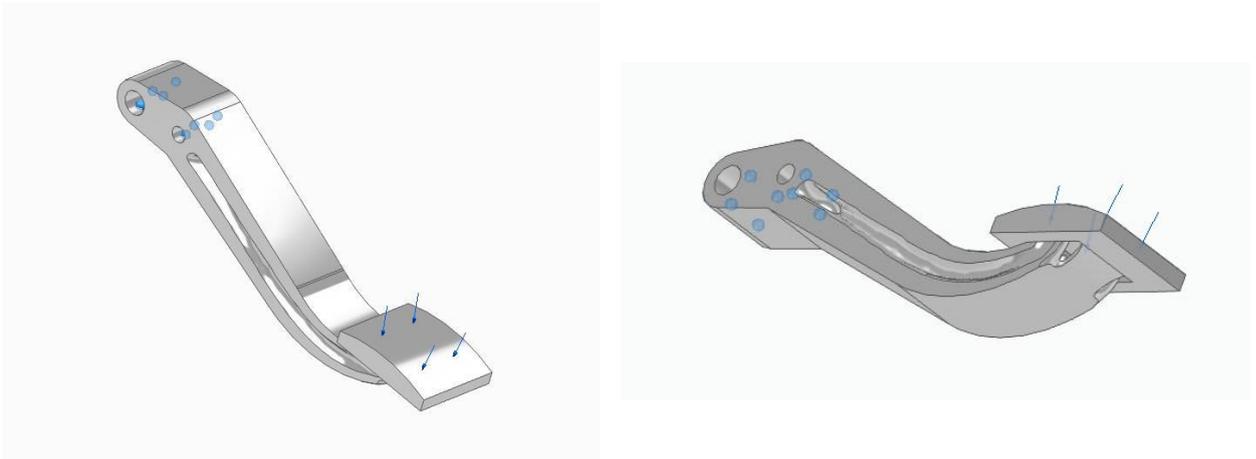


Ilustración 44: Resultados iteración 10% (fuente: elaboración propia)

Tras la primera iteración realizaremos una simulación bajo carga para comprobar que el pedal no rompa.

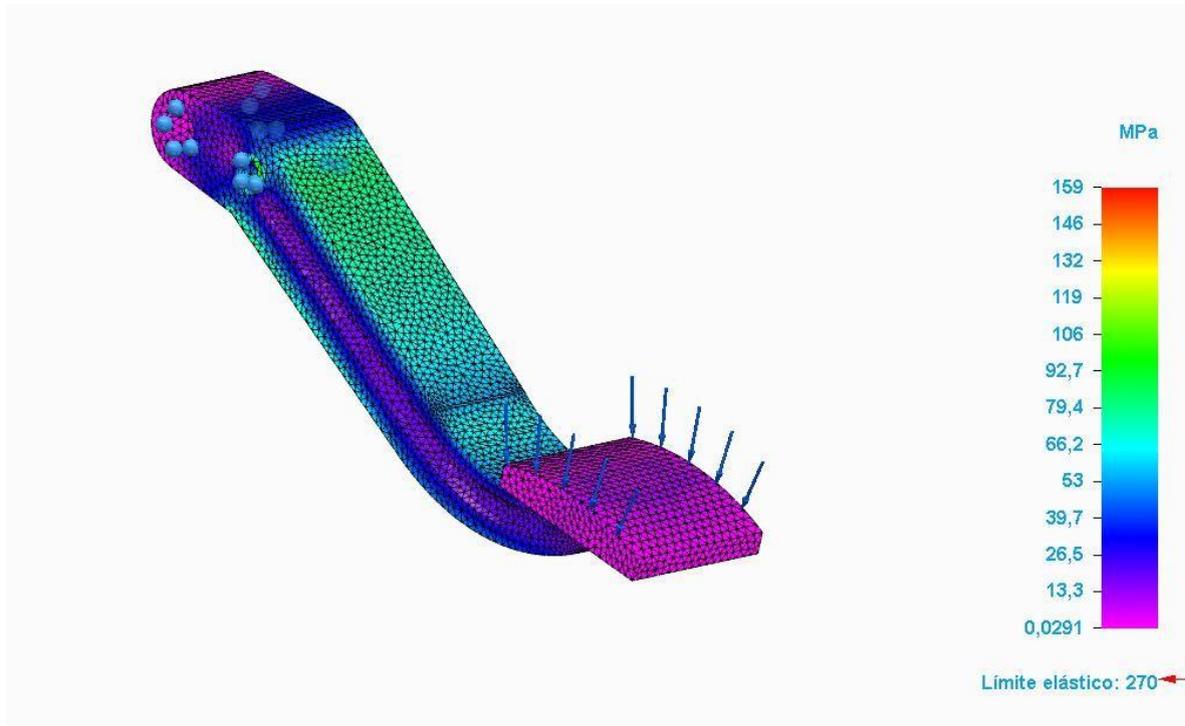


Ilustración 45: Simulación FEM pieza optimizada al 10% (fuente: elaboración propia)

Tras la primera iteración observamos que nos quedamos lejos del límite elástico, con una tensión máxima de 159 MPa y un límite elástico de 270 MPa por lo que no habrá deformación plástica y podemos buscar una reducción mayor de material.

4.2.2 SEGUNDA ITERACIÓN

Para esta segunda iteración buscaremos una reducción del 20% de la masa total del pedal, utilizando una calidad de estudio de 50.

Generar estudio

Calidad del estudio

Bajo Tamaño de vóxel: 0.92 mm Alto

Reducción de masa

Reducir por este porcentaje

5% 95%

Masa original: Masa objetivo:

Ilustración 46: Parámetros optimización 20% (fuente: elaboración propia)

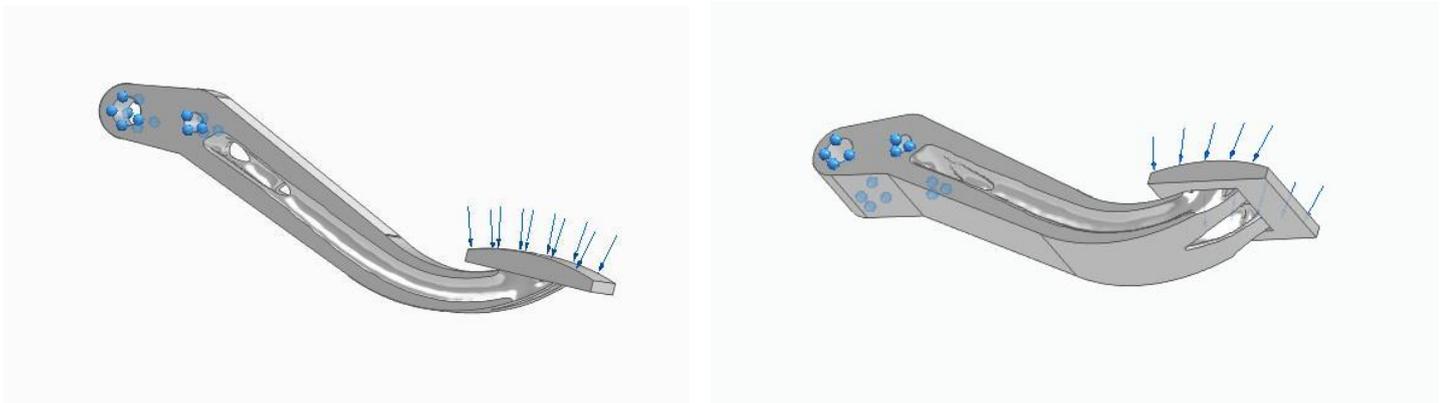


Ilustración 47: Resultados optimización 20% (fuente: elaboración propia)

Procederemos a realizar la simulación FEM para comprobar que no romperá bajo carga.

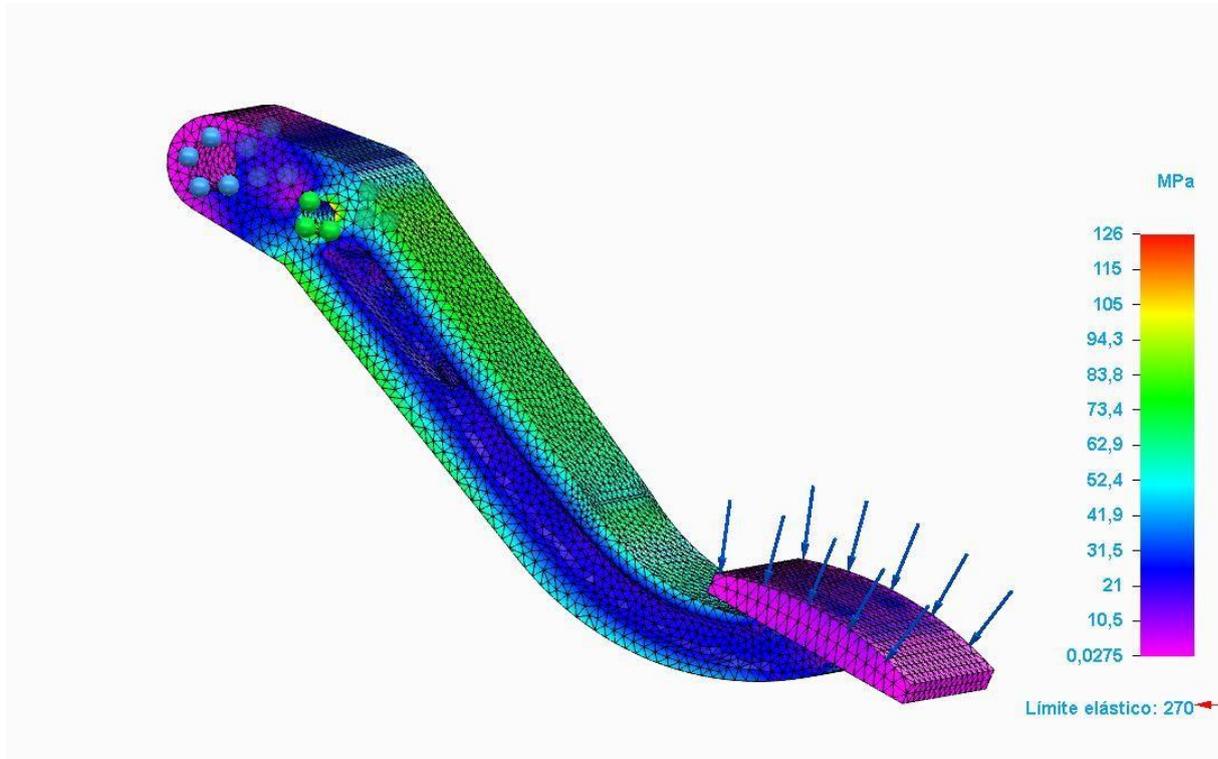


Ilustración 48: Simulación FEM optimización 20% (fuente: elaboración propia)

Observamos una tensión máxima de 126 MPa, inferior a la tensión del límite elástico, por lo que buscaremos una reducción de masa mayor.

4.2.3 TERCERA ITERACIÓN

En esta tercera iteración buscaremos una reducción del 30% de la masa total del pedal con una calidad de estudio del 50%.

