



GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

ANÁLISIS, DISEÑO GENERATIVO Y FABRICACIÓN DE UNA PALANCA DE CAMBIO SECUENCIAL MEDIANTE IMPRESIÓN 3D PARA APLICACIÓN INDUSTRIAL

Autor: Adrián Guerrero Yeregui

Director: Mariano Jiménez Calzado

Madrid

Julio 2025

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
**Análisis, diseño generativo y fabricación de una palanca de cambio secuencial
mediante impresión 3D para aplicación industrial**

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico 2024-2025 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.: Adrián Guerrero Yeregui

Fecha: 15/ 07/ 2025



Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.: Mariano Jiménez Calzado

Fecha: 15/ 07/ 2025





GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

ANÁLISIS, DISEÑO GENERATIVO Y FABRICACIÓN DE UNA PALANCA DE CAMBIO SECUENCIAL MEDIANTE IMPRESIÓN 3D PARA APLICACIÓN INDUSTRIAL

Autor: Adrián Guerrero Yeregui

Director: Mariano Jiménez Calzado

Madrid

Julio 2025

ANÁLISIS, DISEÑO GENERATIVO Y FABRICACIÓN DE UNA PALANCA DE CAMBIO SECUENCIAL MEDIANTE IMPRESIÓN 3D PARA APLICACIÓN INDUSTRIAL

Autor: Guerrero Yeregui, Adrián.

Director: Jiménez Calzado, Mariano.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO

Se ha analizado y rediseñado una palanca de cambio secuencial, perteneciente a un conjunto mecánico. Para el rediseño de la palanca se han utilizado herramientas de optimización topológica y diseño generativo, con el objetivo de fabricar un componente final mediante impresión 3D. El modelo optimizado muestra una reducción de peso, manteniendo su resistencia y reduciendo los costes de fabricación.

Palabras clave: Diseño Generativo, Optimización topológica, Impresión 3D, Palanca de Cambio Secuencial.

1. Introducción

El proyecto tiene como objetivo el de realizar un análisis, diseño generativo y fabricación mediante técnicas de impresión 3D de una palanca de cambio secuencial, destinada a su posterior instalación en vehículos de competición. La implementación de simulaciones con el método de elementos finitos (FEM) y posteriores análisis con diseño generativo, permiten replantear su diseño para reducir peso, mejorar resistencia mecánica y optimizar los criterios de fabricación.

2. Ciclo de diseño

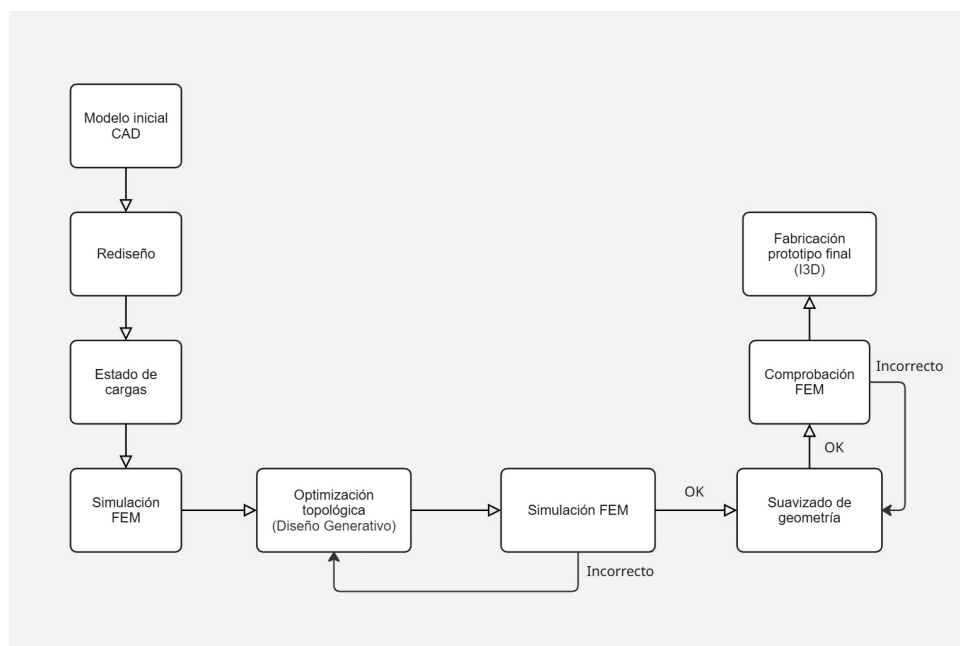


Figura 1: Diagrama de flujo del proyecto. Fuente propia

3. Definición del proyecto

Para llevarlo a cabo, se ha partido de un conjunto de una palanca de cambio secuencial ajustable de tres posiciones, diseñado principalmente para adaptarse a aplicaciones de transeje. El conjunto en formato CAD se ha extraído de la página web Grabcad.

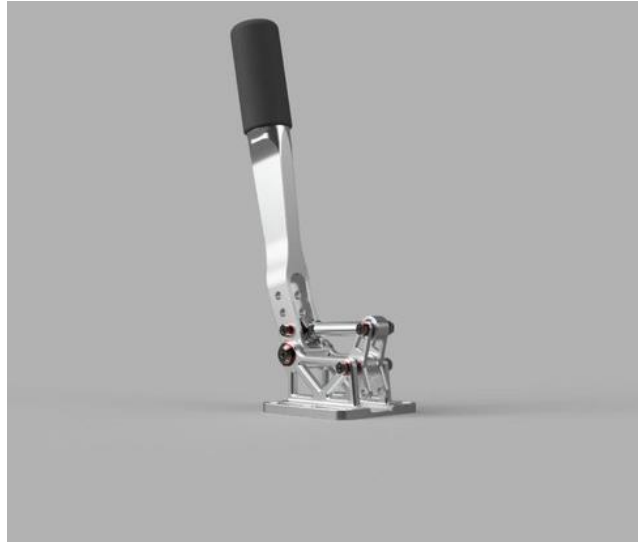


Figura 2: Conjunto con la pieza de la palanca a optimizar

Fuente: Adjustable Sequential Shifter, 2019 [1]

Primero, se analizó la pieza de la palanca para identificar las cargas a las que iba a ser sometido el conjunto. Realizando los cálculos convenientes para ello, se partió de una fuerza máxima del actuador en la zona superior de agarre de la palanca de 150N, maximizando este valor para aumentar la rentabilidad de la pieza optimizada. Asumiendo que, durante la acción, la palanca gira un ángulo de 30° en un tiempo de actuación de 0,1 segundos, se obtuvieron todas las fuerzas sobre la palanca necesarias para realizar las simulaciones FEM correspondientes.

Para comenzar con el proceso iterativo de simulación FEM con Solid Edge, se tuvo que diseñar la pieza desde cero, respetando las dimensiones críticas y su geometría. Se utilizó como referencia la pieza de la palanca en formato STEP, ya que el archivo original presentaba problemas de conversión.

Para la primera iteración, se simuló la fuerza del actuador en el agarre, junto con la fuerza transmitida a través de la biela de conexión entre la palanca y el balancín, ésta última localizada en los orificios de la segunda posición. Se simuló la articulación de la palanca con la base como restricción fija, además de añadir la fuerza de la gravedad. Los resultados obtenidos fueron exitosos, con un factor de seguridad $\geq 1,5$. El material escogido para la simulación es la aleación de Aluminio 7075-T6, elegido por su alta resistencia, buena tenacidad y comportamiento a fatiga [2].

Con los resultados de la primera FEM, se empleó la herramienta de diseño generativo de Solid Edge con criterios de Optimización Topológica (OT), sugiriendo geometrías que preservaran las regiones críticas, reduciendo la masa todo lo posible. Tras varias iteraciones, se obtuvo un modelo optimizado adecuado, con una reducción de masa aproximada del 50% respecto a la pieza base.

Tras el suavizado de la geometría de la pieza optimizada, mediante Altair Inspire PolyNURBS, se convirtió la malla en una superficie continua, preparada para su posterior impresión en 3D. El proceso consistió en operaciones booleanas para conservar las regiones que interactúan con el resto de componentes del conjunto, consiguiendo así una pieza final refinada con condiciones óptimas de operación.

4. Descripción del modelo/sistema/herramienta

Para el desarrollo completo del proyecto, se han utilizado las siguientes herramientas:

- Solid Edge para el modelado CAD de la palanca inicial, además de las simulaciones FEM estáticas y la Optimización Topológica mediante el módulo de Diseño Generativo.
- Altair Inspire para el suavizado y refinado de la geometría exportada tras la optimización, corrigiendo las irregularidades de la superficie previas a la fabricación.
- PreForm para la preparación de impresión en la impresora Fuse 1+30W, recreando un entorno de impresión en polvo muy parecido al de la HP 580 C, optimizando la disposición de la pieza, estimando tiempos y costes de material antes de lanzar realmente el trabajo.
- HP Jet Fusion 580 C como impresora de fabricación aditiva con tecnología Multi Jet Fusion, seleccionada para producir el prototipo en el material PA 12.

5. Resultados

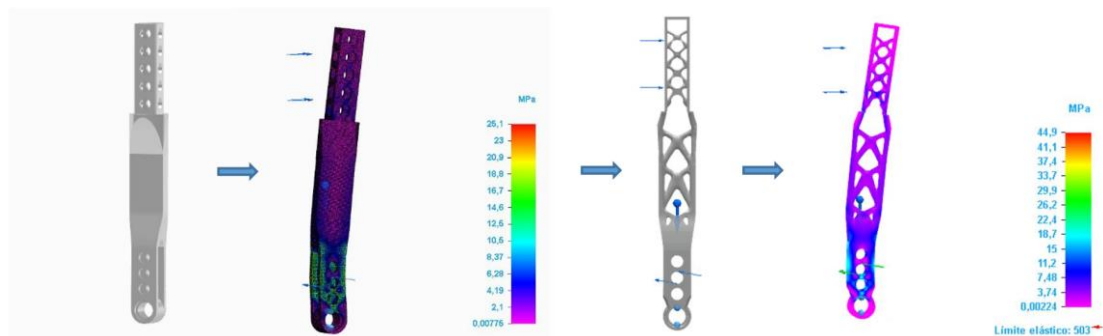


Figura 3: Resultados de las simulaciones FEM.

Fuente propia

En la Figura 3 se pueden observar los resultados obtenidos tras el diseño original de la pieza, su posterior simulación utilizando el estado de cargas calculado y el estudio de diseño generativo con una reducción de masa aproximada del 50%, junto con una simulación final para comprobar que no se supera el límite elástico del material de 503 MPa.



Figura 4: Optimización mediante Diseño generativo y refinado.