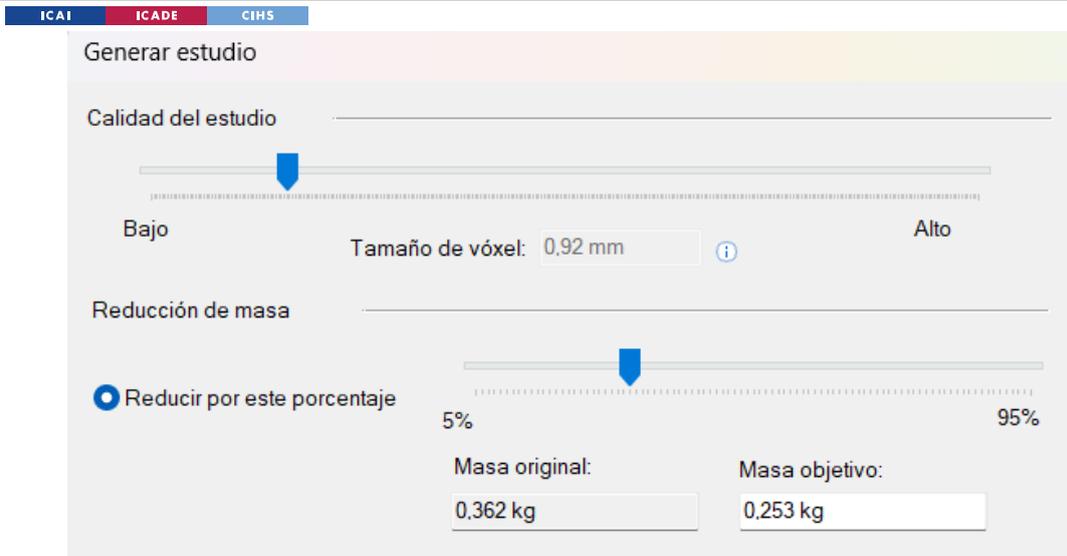


Ilustración 49: Parámetros optimización 30% (fuente: elaboración propia)

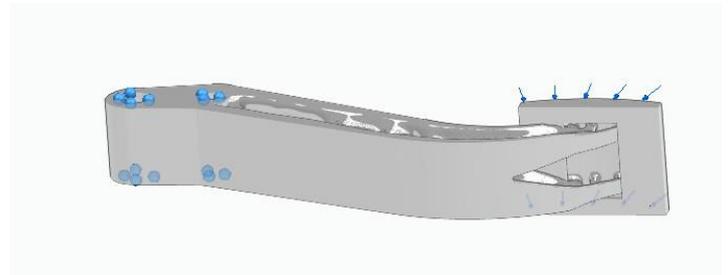
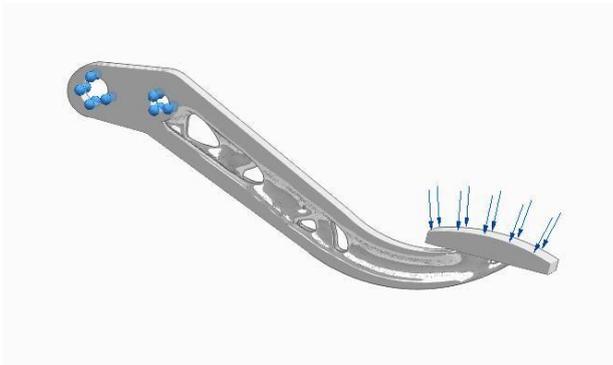


Ilustración 50: Resultado optimización 30% (fuente: elaboración propia)

A continuación, realizaremos la simulación FEM de este nuevo diseño para comprobar que no rompe.

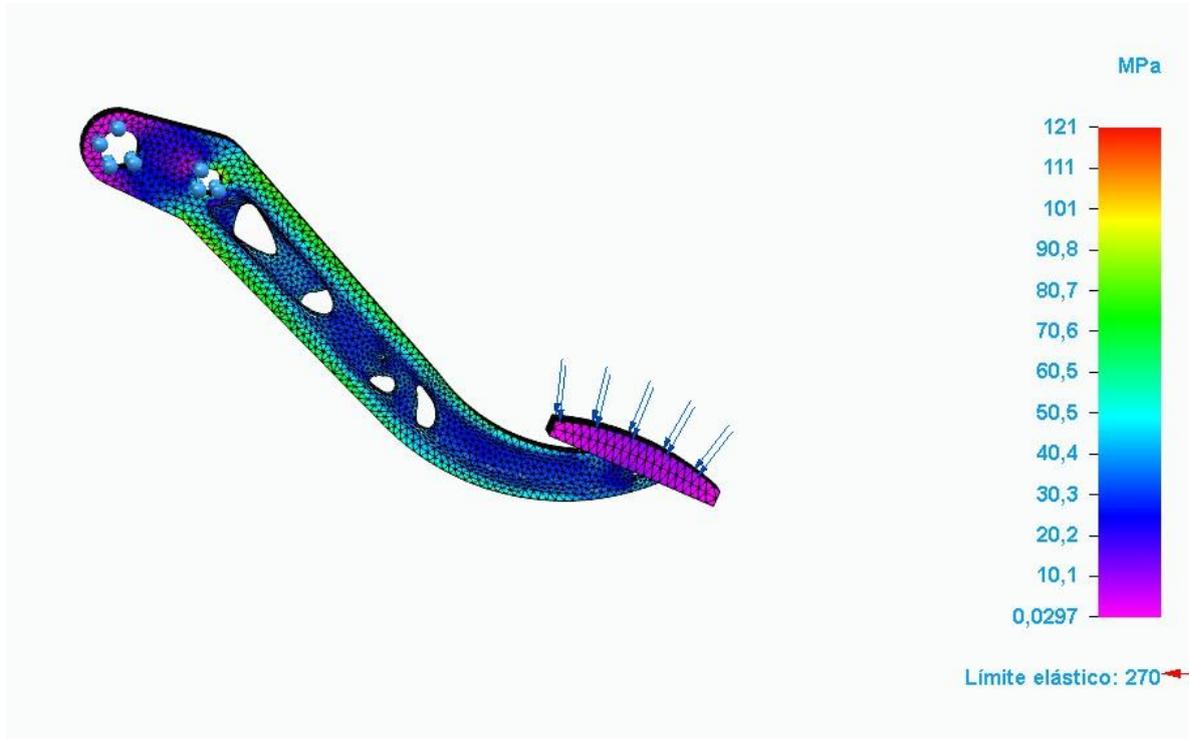


Ilustración 51: Simulación FEM optimización 30% (fuente: elaboración propia)

Observamos una tensión máxima de 121 MPa, inferior a la tensión del límite elástico, por lo que buscaremos una reducción de masa mayor.

4.2.4 CUARTA ITERACIÓN

En esta cuarta iteración buscaremos una reducción de la masa total de un 40% con una calidad de estudio de 50.

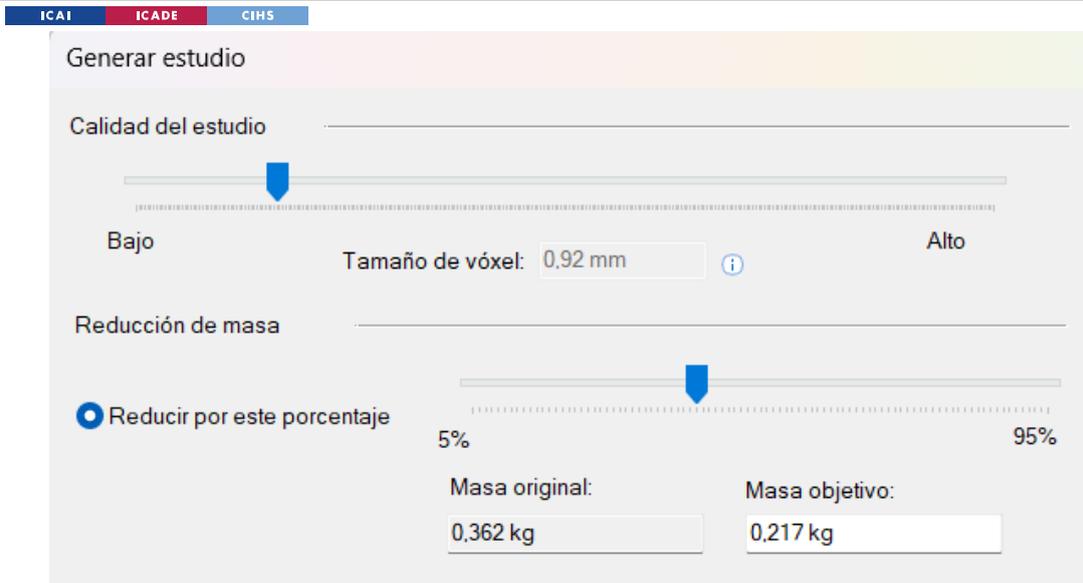


Ilustración 52: Parámetros optimización 40% (fuente: elaboración propia)

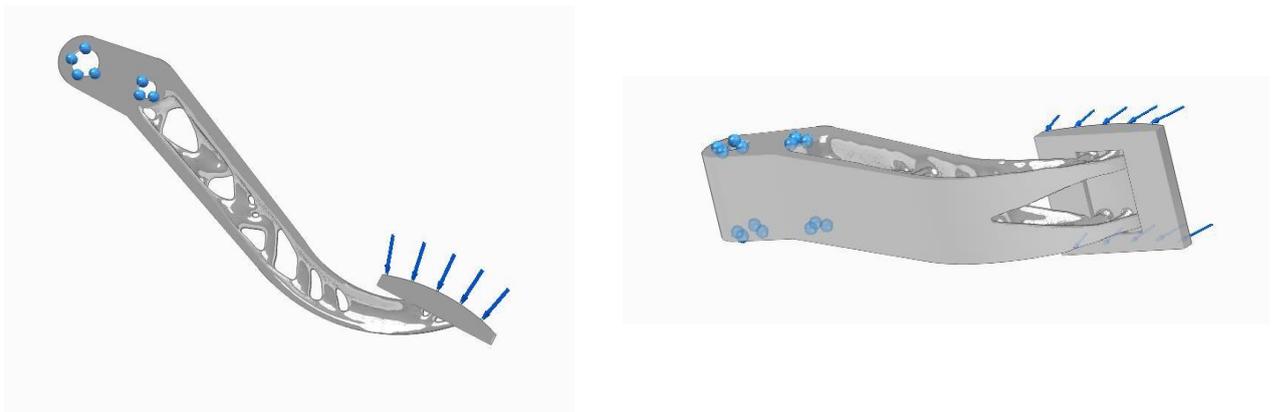


Ilustración 53: Resultado optimización 40% (fuente: elaboración propia)

A continuación, realizaremos la simulación FEM del nuevo diseño, para comprobar que no rompe.

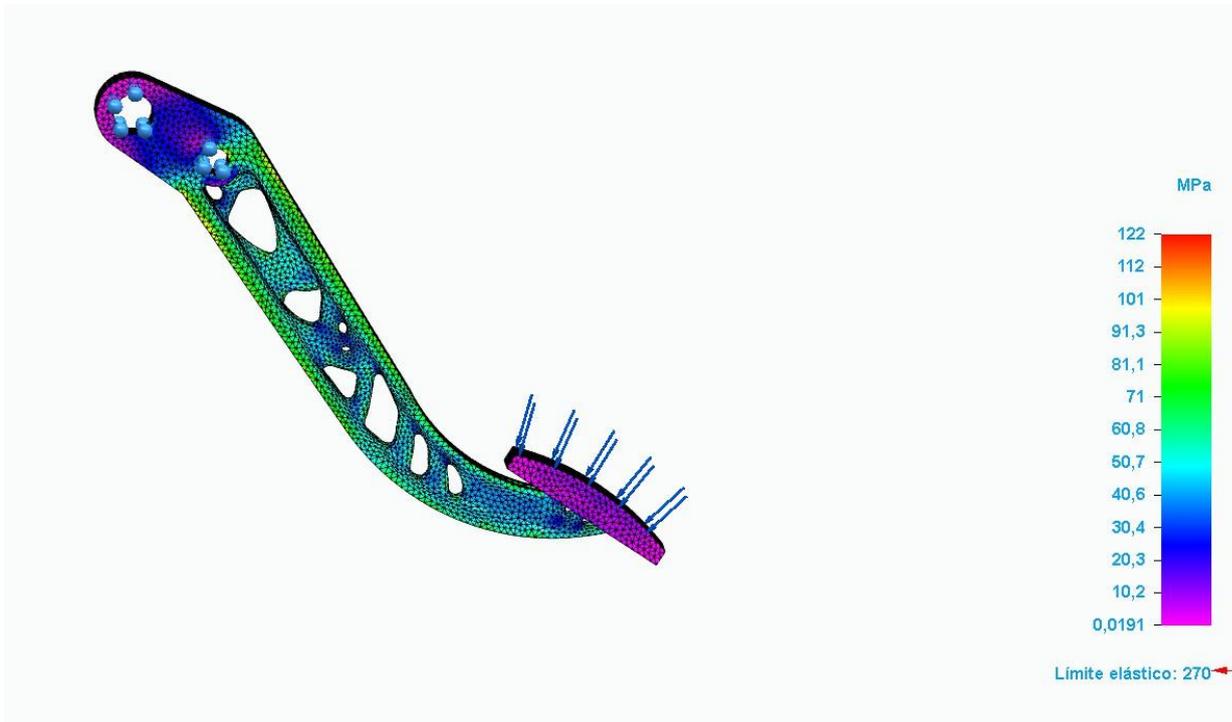


Ilustración 54: Simulación FEM optimización 40% (fuente: elaboración propia)

Observamos una tensión máxima de 122 MPa, inferior a la tensión del límite elástico por lo que podemos buscar una reducción mayor de material.

4.2.5 QUINTA ITERACIÓN

En esta quinta iteración buscamos una reducción del material del 50% con una calidad de estudio de 50.

ICAI ICAD E CIHS

Generar estudio

Calidad del estudio

Bajo Alto

Tamaño de vóxel: 0,92 mm

Reducción de masa

Reducir por este porcentaje

5% 95%

Masa original: 0,362 kg

Masa objetivo: 0,181 kg

Ilustración 55: Parámetros optimización 50% (fuente: elaboración propia)

Al intentar generar este diseño con una reducción del 50% aparece el siguiente error:

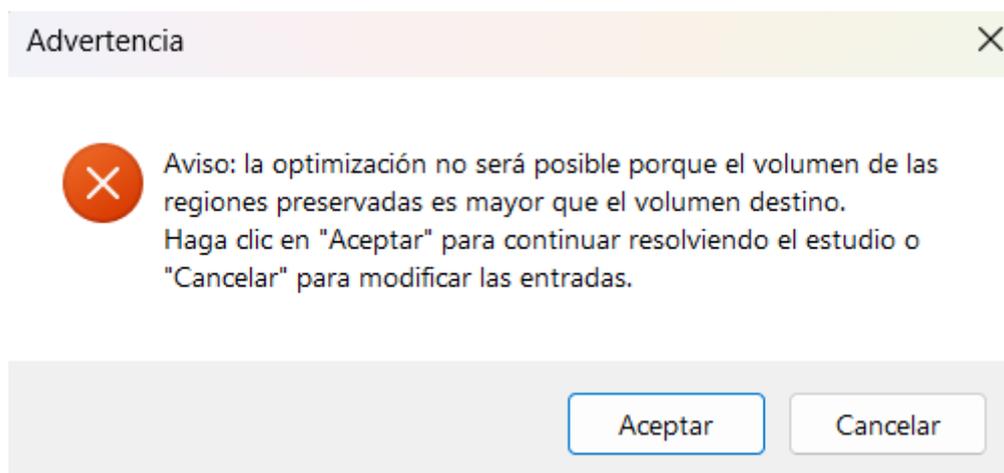
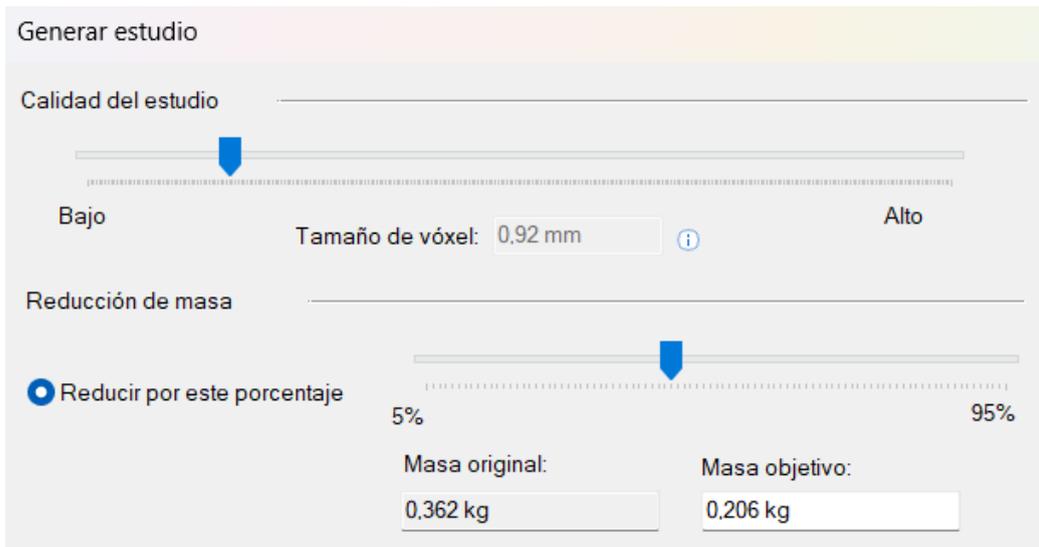


Ilustración 56: Error optimización 50% (fuente: elaboración propia)

Esto significa que no es posible generar un nuevo diseño con las restricciones y las regiones que queremos preservar al ser el volumen de estas mayor que el volumen final de la pieza, por lo que buscaremos una reducción de masa mayor al 40% pero inferior al 50%.

4.2.6 SEXTA ITERACIÓN

Tras varios intentos y apareciendo el error anterior, se llega a una reducción máxima de la masa de un 43%, con una calidad de estudio de 50.



Generar estudio

Calidad del estudio

Bajo Alto

Tamaño de vóxel: 0,92 mm

Reducción de masa

Reducir por este porcentaje

5% 95%

Masa original: 0,362 kg

Masa objetivo: 0,206 kg

Ilustración 57: Parámetros optimización 43% (fuente: elaboración propia)

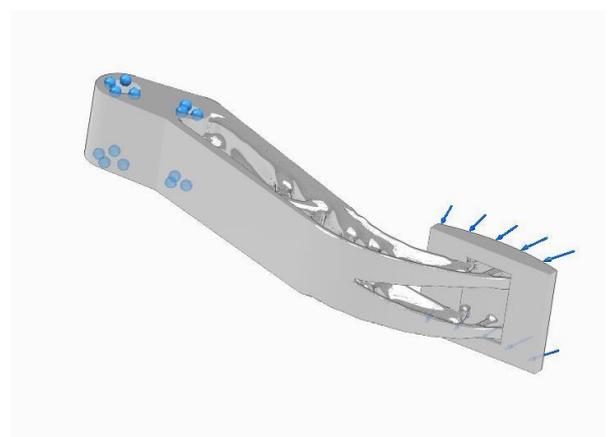
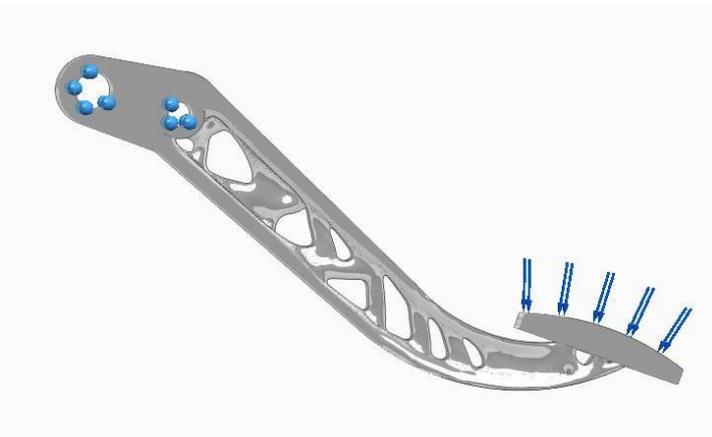


Ilustración 58: Resultados optimización 43% (fuente: elaboración propia)

A continuación, realizaremos la simulación FEM de la nueva geometría para verificar su resistencia.

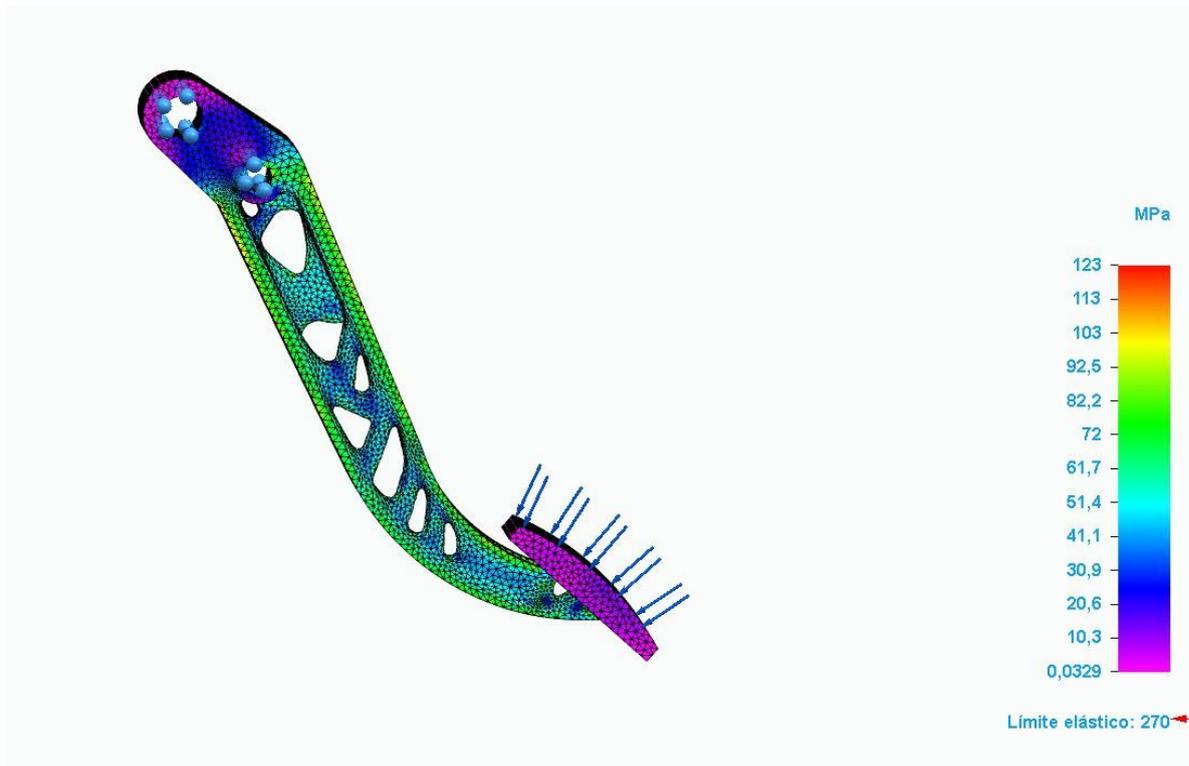


Ilustración 59: Simulación FEM optimización 43% (fuente: elaboración propia)

Obtenemos una tensión máxima de 123 MPa, inferior a la del límite elástico, por lo que no habrá deformación plástica bajo la carga impuesta.

Tras varias iteraciones se ha obtenido un diseño final optimizado con una reducción total de la masa de un 43%.