Fuente propia

En la figura 4 se observan, de izquierda a derecha, la optimización del diseño original de la palanca, partiendo de la pieza base, seguida por la primera iteración de diseño generativo en la que se obtuvo una reducción de masa del 40%, una segunda iteración en la que la masa de la optimizada frente a la original fue del 50% y finalmente, la pieza final cuya geometría fue refinada con Altair Inspire.

Tras obtener el modelo final suavizado, el prototipo se imprimió en el laboratorio de fabricación aditiva de la ETSI-ICAI, empleando la impresora HP Jet Fusion 580 C con tecnología MJF. Se seleccionó polvo de PA 12 por su alta resistencia mecánica y estabilidad dimensional [3]. La orientación de la pieza se optimizó para minimizar el número de soportes y reducir el riesgo de deformaciones.

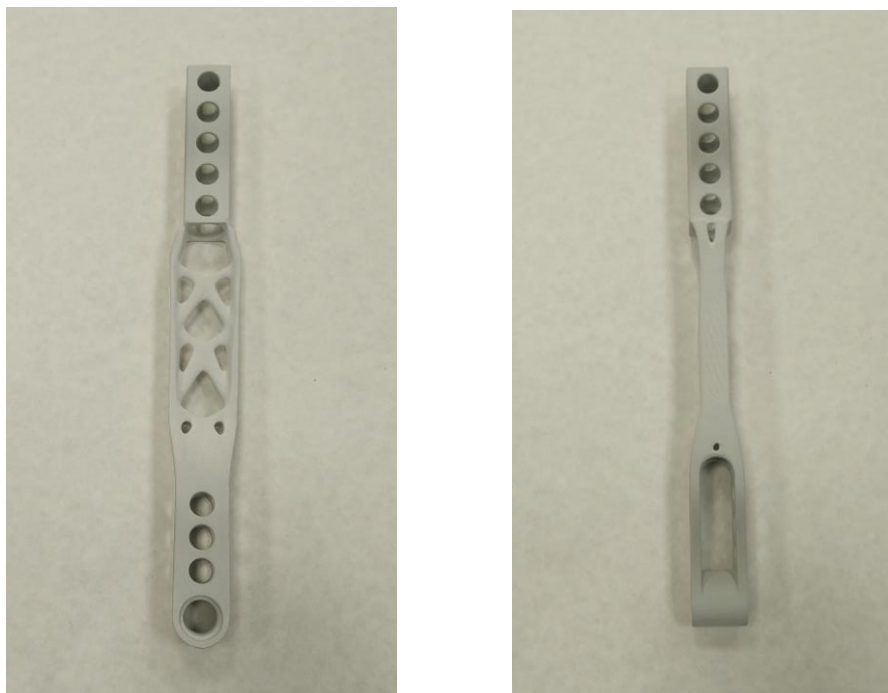


Figura 5: Resultados de la pieza impresa en 3D en MJF (HP 580 C). Fuente propia

6. Conclusiones

Se ha validado con éxito el diseño definitivo de la palanca de cambio secuencial tras su refinado en Altair Inspire y la impresión en Nylon 12 GF en MJF. Los ensayos FEM sobre el modelo final muestran una reducción de masa aproximada del 50%, manteniendo la rigidez estructural y mejorando la durabilidad por fatiga reduciendo concentraciones de tensión.

Esta metodología, que combina simulación, optimización topológica, suavizado geométrico y fabricación aditiva, no solo acelera el ciclo de desarrollo, sino que asegura la viabilidad industrial de componentes de uso final, favoreciendo la personalización ergonómica y el ahorro de costes mediante el uso eficiente de material.

En definitiva, el flujo de trabajo propuesto ofrece un protocolo reproducible y adaptable que mejora el rendimiento de piezas de uso final en entornos de alta exigencia.

7. Referencias

- [1] “Adjustable Sequential Shifter, 2019.” Accessed: Jul. 04, 2025. [Online]. Available: <https://grabcad.com/library/adjustable-sequential-shifter-1>
- [2] E. Puchicabrera et al., “Fatigue behavior of AA7075-T6 aluminum alloy coated with ZrN by PVD,” Int. J. Fatigue, vol. 30, no. 7, pp. 1220–1230, Jul. 2008, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2007.09.001.
- [3] “Nylon 12 / PA 12 (SLS, MJF) - Xometry.” Accessed: Jul. 07, 2025. [Online]. Available: <https://xometry.pro/en-eu/materials/nylon-pa-12/>

ANALYSIS, GENERATIVE DESIGN, AND ADDITIVE MANUFACTURING OF A SEQUENTIAL SHIFT LEVER USING 3D PRINTING FOR INDUSTRIAL APPLICATIONS

Author: Guerrero Yeregui, Adrián

Supervisor: Jiménez Calzado, Mariano

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas)

ABSTRACT

A sequential shift lever from a mechanical assembly has been analyzed and redesigned using topology optimization and generative design tools, with the objective of producing a final-use component via 3D printing. The optimized model demonstrates weight reduction while preserving strength and lowering manufacturing costs.

Keywords: Generative Design, Topology Optimization, Additive Manufacturing, Sequential Shift Lever.

1. Introduction

The project aims to conduct an analysis, generative design, and additive manufacturing of a sequential shift lever intended for installation in racing vehicles. Implementing finite element method (FEM) simulations followed by generative design analyses enables a redesigned lever that reduces weight, enhances mechanical strength, and optimizes manufacturing criteria.