4.3 *REFINAR GEOMETRÍA*

Una vez tenemos la geometría totalmente optimizada procederemos a mejorarla refinándola, utilizando el software Altair Inspire, en el cual crearemos una PolyNURB, que es una geometría creada con superficies que permite adaptarse a formas irregulares, como el modelo optimizado del pedal.

Para ello usaremos el comando ‘Ajustar’, que refinará la geometría automáticamente en función del número de polígonos seleccionados, a mayor número más se parecerá la PolyNURB a la geometría principal por lo que no se eliminarían las irregularidades.



Ilustración 60: Parámetros para crear PolyNURB (fuente: elaboración propia)

A continuación, obtenemos la geometría final ya completamente refinada:

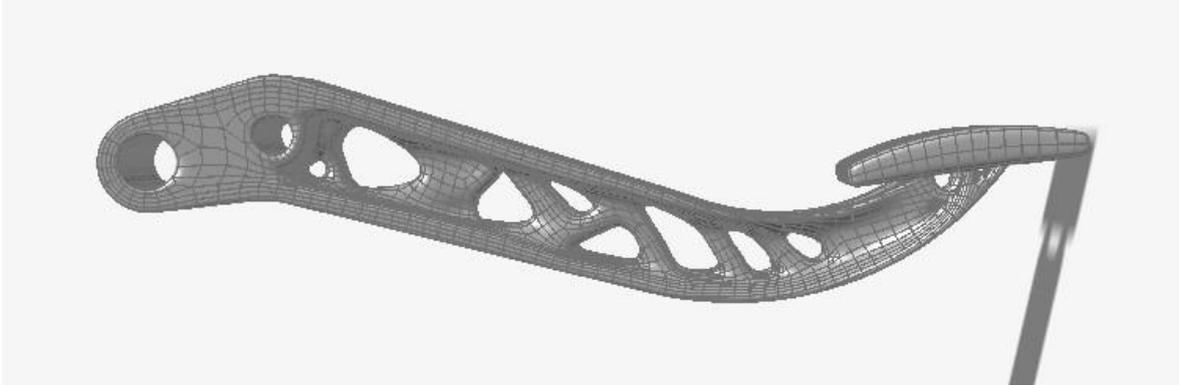


Ilustración 61: Vista lateral pedal refinado (fuente: elaboración propia)

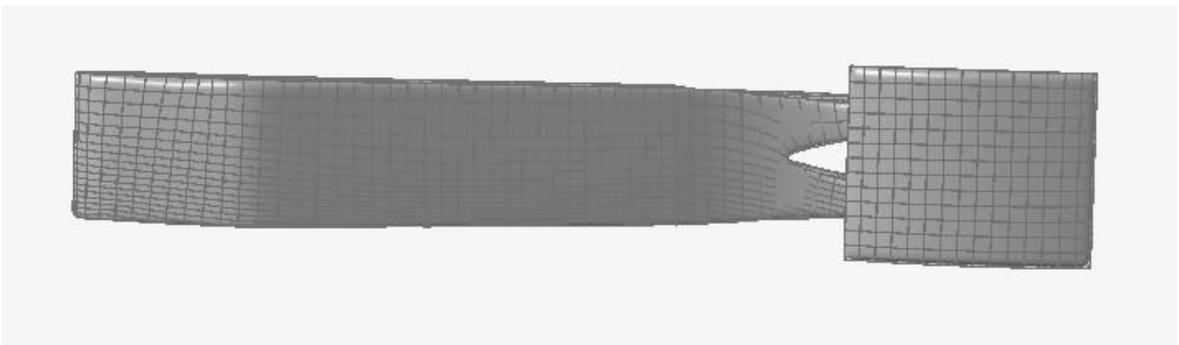


Ilustración 62: Vista superior pedal refinado (fuente: elaboración propia)

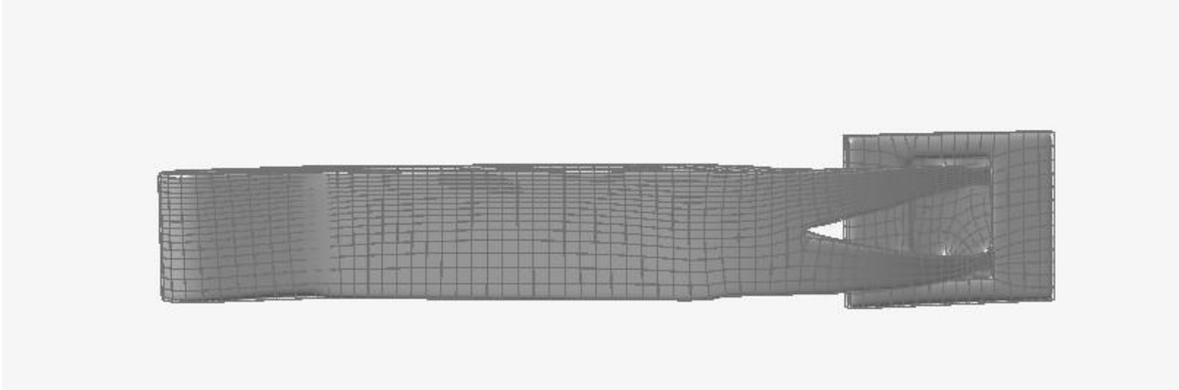


Ilustración 63: Vista inferior pedal refinado (fuente: elaboración propia)

Una vez tenemos ya la geometría final, dado que el software Altair Inspire ha hecho pequeños cambios a nuestra pieza para eliminar irregularidades, realizaremos una simulación FEM final para comprobar que no se supera el límite elástico. Para ello volveremos a Solid Edge

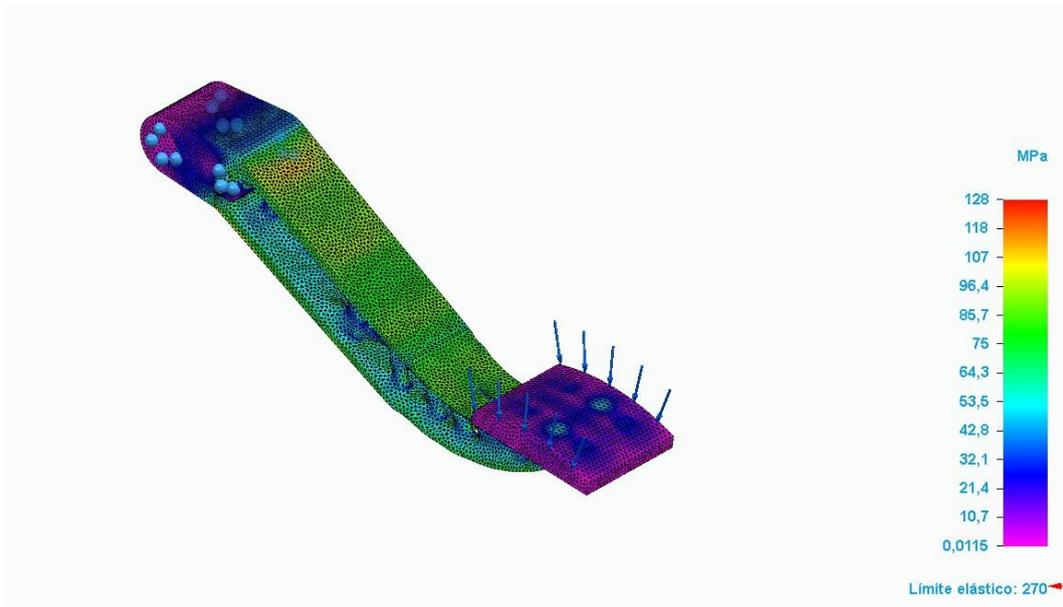


Ilustración 64: Simulación FEM diseño final (fuente: elaboración propia)

Tras esta última simulación, observamos que no se supera el límite elástico, por lo que el diseño final no tendría deformación plástica bajo carga, por lo que llevaremos a cabo la fabricación del prototipo con una reducción de la masa total del 43%.

4.4 PROPUESTA DE DISEÑO LIBRE

Una vez tenemos un buen diseño final, con sus respectivas restricciones, buscaremos reducir al máximo la masa del pedal, quitando restricciones, buscando así una nueva geometría menos segura, pero más libre.

Para ello aplicaremos la fuerza y los puntos fijos al igual que antes, además de preservar región solo entre ambos apoyos para que estos sigan conectados en todo momento, ya que si no se pueden crear geometrías sin sentido

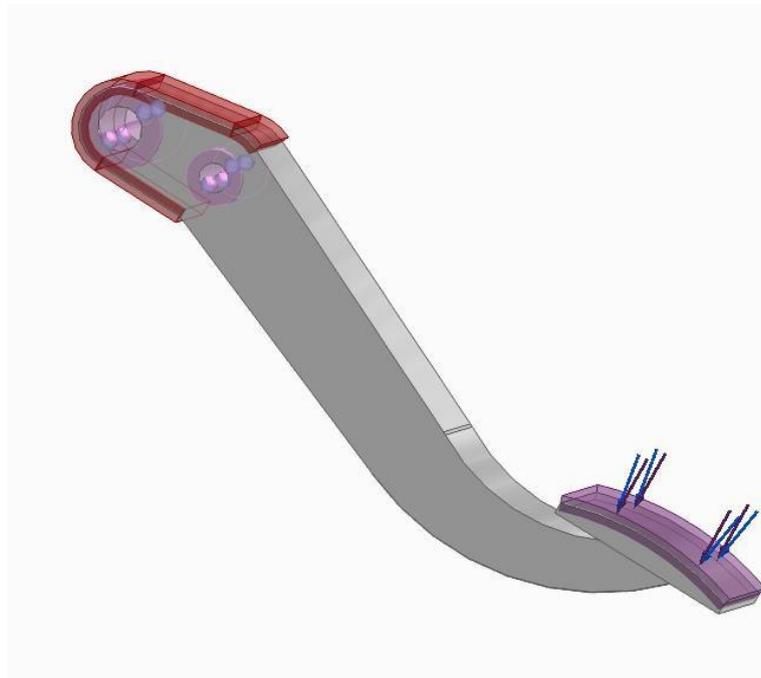


Ilustración 65: Restricciones y condiciones de contorno para diseño libre (fuente: elaboración propia)

Tras varios intentos, se llega a una reducción total del 65% de masa con una calidad de estudio de 50.