2. Project flow diagram

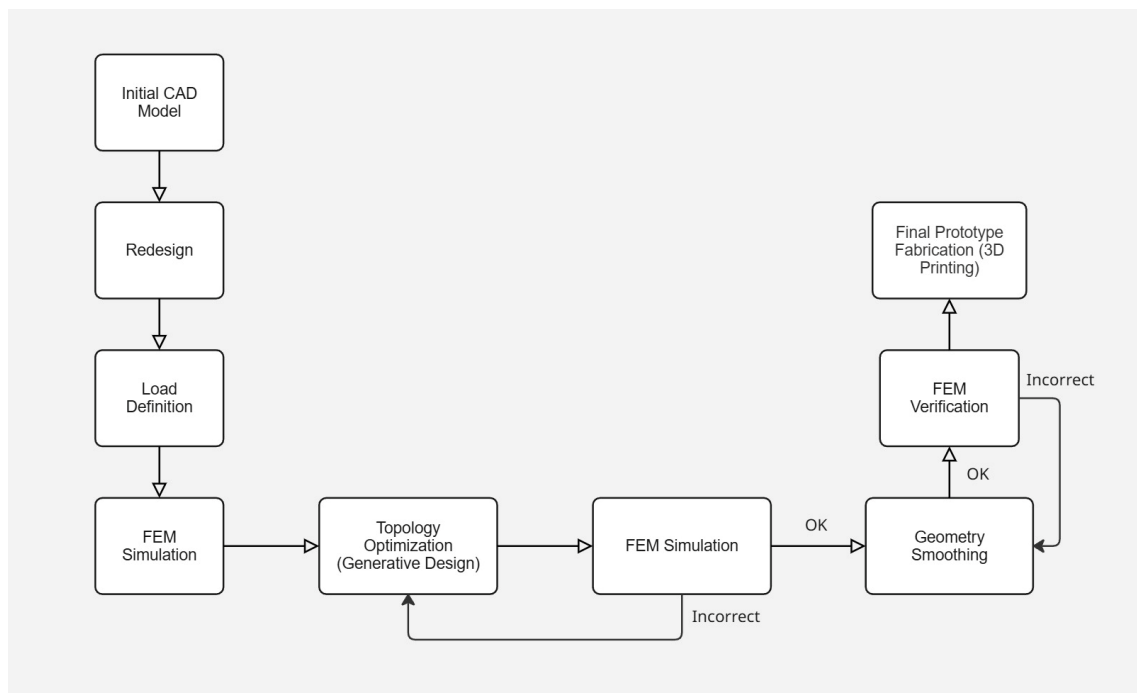


Figura 6: Flowchart of the Design Cycle with Topology Optimization Criteria.

3. Project definition

The project began with a three-position adjustable sequential shift lever assembly, primarily designed for transaxle applications. The CAD model was downloaded from GrabCAD. First, the lever geometry was analyzed to identify all applied loads. Assuming a maximum actuator force of 150 N at the upper grip and a 30° rotation completed in 0.1 s, the resulting inertial and gravitational forces were calculated for the FEM simulations.

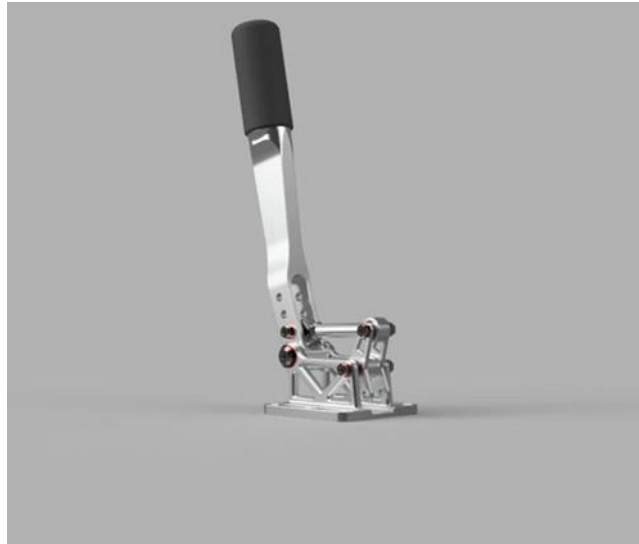


Figura 7: Assembly Containing the Shift Lever Component to Be Optimized.

Source: Adjustable Sequential Shifter, 2019 [1]

To initiate the iterative FEM process in Solid Edge, the lever was rebuilt from scratch, honoring all critical dimensions, using the STEP reference file because the original CAD file exhibited conversion errors.

In the first iteration, the actuator load at the grip and the force transmitted through the connecting link between lever and bell crank (located at the second-position holes) were applied. The lever's pivot at the base was fixed, and gravity was included. The results were successful, yielding a factor of safety ≥ 1.5 . All simulations used Aluminum 7075-T6 for its high strength, good toughness, and fatigue performance [2].

Using these initial FEM results, Solid Edge's Generative Design tool with topology-optimization criteria generated candidate geometries that preserved critical regions while minimizing mass. After several iterations, the optimized model achieved approximately a 50 % mass reduction relative to the baseline part.

Finally, the optimized mesh was converted into a continuous surface in Altair Inspire PolyNURBS, employing Boolean operations to retain interfaces with adjacent components. The result is a refined final model, fully prepared for additive manufacturing under optimal operating conditions.

4. Description of the Model/System/Tools

For the complete development of the project, the following tools were used:

- Solid Edge for the initial CAD modeling of the lever, as well as static FEM simulations and Topology Optimization via its Generative Design module.
- Altair Inspire for smoothing and refining the geometry exported after optimization, correcting surface irregularities prior to manufacturing.
- PreForm for print preparation on the Fuse 1+30W printer, recreating a powder-bed environment similar to the HP 580 C, optimizing part placement, and estimating print times and material costs before actual production.
- HP Jet Fusion 580 C as the additive manufacturing printer using Multi Jet Fusion technology, selected to produce the prototype in PA 12.