Generar estudio

Calidad del estudio

Bajo Alto

Tamaño de vóxel: 0,92 mm

Reducción de masa

Reducir por este porcentaje

5% 95%

Masa original: 0,362 kg

Masa objetivo: 0,127 kg

Ilustración 66: Parámetros optimización 65% (fuente: elaboración propia)

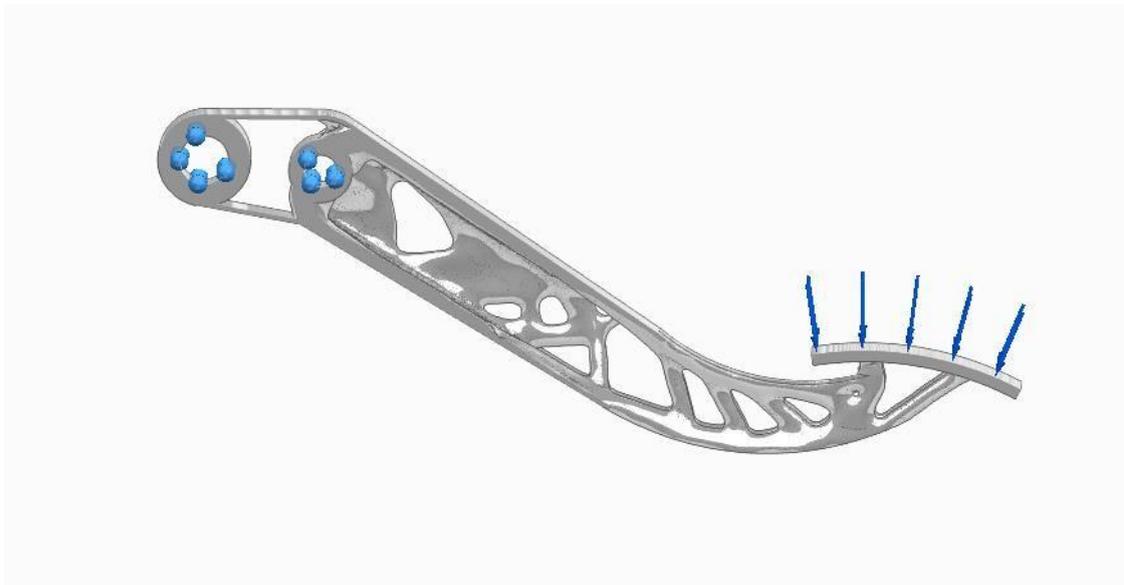


Ilustración 67: Vista lateral optimización 65% (fuente: elaboración propia)

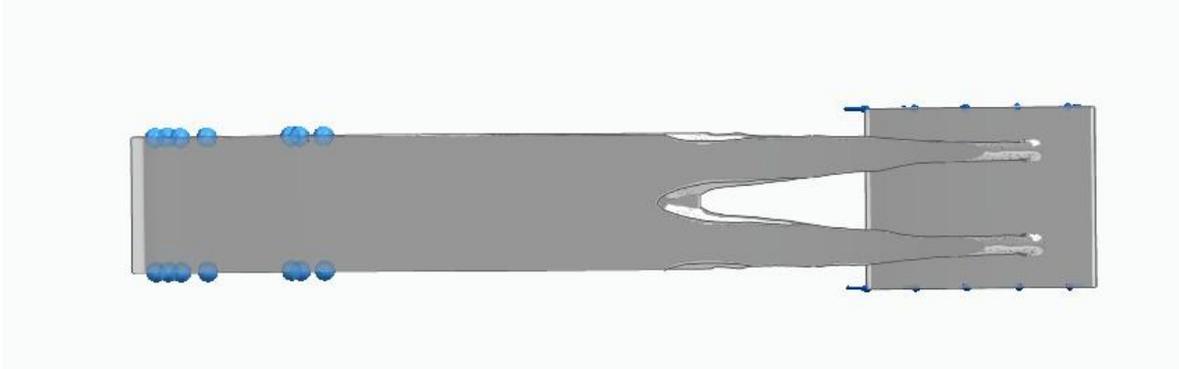


Ilustración 68: Vista inferior optimización 65% (fuente: elaboración propia)

Procedemos a realizar la simulación FEM para observar cómo se comporta bajo carga.

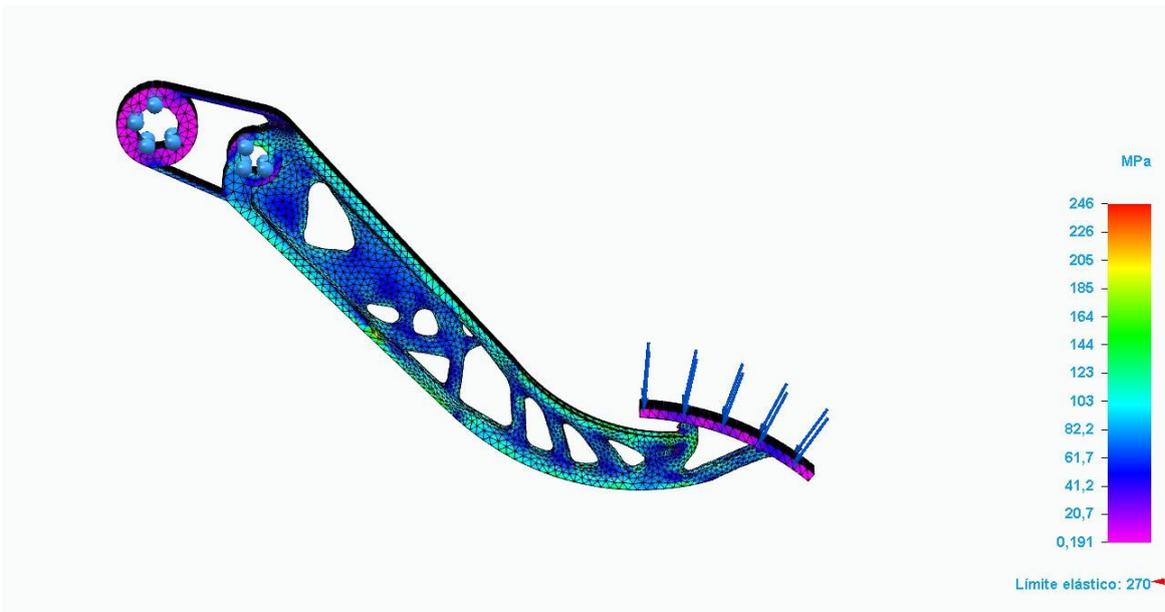


Ilustración 69: Simulación FEM optimización 65% (fuente: elaboración propia)

No se supera el límite elástico, con una tensión máxima de 246 MPa, por lo que en teoría no rompería, pero nos quedamos muy cerca de ese punto.

A pesar de haber un pedal mucho menos pesado con una optimización topológica mucho más libre, nos quedaremos con la geometría reducida al 43%. El primer diseño logra un buen equilibrio entre ligereza y seguridad estructural. La distribución del material se alinea con

las zonas de mayor carga, situada en el primer punto de apoyo, resultando en una geometría sólida, continua y fácil de fabricar. Además, ofrece un margen de seguridad más amplio frente a cargas imprevistas o cambios en las condiciones de uso. Este enfoque, más conservador, se ajusta perfectamente a los requisitos de fiabilidad y funcionalidad que exige un componente crítico como el pedal de freno.

Por su parte, el diseño con un 65% de reducción de masa prioriza aligerar el peso por encima de todo. Aunque los análisis no muestran fallos estructurales, la geometría resultante es más frágil, con secciones delgadas y zonas críticas que operan cerca del límite de resistencia.

Dicho esto, en contextos donde el peso es crucial, como en competiciones de alto rendimiento o vehículos especializados, un diseño tan extremo podría tener sentido como base para un desarrollo posterior, utilizando materiales más especializados y resistentes.

En resumen, se opta por el diseño con un 43% de reducción de masa por su robustez, viabilidad y seguridad, siendo la mejor opción para un entorno realista. El diseño más ligero, aunque interesante como ejercicio, no está listo para aplicarse directamente sin ajustes adicionales.

Capítulo 5. FABRICACIÓN DEL PROTOTIPO

A continuación, se llevará a cabo la fabricación de ambos prototipos, el pedal sin optimizar y el optimizado. Estos prototipos, servirán para comprobar ambas geometrías y verificar si son correctas, es decir, no serán funcionales.

5.1 *PEDAL SIN OPTIMIZAR*

Para la fabricación del pedal sin optimizar se ha utilizado la tecnología FDM, la cual usa un cabezal de extrusión controlado por ordenador para depositar capas de material fundido. En concreto, para la fabricación de este prototipo se ha usado PLA, ácido poliláctico, un tipo de plástico biodegradable derivado de recursos renovables como el almidón de maíz.

Para la fabricación del pedal sin optimizar se ha utilizado la impresora 3D Prusa-I3KS.

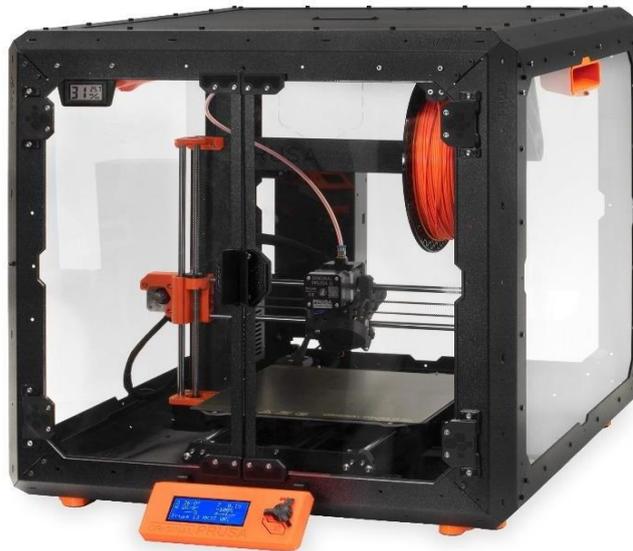


Ilustración 70: Impresora Prusa-I3KS (fuente: Prusa)

Con ayuda del software Cura, será posible visualizar el proceso de fabricación de la pieza mediante la tecnología FDM. Este programa nos proporcionará el tiempo estimado de impresión y el material total utilizado, datos que utilizaremos posteriormente para el cálculo de costes.

El software cura será especialmente útil ya que colocará de forma automática los soportes necesarios para la fabricación, esta tecnología necesita de estructuras adicionales para sostener partes voladizas, calculando también el material gastado con estos, y dándonos el total de material necesario para la fabricación.

El primer paso para empezar con esta simulación es la orientación de impresión, que se ha colocado de la siguiente manera:

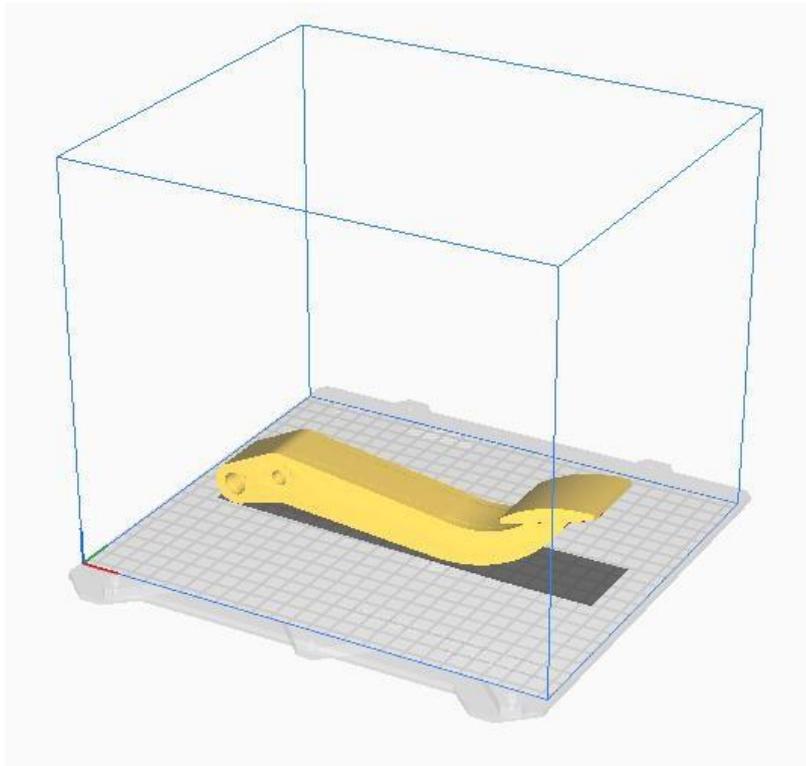
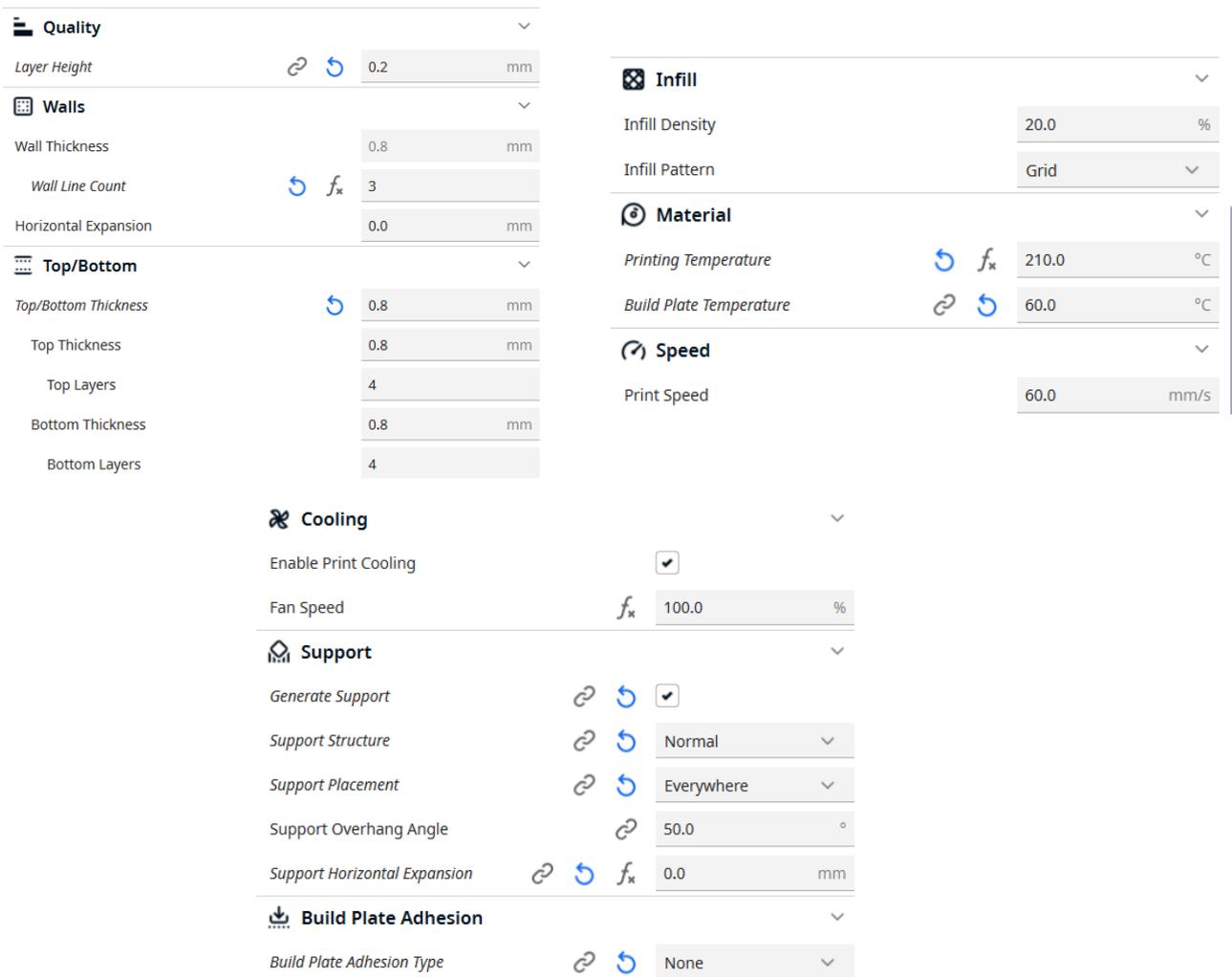


Ilustración 71: Orientación del pedal sin optimizar en Cura (fuente: elaboración propia)

Después ajustaremos los parámetros de la impresión, importante poner correctamente las temperaturas de impresión, entre 200°C y 220°C, y de la placa de impresión, entre 50°C y 70°C.



Category	Parameter	Value	Unit
Quality	Layer Height	0.2	mm
	Wall Thickness	0.8	mm
	Wall Line Count	3	
Top/Bottom	Top/Bottom Thickness	0.8	mm
	Top Thickness	0.8	mm
	Top Layers	4	
Infill	Infill Density	20.0	%
	Infill Pattern	Grid	
	Material		
Material	Printing Temperature	210.0	°C
	Build Plate Temperature	60.0	°C
Speed	Print Speed	60.0	mm/s
	Cooling		
Cooling	Enable Print Cooling	<input checked="" type="checkbox"/>	
	Fan Speed	100.0	%
Support	Generate Support	<input checked="" type="checkbox"/>	
	Support Structure	Normal	
	Support Placement	Everywhere	
	Support Overhang Angle	50.0	°
	Support Horizontal Expansion	0.0	mm
Build Plate Adhesion	Build Plate Adhesion Type	None	

Ilustración 72: Parámetros de impresión en Cura (fuente: elaboración propia)

Finalmente se obtiene el modelo, en el cual observamos los soportes en azul. La impresión tendrá una duración de unas 6 horas y se necesitarán 77 gramos de material:

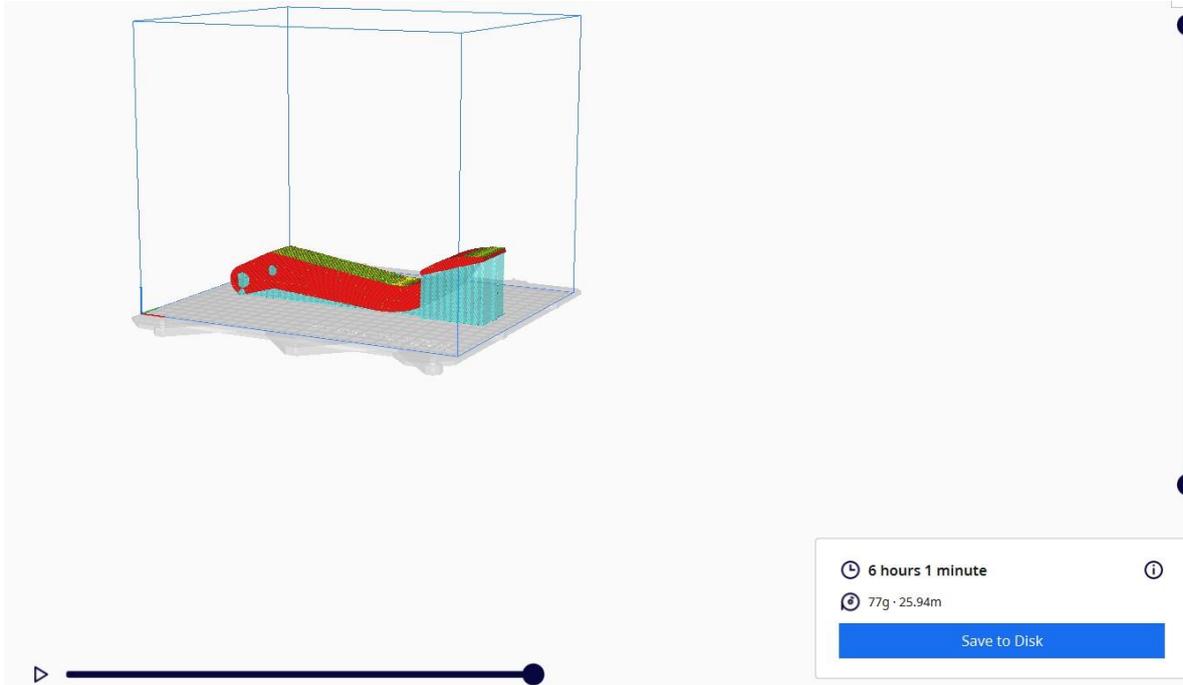


Ilustración 73: Modelo final en Cura (fuente: elaboración propia)

5.2 PEDAL OPTIMIZADO

Para la fabricación del pedal optimizado utilizaremos la tecnología MJF, multi jet fusión, un proceso de fabricación aditiva desarrollado por HP que utiliza la fusión en lecho de polvo. El material utilizado será poliamida 12, un polvo sólido de nylon, y se fabricará con la impresora HP 580C.



Ilustración 74: Impresora HP 580C (fuente: HP)

Dado que el prototipo solo será visual, debemos buscar la manera más barata de fabricarlo para comprobar su geometría, y el proceso de fabricación con la HP 580C es mucho más caro que el proceso anterior, en el que se utiliza FDM. La razón por la que se fabrica el pedal optimizado mediante MJF, es que esta tecnología permite producir piezas con detalles finos y geometrías complejas sin necesidad de estructuras de soporte, ya que el lecho de polvo actúa como soporte durante la impresión. Esto no solo facilita el postprocesado, sino que también lo hace más seguro y eficiente en comparación con FDM, donde la eliminación de soportes puede ser laboriosa y comprometer la integridad de la pieza.

En la siguiente imagen, observaremos como quedaría el pedal optimizado fabricado mediante FDM:

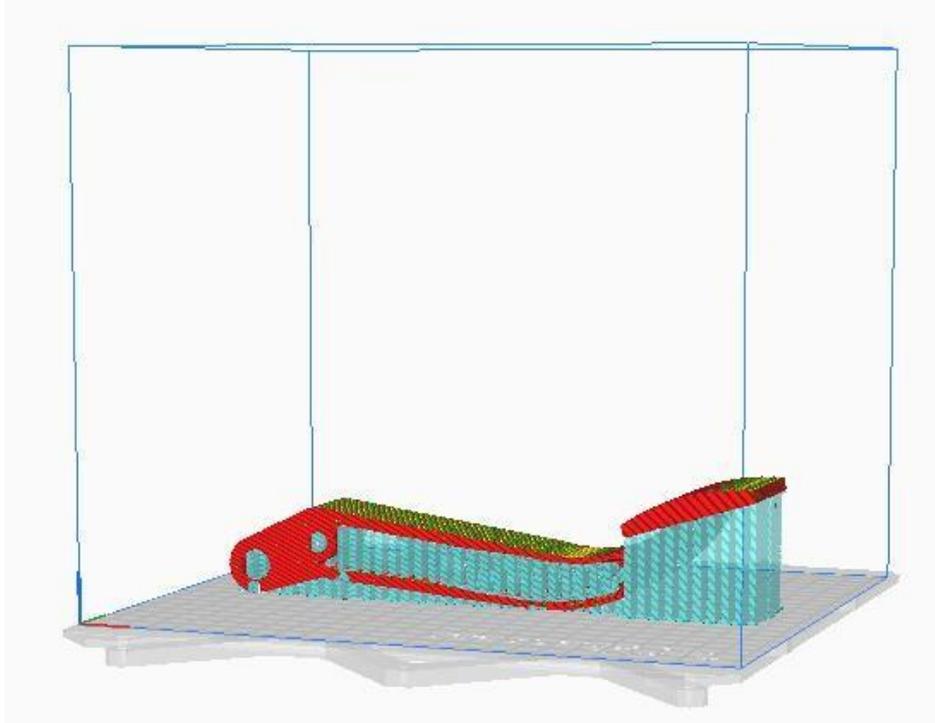


Ilustración 75: Pedal optimizado Cura (fuente: elaboración propia)

Observamos que, por la eliminación de material en la optimización, se necesitarían generar muchos más soportes que en el anterior caso, aumentando la cantidad de material necesaria y complicando la eliminación de estos, pudiendo comprometer el postprocesado.

Finalmente, y ya habiendo argumentado la razón de utilizar MJF, para el posterior cálculo de costes de este prototipo, solo necesitaremos el volumen final del pedal, el cual obtenemos de Solid Edge, con un valor de 78 cm^3 . Cabe destacar la reducción de volumen gracias a la optimización, teniendo el pedal sin optimizar un volumen de 135 cm^3 .

5.3 RESULTADO FINAL DE LA FABRICACIÓN

A continuación, se presentan imágenes de ambos prototipos del pedal, en gris el optimizado, fabricado mediante MJF, y en azul el pedal sin optimizar, fabricado mediante FDM, donde podemos observar que se han fabricado correctamente y no presentan errores mayores.

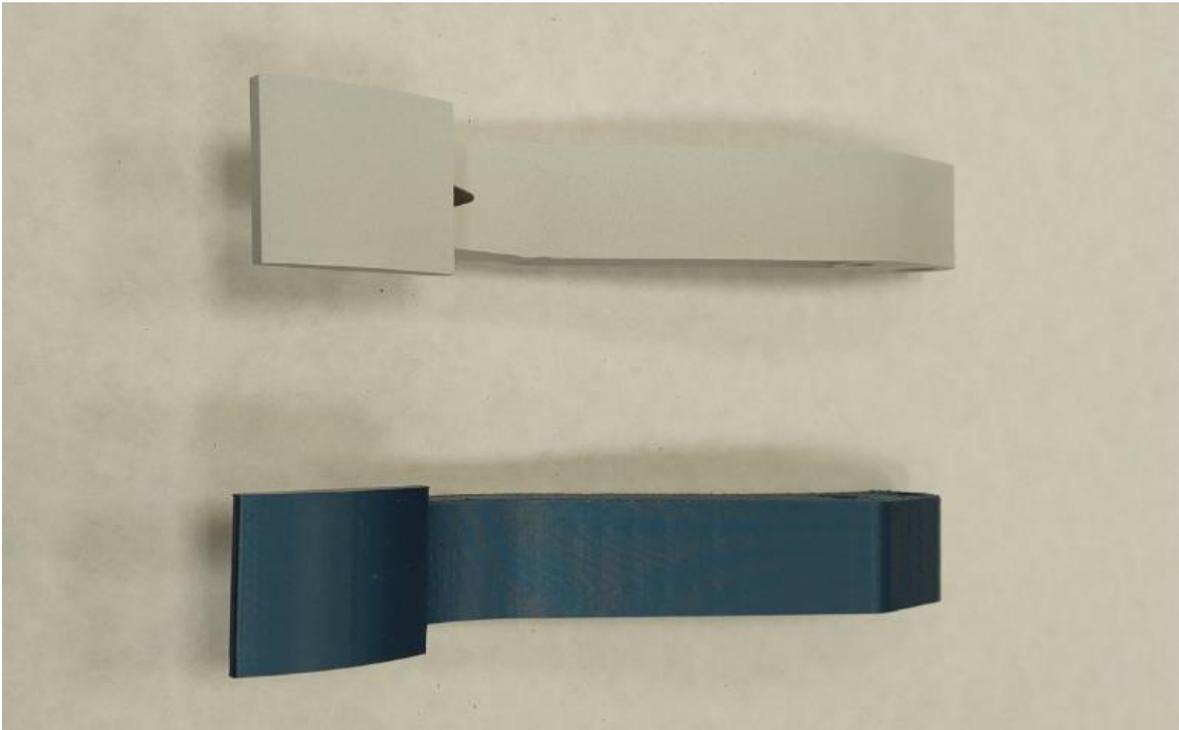


Ilustración 76: Vista superior de ambos prototipos (fuente: elaboración propia)



Ilustración 77: Vista lateral de ambos prototipos (fuente: elaboración propia)

Capítulo 6. ANÁLISIS DE COSTES

La fabricación aditiva y la fabricación convencional, que abarca técnicas como el mecanizado o moldeado, muestran claras diferencias en términos de costes, dependiendo de factores como el tipo de producto, el volumen de producción y la complejidad del diseño.

Para producciones a gran escala, la fabricación aditiva es más cara que la convencional. Esto se debe a que los tiempos de producción son mucho más lentos, los materiales especializados para la impresión 3D son más caros y las máquinas tienen costes elevados. En cambio, la fabricación aditiva destaca en la producción de prototipos, piezas personalizadas o series pequeñas de producción, donde los costes fijos de utillaje y moldes en la fabricación convencional serían demasiado altos.

Podemos observar esto gráficamente en la siguiente ilustración, donde se comparan ambas curvas de coste.

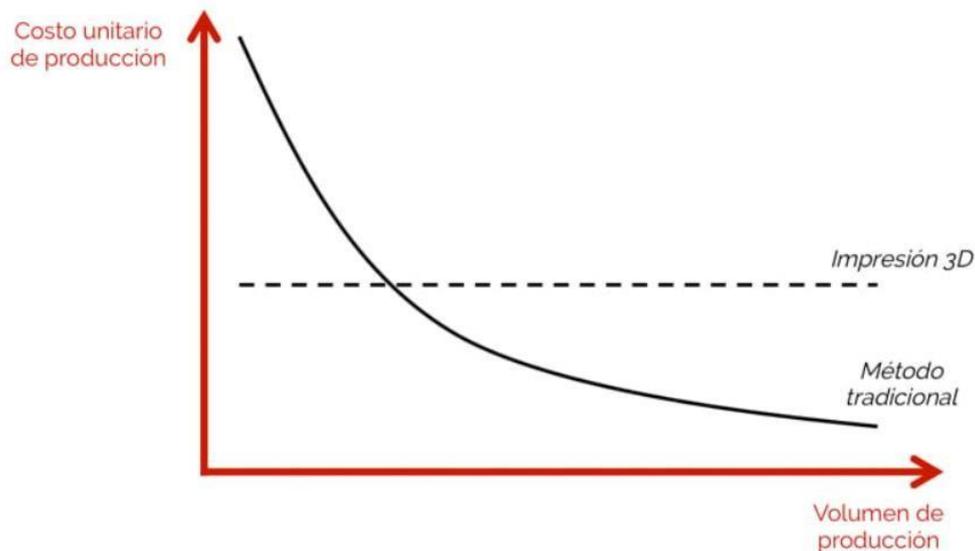


Ilustración 78: Curvas de coste impresión 3D y fabricación tradicional (fuente: 3Dnatives)

6.1 COSTES PROTOTIPO SIN OPTIMIZAR

A continuación, se calculará el coste del pedal sin optimizar, fabricado en el laboratorio de comillas ICAI con la impresora 3D Prusa-I3KS, usándose PLA como material.

ANALISIS DE COSTES PARA PROTOTIPADO DE PIEZAS EN IMPRESORA 3D -FDM		
DATOS AMORTIZACIÓN MÁQUINA		
Precio máquina (€)		1.325
Coste mantenimiento anual (€)		133
Años de amortización		2
Amortización (h/año) - 223 días-año / 8 horas-día		1784
Precio Hora máquina-amortización (€/h)		0,48
Precio Hora venta-público (€/h)		0,72
DATOS COSTE MATERIAL		
Coste material modelo: filamento PLA (€/cc) (18,20€-750 cc)		0,02
Coste material soporte: filamento PLA (€/cc) (20€-750 cc)		0,00
Coste material bandeja (€/Ud.): (20€-100 uds.)		0,20
DATOS COSTE TÉCNICO ANALISTA		
Coste técnico analista del modelo - inc. desmoldeo (€/h)		30
CONCEPTOS PRESUPUESTADOS		
Material modelo (cc)	Opción Solido	Costes parciales
77,00		1,87 €/ud
Soporte modelo (cc)	0,00	0,00 €/ud
Tiempo modelo (h)	6,00	4,34 €/ud
Piezas por bandeja (ud)	1,00	0,20 €/ud
Tiempo técnico-analista (h)	0,50	15,00 €
Cantidad de piezas	1,00	
Coste unitario (€) en ICAI + IVA	21,41 €/Ud	
Coste total (€) en ICAI + IVA	21,41 €	

Tabla 1: Costes pedal sin optimizar

6.2 COSTES PROTOTIPO OPTIMIZADO

A continuación, se calculará el coste del pedal optimizado, fabricado en el laboratorio de comillas ICAI con la impresora 3D HP 580C, usándose poliamida 12 como material.

ANALISIS DE COSTES PARA PROTOTIPADO DE PIEZAS EN IMPRESORA 3D -HP 580	
DATOS AMORTIZACIÓN MÁQUINA	
Precio máquina (€)	80.000
Coste mantenimiento anual (€)	2.000
Años de amortización	6
Días impresión/año	249
Impresiones/día	0,5
Precio impresión (€)	125,67
Precio Impresión venta-público (€)	125,67
DATOS COSTE MATERIAL	
Coste material: (€/kg)	141,00
Coste material: (€/cc)	0,15
Volumen Total (cc)	1500,00
Densidad de Empaquetado	10,00%
DATOS COSTE TÉCNICO ANALISTA	
Coste técnico analista del modelo - inc. limpieza (€/h)	30

CONCEPTOS PRESUPUESTADOS	Opción Solido	Costes parciales
Material modelo (cc)	78,00	11,58 €/ud
Impresión	-	65,35 €/ud
Tiempo técnico-analista (h)	0,50	15,00 €/ud
Tiempo Limpieza (h)	0,50	15,00 €/ud
Cantidad de piezas	1,00	
Coste unitario (€) en ICAI + IVA	106,93 €/Ud	
Coste total (€) en ICAI + IVA	106,93 €	

Tabla 2: Costes pedal optimizado

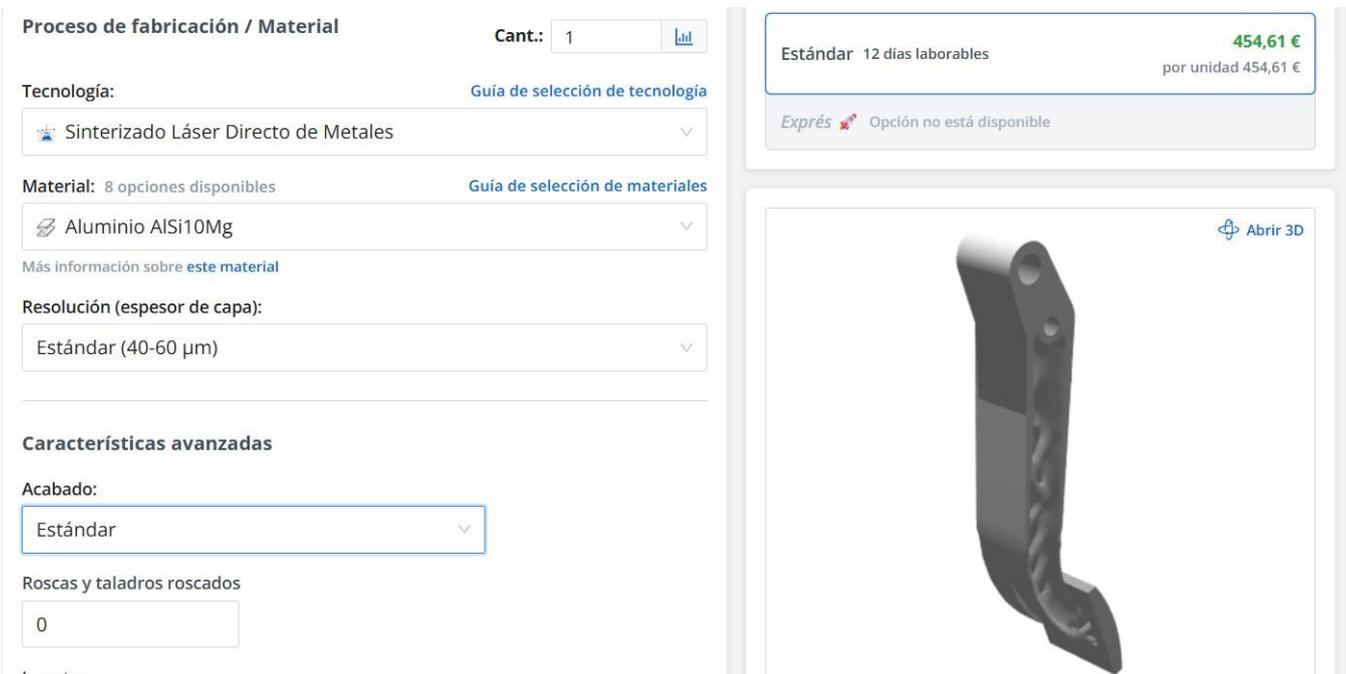
6.3 COSTES DE IMPRESIÓN EN METAL

Para la fabricación del pedal optimizado completamente funcional, necesitaríamos tecnologías de impresión 3D con las que pudiéramos fabricar piezas metálicas, ya que el material seleccionado fue una aleación de aluminio, AlSi10Mg.