5. Results

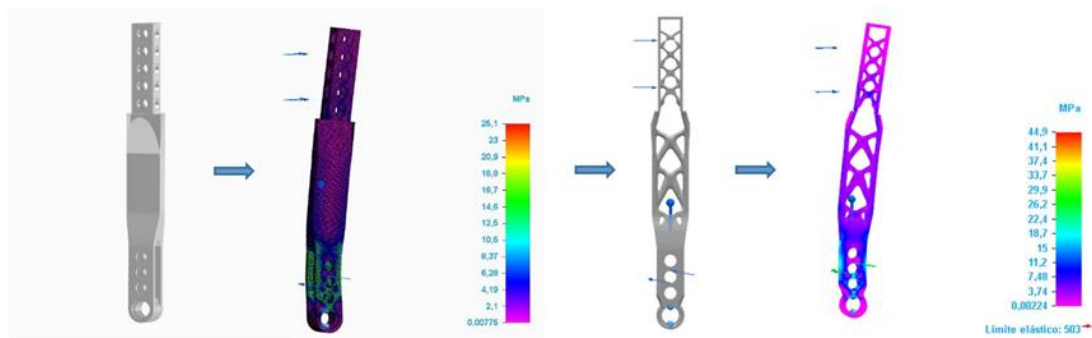


Figura 8: FEM Simulation Results.

Own Source

In Figure 8, the results obtained after the original design of the part, its subsequent simulation using the calculated load definition, and the generative design study, yielding an approximate 50 % mass reduction, can be observed, along with a final simulation verifying that the material's yield strength of 503 MPa is not exceeded.



Figura 9: Optimization through Generative Design and Refinement.

Own source

In Figure 9, from left to right, the optimization of the lever's original design is shown, beginning with the baseline part, followed by the first generative design iteration achieving a 40 % mass reduction, then a second iteration with a 50 % mass decrease relative to the original, and finally the refined geometry produced in Altair Inspire.

After obtaining the final smoothed model, the prototype was printed in the additive manufacturing laboratory at ETSI-ICAI using an HP Jet Fusion 580 C with MJF technology. PA 12 powder was selected for its high mechanical strength and dimensional stability [3]. The part's orientation was optimized to minimize support structures and reduce deformation risk.

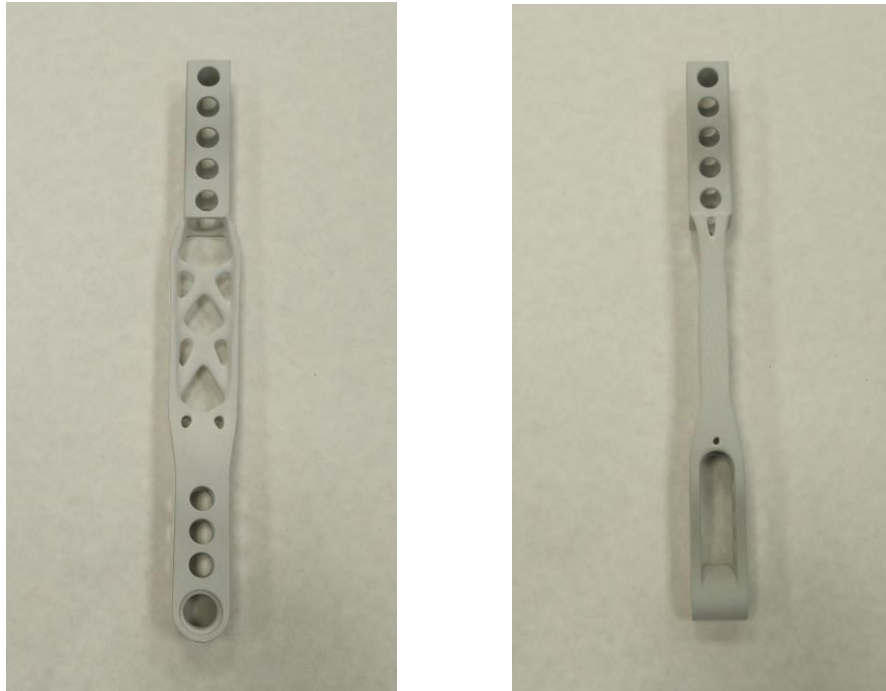


Figura 10: Results after 3D printing with MJF (HP 580C).

Own source

6. Conclusions

The final sequential shift lever design was successfully validated after refinement in Altair Inspire and printing in Nylon 12 GF via MJF. FEM tests on the finished model demonstrate an approximate 50 % mass reduction while preserving structural stiffness and enhancing fatigue durability by reducing stress concentrations.

This methodology combining simulation, topology optimization, geometry smoothing, and additive manufacturing, not only accelerates the development cycle but also ensures industrial viability for end-use components, enabling ergonomic customization and cost savings through efficient material usage.

Overall, the proposed workflow provides a reproducible, adaptable protocol that enhances the performance of end-use parts in high-demand environments.