Para estimar los costes de fabricación del componente final, se ha solicitado un presupuesto a través de la página web Xometry, especializada en servicios de impresión 3D.

El pedal optimizado se fabricaría mediante sinterizado directo de metal por láser (DMLS), una tecnología de fabricación aditiva que utiliza un láser para fundir polvo metálico, utilizando como material la aleación de aluminio mencionada anteriormente.

Se ha solicitado el presupuesto para una resolución estándar:



Proceso de fabricación / Material Cant.: 1

Tecnología: Sinterizado Láser Directo de Metales [Guía de selección de tecnología](#)

Material: 8 opciones disponibles [Guía de selección de materiales](#)
Aluminio AlSi10Mg

Más información sobre [este material](#)

Resolución (espesor de capa): Estándar (40-60 µm)

Características avanzadas

Acabado: Estándar

Roscas y taladros roscados: 0

Estándar 12 días laborables **454,61 €**

por unidad 454,61 €

Expres Opción no está disponible

[Abrir 3D](#)

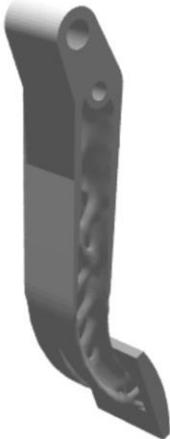


Ilustración 79: Presupuesto de impresión metálica (fuente:Xometry)

Capítulo 7. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y

CONCLUSIONES

El rediseño del pedal de freno, utilizando técnicas de optimización topológica y diseño generativo, ha permitido desarrollar un componente mucho más eficiente tanto en términos estructurales como en reducción de peso.

Mediante múltiples iteraciones y análisis FEM, se ha logrado reducir la masa total del pedal en un 43% en comparación con el diseño inicial, reduciendo el volumen total del componente de 135 cm³ a 77 cm³, sin comprometer su resistencia. Las simulaciones indican que la tensión máxima bajo una carga de 2000 N en el diseño final alcanza los 123 MPa, un valor inferior al límite elástico del material elegido, AlSi10Mg, que ronda los 270 MPa. Esto asegura que el pedal puede soportar las cargas esperadas sin riesgo de deformación plástica, garantizando un rendimiento óptimo en condiciones reales de uso.

En cuanto a los costes de los prototipos, observamos que el pedal optimizado es significativamente más caro que el diseño original debido a la tecnología empleada y a la diferencia entre ambas impresoras, por lo que no tendría sentido realizar una comparación entre ambos costes debido a la diferencia de fabricación.

Una vez verificadas las geometrías con los prototipos, se podría proceder con la fabricación del componente de uso final mediante sinterizado directo de metal por láser, teniendo un coste de unos 450 €. A pesar de estar el pedal optimizado y haber reducido su masa, sería imposible su implementación masiva, ya que como se ha mencionado anteriormente, las técnicas de fabricación convencional siguen siendo mucho más competitivas para producciones a gran escala. Sin embargo, este pedal sería útil para vehículos de alto rendimiento, donde se busca la eficiencia sin importar los costes finales. La reducción total de peso en este tipo de vehículos sería clave y obviamente optimizar solamente el pedal de

freno no tendría sentido, sería necesario aplicar estas técnicas de diseño en varios componentes, para lograr así una reducción significativa de peso.

En conclusión, este trabajo demuestra el potencial de la optimización topológica y el diseño generativo para lograr componentes más ligeros y eficientes, a la vez que los retos que deben superarse para poder implementar este tipo de técnicas a gran escala. A pesar de que el modelo no sería viable como solución estándar para cualquier vehículo convencional, representa una vía prometedora para aplicaciones especializadas, como vehículos de alto rendimiento, en el sector de la automoción.

Capítulo 8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] *Cómo GM y Autodesk están utilizando diseño generativo para vehículos del futuro – Autodesk LATAM.* (2018, 23 mayo). https://blogs.autodesk.com/latam/2018/05/23/como-gm-y-autodesk-estan-utilizando-diseno-generativo-para-vehiculos-del-futuro/?utm_source=chatgpt.com
- [2] Organización de las Naciones Unidas. (2015, 25 de septiembre). *La Asamblea General adopta la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible.* Naciones Unidas. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/2015/09/la-asamblea-general-adopta-la-agenda-2030-para-el-desarrollo-sostenible/>
- [3] Formlabs. *Nociones básicas de optimización topológica: Cómo usar modelos algorítmicos para crear un diseño ligero.* <https://formlabs.com/es/blog/optimizacion-topologica>
- [4] *Introducción al diseño generativo.* Formlabs. https://formlabs.com/es/blog/disenogenerativo/?srsId=AfmBOopBSa3gyKqsIQIUSSIdzr_xwhe5JTj9t-hheJ2TaO8PfCoRaMz
- [5] M, A., & M, A. (2024, 18 septiembre). *Optimización topológica VS Diseño generativo: ¿qué herramienta de modelado elegir?* 3Dnatives. <https://www.3dnatives.com/es/optimizacion-topologica-vs-diseno-generativo-190920242/#!>
- [6] Menéndez, L. G., Somonte, M. D., & Escudero, M. D. M. E. (2020). Diseño generativo: el estado del arte. *Técnica Industrial*, 327(327), 44-49.
- [7] Autodesk. (2024, 15 diciembre). *Un ejemplo de innovación con diseño generativo y fabricación aditiva en la industria deportiva.* Autodesk Journal. <https://www.autodeskjournal.com/innovacion-con-diseno-generativo>
- [8] Daniele, M. (2024, 27 mayo). *¿Qué es la fabricación sustractiva y cómo se diferencia de la aditiva?* *Metalúrgica Daniele.* <https://www.metalurgicadaniele.com.ar/blog/que-es-la-fabricacion-sustractiva-y-como-se-diferencia-de-la-aditiva>
- [9] Planes, F. (2023, 28 octubre). *Conformado de metales: ¿qué es y cuáles son sus técnicas más habituales?* Ferros Planes. <https://ferrosplanes.com/conformado-metales-que-es-tecnicas-habituales/>

- [10] Redacción de la Universidad Internacional de la Rioja, E. (2024, 8 octubre). La fabricación aditiva: ¿cómo se aplica y qué beneficios tiene? *UNIR*. <https://www.unir.net/revista/ingenieria/fabricacion-aditiva/>
- [11] Autodesk. *History of 3D printing: It's older than you think*. <https://www.autodesk.com/design-make/articles/history-of-3d-printing>
- [12] Chapman, A. (2023, 19 mayo). *The complete history of 3D printing*. UltiMaker. <https://ultimaker.com/es/learn/the-complete-history-of-3d-printing/>
- [13] Dynapro. (2021, 20 diciembre). *Riñones 3D: el futuro de la medicina revolucionado por las impresoras 3D - Dynapro 3D | Empresa dedicada al diseño digital e impresión 3D*. Dynapro 3D | Empresa Dedicada Al Diseño Digital E Impresión 3D. <https://dynapro3d.com/rinones-3d-futuro-la-medicina-revolucionado-las-impresoras-3d/>
- [14] Jani, M. (2020, 10 octubre). *Never Forget Your Roots: A Brief History of RepRap*. E3D. <https://e3d-online.com/blogs/news/history-of-reprap?srsltid=AfmBOoq3Xv6M-7NX90wgEw3zS6wyEIKDMg8cjnOqXAepHiaWRtYM6qN1>
- [15] *Tipos de fabricación aditiva que debes conocer*. MINT. <https://mintforpeople.com/noticias/tipos-fabricacion-aditiva/>
- [16] Idelt. (2023, 5 diciembre). *¿Qué es la estereolitografía (SLA)?* Idelt. <https://idelt.com/es/que-es-la-estereolitografia-sla/>
- [17] Abcw. (2021, 19 octubre). *Aplicaciones de la Estereolitografía 3D en la Odontología*. Ortho Imagen Digital. <https://blog.orthoimagendigital.com/aplicaciones-de-la-estereolitografia-3d-en-la-odontologia/>
- [18] *Selective Laser Sintering (SLS) | Siemens Software*. Siemens Digital Industries Software. <https://www.sw.siemens.com/en-US/technology/selective-laser-sintering/>
- [19] *Guía de impresión 3D mediante sinterizado selectivo por láser (SLS)*. Formlabs. <https://formlabs.com/es/blog/que-es-sinterizado-selectivo-laser/>
- [20] *Ineo - Fabricación aditiva - Modelado por deposición fundida (FDM)*. (2024, 8 abril). Ineo. <https://www.ineo.es/es/tecnologias/modelado-deposicion-fundida-fdm>
- [21] M, A. (2024, 18 septiembre). *Fusión selectiva por láser o SLM (Selective Laser Melting)*. Bericht Fabricación de Piezas Metálicas / Industria Metalúrgica. <https://www.bericht.es/fusion-selectiva-por-laser-sml/>

- [22] Strietzel, R. (2010, 1 mayo). *Fusión selectiva por láser para el procesamiento de polvo de aleación dental*. Quintessence Técnica. <https://www.elsevier.es/es-revista-quintessence-tecnica-33-articulo-fusion-selectiva-por-laser-el-X1130533910508257>
- [23] *FUNDIDO LÁSER SELECTIVO SLM | Blog Ingenius*. Blog Ingenius. (2019, 22 abril). <https://eddm.es/blog-ingenius/fundido-laser-selectivo-slm/>
- [24] *DMLS frente a EBM: diferencias y comparación*. (2023, marzo 9). Dassault Systèmes. <https://www.3ds.com/es/make/solutions/blog/dmls-vs-ebm-differences-and-comparison>
- [25] *Impresión 3D en el sector del automóvil - Dassault Systèmes*. (2023, 10 febrero). Dassault Systèmes. <https://www.3ds.com/es/make/solutions/industries/automotive-3d-printing>
- [26] C, L., & C, L. (2025, 3 enero). *Guía completa: Binder Jetting o inyección de aglutinante, ¿te explicamos todo!* 3Dnatives. <https://www.3dnatives.com/es/inyeccion-aglutinante-te-lo-contamos-23032016/>
- [27] *Cómo GM y Autodesk están utilizando diseño generativo para vehículos del futuro – Autodesk LATAM*. (2018, mayo 23). <https://blogs.autodesk.com/latam/2018/05/23/como-gm-y-autodesk-estan-utilizando-diseno-generativo-para-vehiculos-del-futuro/>
- [28] M, A., & M, A. (2022, 2 junio). *El papel de la fabricación aditiva en la automoción*. 3Dnatives. <https://www.3dnatives.com/es/fabricacion-aditiva-automocion-090220212/#>
- [29] Alcantar, C. E. N., Gallardo, L. A. P., Bocanegra, M. A. M., & Sánchez, M. B. (2023). *Diseño generativo aplicado en el diseño de un pedal de frenado para automóvil*. *Revista de Ciencias Tecnológicas*. <https://doi.org/10.37636/recit.v6n4e299>
- [30] *Polvo de AlSi10Mg para impresión 3D EBM SLM en 2024 - MET3DP*. (2024, 16 octubre). Metal3DP. <https://met3dp.com/es/producto/alsi10mg-powder/>
- [31] C, L., & C, L. (2025, marzo 3). *¿Por qué utilizar la impresión 3D?* 3Dnatives. <https://www.3dnatives.com/es/por-que-la-impresion-3d-230720182/>