7. References

- [1] “Adjustable Sequential Shifter, 2019.” Accessed: Jul. 04, 2025. [Online]. Available: <https://grabcad.com/library/adjustable-sequential-shifter-1>
- [2] E. Puchicabrera et al., “Fatigue behavior of AA7075-T6 aluminum alloy coated with ZrN by PVD,” *Int. J. Fatigue*, vol. 30, no. 7, pp. 1220–1230, Jul. 2008, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2007.09.001.
- [3] “Nylon 12 / PA 12 (SLS, MJF) - Xometry.” Accessed: Jul. 07, 2025. [Online]. Available: <https://xometry.pro/en-eu/materials/nylon-pa-12/>

Índice de la memoria

Capítulo 1. Introducción	7
1.1 Optimización Topológica y fabricación aditiva	7
1.2 Motivación del proyecto	8
1.3 Objetivos del proyecto	9
1.4 Objetivos de Desarrollo Sostenible	10
1.5 Metodología del proyecto	11
Capítulo 2. Estado del arte	13
2.1 Palanca de cambio secuencial	13
2.2 Fabricación aditiva en componentes funcionales	15
2.3 Diseño para Fabricación Aditiva	18
2.4 Optimización Topológica.....	20
2.5 Diseño Generativo	23
2.6 Simulación por el Método de Elementos Finitos.....	25
2.7 Vacíos Detectados	28
Capítulo 3. Metodología de diseño y análisis	29
3.1 Definición de la geometría	30
3.2 Selección del material.....	33
3.3 Descripción de cargas y condiciones de contorno	35
Capítulo 4. Desarrollo del Trabajo.....	39
4.1 Modelado CAD	39
4.2 Asignación de Materiales.....	44
4.3 Asignación de Cargas y Restricciones	45
4.4 Simulación FEM.....	49
4.5 Optimización con Diseño Generativo	50
4.5.1 Preservar Regiones.....	51
4.5.2 Adición de Cargas y Restricciones	53
4.5.3 Ajustes de fabricación.....	53
4.5.4 Proceso Iterativo	54
4.6 Refinamiento de la Geometría.....	62
4.7 Comprobación FEM Final	66

Capítulo 5. Prototipado final mediante FA	69
5.1 Tecnologías de Impresión 3D	70
5.2 Metodología de Impresión	72
5.3 Impresión 3D y Post Procesado.....	74
5.3.1 Prototipo sin optimizar	74
5.3.2 Prototipo optimizado.....	77
Capítulo 6. Análisis de Resultados	80
6.1 Presupuestos	80
6.1.1 Palanca original	81
6.1.2 Palanca optimizada	81
6.1.3 Palanca original en Aluminio.....	82
6.2 Comparación de Resultados	83
Capítulo 7. Conclusiones y Trabajos Futuros	86
Capítulo 8. Bibliografía.....	87
Capítulo 9. ANEXOS	89
9.1 ANEXO I	89
9.2 ANEXO II	94
9.3 ANEXO III.....	97
9.4 ANEXO IV	99

Índice de figuras

Figura 1: Diagrama de flujo del proyecto. Fuente propia	4
Figura 2: Conjunto con la pieza de la palanca a optimizar	5
Figura 3: Resultados de las simulaciones FEM.	6
Figura 4: Optimización mediante Diseño generativo y refinado.	7
Figura 5: Resultados de la pieza impresa en 3D en MJF (HP 580 C). Fuente propia	7
Figura 6: Flowchart of the Design Cycle with Topology Optimization Criteria.	9
Figura 7: Assembly Containing the Shift Lever Component to Be Optimized.	10
Figura 8: FEM Simulation Results.	11
Figura 9: Optimization through Generative Design and Refinement.	11
Figura 10: Results after 3D printing with MJF (HP 580C).	12
Figura 11: Ejemplo de una pieza optimizada topológicamente.	7
Figura 12: Aplicación real de una palanca de cambio secuencial en el Porsche GT3 R.	13
Figura 13: Palanca secuencial instalada en un simulador.	14
Figura 14: Modelo utilizado como referencia para el proyecto.	15
Figura 15: Clasificación de procesos de fabricación aditiva dependiendo del estado del material base. Fuente: Additive manufacturing: Challenges, trends, and applications [12]	16
Figura 16: Fabricación aditiva en metal.	17
Figura 17: Diagrama de Flujo del Ciclo de Diseño.. Fuente: ETSI-ICAI	19
Figura 18: Ejemplo de pieza optimizada topológicamente. Fuente: [16]	21
Figura 19: Ciclo de cambio de geometría de una viga.	22
Figura 20: Aplicación del diseño generativo a una pieza de bicicleta.	23
Figura 21: Diseño generativo aplicado a la impresión 3D de un chasis.	24
Figura 22: Procedimiento de análisis de elementos finitos.	26
Figura 23: Ejemplo de aplicación de FEM al proyecto.	27
Figura 24: Ciclo de diseño utilizado para el desarrollo del proyecto.	29
Figura 25: Modelo de referencia base.	30
Figura 26: Ensamble del mecanismo de la Palanca Secuencial.	31

Figura 27: Vista explosionada de todas las piezas del conjunto.....	32
Figura 28: Pieza del conjunto seleccionada para la optimización.	33
Figura 29: Ficha técnica del Aluminio 7075-T6.....	34
Figura 30: Simulación y resultados experimentales de la subida de marcha. Fuente: [23] .	36
Figura 31: Extracto del plano de la palanca a optimizar.	36
Figura 32: Planos de la pieza de GrabCAD.	40
Figura 33: Operaciones de extrusión del agarre.	41
Figura 34: Operaciones de vaciado del agarre y extrusión del cuerpo principal.....	41
Figura 35: Vaciado del cuerpo principal.	42
Figura 36: Modelado de los agujeros del pivote y las posiciones articuladas.....	42
Figura 37: Resultados del modelado de la pieza.	43
Figura 38: Planos de la pieza base.	44
Figura 39: Propiedades del Aluminio 7075-T6.	45
Figura 40: Adición de fuerza de gravedad al modelo.	46
Figura 41: Adición de la fuerza del actuador sobre la palanca.....	46
Figura 42: Adición de la fuerza comunicada a las articulaciones.	47
Figura 43: Adición de la restricción fija en la zona del pivote de la palanca.....	48
Figura 44: Configuración del mallado.	48
Figura 45: Mallado de la pieza.	49
Figura 46: Simulación del estudio estático original.....	50
Figura 47: Proceso de selección de regiones de la pieza a preservar.....	52
Figura 48: Regiones a preservar (en color rojo).	52
Figura 49: Estado de cargas para el diseño generativo.	53
Figura 50: Configuración del estudio de diseño generativo de la 1ª iteración.	54
Figura 51: Resultados erróneos de la 1ª iteración.	55
Figura 52: Configuración del estudio de diseño generativo de la 2ª iteración.	56
Figura 53: Resultados erróneos de la 2ª iteración.	56
Figura 54: Resultados de la 3ª iteración.	57
Figura 55: Resultados de simulación de la 3ª Iteración.	58
Figura 56: Resultados de la 4ª Iteración.....	59
Figura 57: Resultados de simulación de la 4ª Iteración.	59

Figura 58: Resultados de la 4ª Iteración.....	60
Figura 59: Resultados de la 6ª Iteración. Fin del proceso iterativo.	61
Figura 60: Resultados de simulación de la 6ª Iteración.	62
Figura 61: Modelos STL importados a Altair.	63
Figura 62: Vistas detalladas de los defectos generados tras la creación de la PolyNURB. .	64
Figura 63: Configuración del ajuste mediante PolyNURBS.....	64
Figura 64: Creación de bosquejos para seccionar la pieza optimizada.....	65
Figura 65: Herramienta de adición y sustracción booleana.	65
Figura 66: Modelo definitivo refinado.....	66
Figura 67: Comprobación FEM final.....	67
Figura 68: Zona de máxima concentración de tensiones. Fuente propia	67
Figura 69: Flujo de trabajo para Fabricación Aditiva.	69
Figura 70: Tecnologías de impresión 3D.	70
Figura 71: Proceso de trabajo de fabricación aditiva.....	72
Figura 72: Selección del tipo de mallado de exportación en STL.	73
Figura 73: Simulación de impresión de la palanca original en Cura.	75
Figura 74: Proceso de impresión en el laboratorio de la ETSI-ICAI.....	75
Figura 75: Configuración de la impresión real con Simplify3D.	76
Figura 76: Simulación de la pieza optimizada en Preform.	77
Figura 77: Resultados de la simulación con Preform.	77
Figura 78: Resultados de la pieza impresa en 3D en MJF (HP 580 C).	78
Figura 79: Presupuesto para fabricación mediante mecanizado en Aluminio.	83
Figura 80: Comparativa entre los resultados obtenidos.....	84

Índice de tablas

Tabla 1: Resumen de impresión de la palanca original.	76
Tabla 2: Resumen de impresión de la palanca optimizada en Preform.	79
Tabla 3: Análisis de costes para la impresión de la palanca original en FDM.	81
Tabla 4: Análisis de costes para la impresión de la palanca optimizada en MJF.	82
Tabla 5: Comparativa de costes de los resultados obtenidos por distintos métodos.	83

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

1.1 OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA Y FABRICACIÓN ADITIVA

La optimización topológica representa una tecnología que permite replantear el diseño de componentes mecánicos, especialmente en el contexto de la fabricación aditiva. Este método permite a los diseñadores explorar alternativas geométricas que cumplen con objetivos funcionales definidos como maximizar rigidez o reducir masa, redistribuyendo el material en las zonas de la forma más eficiente posible.



Figura 11: Ejemplo de una pieza optimizada topológicamente.

Fuente: (3Dprintingindustry, 2019) [4]

En el ámbito industrial, y particularmente en el sector del automóvil y la competición, esta metodología resulta especialmente útil. Permite reducir el peso de los componentes sin comprometer el rendimiento estructural, mejorando el comportamiento y la eficiencia energética de los vehículos. Además, al combinarse con impresión 3D, se consigue vincular de manera efectiva el diseño y la fabricación, sin necesidad de utillajes ni moldes, lo que reduce tiempos y costes.

La palanca de cambio secuencial es un componente muy usado en el automovilismo y en motocicletas de alto rendimiento, permitiendo cambios de marcha rápidos y precisos. Tradicionalmente, estos mecanismos han sido diseñados mediante procesos convencionales de fabricación que resultan muy costosos para producir diseños personalizados, y están optimizados en base a criterios estructurales y ergonómicos clásicos. En este proyecto se ha seguido un enfoque basado en criterios funcionales y de fabricación aditiva, aplicando el diseño generativo al caso específico de la palanca de cambio secuencial.

A través de un flujo iterativo compuesto por simulaciones FEM, optimización topológica, refinado geométrico y fabricación aditiva, se ha logrado obtener un prototipo funcional con una reducción de masa del 40 % respecto al diseño original, manteniendo el factor de seguridad y mejorando el reparto de tensiones.

Este enfoque se alinea con propuestas metodológicas actuales como la G-DfAM (Generative Design for Additive Manufacturing), que organiza el proceso en fases como el análisis funcional, la definición del espacio de diseño, la aplicación de cargas y restricciones, la ejecución de optimización, el refinamiento de soluciones y la validación final [5]. Esta metodología ha demostrado ser muy útil para el desarrollo de componentes reales sometidos a esfuerzos mecánicos que aprovechan al máximo las posibilidades de la fabricación aditiva.

Con la realización del trabajo se contribuye al avance del diseño mecánico y se exploran nuevas posibilidades en la fabricación de componentes automotrices optimizados, personalizables y sostenibles.

1.2 MOTIVACIÓN DEL PROYECTO

En el sector competitivo automovilístico, la optimización de componentes es clave para mejorar el rendimiento. Las transmisiones secuenciales son ampliamente utilizadas en este ámbito, ya que ofrecen un mayor control y precisión al conductor, especialmente en condiciones extremas como las que se dan, por ejemplo, en el Campeonato Mundial de Rally (WRC), donde el terreno es irregular con baches y saltos. Sin embargo, las palancas de cambio secuenciales suelen fabricarse mediante métodos tradicionales, como el

mecanizado, junto con operaciones posteriores de taladrados, bruñidos o fresados, que limitan su personalización y genera un mayor desperdicio de material.

El diseño generativo y la fabricación aditiva con impresión 3D ofrecen una alternativa innovadora. Estas tecnologías permiten crear palancas de cambio más ligeras, resistentes y adaptadas a las necesidades específicas de cada piloto o equipo. Además, la optimización topológica consigue reducir los costes de fabricación de la pieza, reduciendo el peso de la misma sin comprometer la eficiencia de la estructura.

Este proyecto no solo busca mejorar el rendimiento del componente, sino también demostrar que los criterios de diseño generativo y fabricación aditiva son una alternativa viable y sostenible a los métodos tradicionales. Se espera contribuir a la mejora del rendimiento general del vehículo, algo esencial en aplicaciones como en competiciones donde cada detalle cuenta y la eficiencia es fundamental.

1.3 OBJETIVOS DEL PROYECTO

El objetivo principal de este proyecto es desarrollar una palanca de cambios secuencial mediante el uso de diseño generativo, optimización topológica y fabricación aditiva, orientada a aplicaciones en vehículos de competición. Este trabajo pretende demostrar cómo estas metodologías pueden aplicarse para optimizar componentes funcionales, superando las limitaciones de los métodos de diseño y fabricación tradicionales.

Se plantean los siguientes objetivos específicos:

- **Análisis del diseño inicial de una palanca de cambios secuencial:**
Estudiar las especificaciones técnicas y los requisitos funcionales de la palanca para comprender las cargas dinámicas y condiciones a las que estará sometida. Identificar oportunidades de mejora en términos de peso, resistencia y distribución del material.
- **Rediseño del componente mediante diseño generativo y optimización topológica:**
Utilizar Solid Edge para rediseñar la palanca, enfocándose en reducir el peso y optimizar el rendimiento mecánico y ergonómico, manteniendo un diseño atractivo.

-
- Fabricación del modelo optimizado utilizando impresión 3D:
Familiarizarse con los criterios de fabricación aditiva, seleccionar los materiales y la tecnología de impresión 3D más adecuados para la fabricación de la palanca optimizada. Producir el prototipo funcional y validar su geometría y calidad de fabricación.
 - Validación funcional del componente optimizado.
Realizar análisis por elementos finitos (FEM) para evaluar el comportamiento mecánico de la palanca bajo las condiciones de carga esperadas. Comparar el diseño optimizado con un diseño convencional en términos de resistencia, rigidez y reducción de peso.
 - Estudio final de costes:
Utilizar herramientas como PreForm para estimar el tiempo total de impresión, con la disposición escogida y el material utilizado, Xometry e i.materialise para estimar el coste total de impresión en HP 580 C con PA 12.

1.4 OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE

A continuación, se destacan los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) más relevantes y la contribución del proyecto a cada uno de ellos.

- ODS 9: Industria, Innovación e Infraestructura.
Este objetivo pretende construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización sostenible y fomentar la innovación. El trabajo fomenta la innovación industrial mediante el uso de herramientas avanzadas como el diseño generativo y la optimización topológica. Esta metodología mejora la eficiencia en el uso de materiales, impulsa la innovación en el diseño de piezas técnicas y refuerza la competitividad industrial al reducir tiempos y costes de desarrollo.
- ODS 12: Producción y Consumo Responsables.
Este objetivo pretende garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles. La fabricación aditiva, combinada con el diseño generativo, reduce significativamente el uso de materiales al optimizar la distribución de estos en el

diseño del componente. Este enfoque minimiza los residuos generados en comparación con los métodos tradicionales de mecanizado y fundición. El proyecto promueve prácticas más responsables en la producción industrial, alineándose con los principios de economía circular.

- ODS 13: Acción por el Clima.

El rediseño y fabricación de la palanca de cambios optimizada contribuyen a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero de manera indirecta. Al disminuir el peso del componente, se mejora la eficiencia energética de los sistemas en los que se implementa (por ejemplo, en vehículos industriales o máquinas), lo que se traduce en un menor consumo de combustible o energía durante su vida útil [6].

1.5 METODOLOGÍA DEL PROYECTO

Para garantizar una consecución eficiente del proyecto, se seguirán una serie de etapas estructuradas que permitirán alcanzar los objetivos dentro del plazo establecido. Estas etapas abarcan desde la recopilación de información hasta la fabricación y validación del componente optimizado.

1. Estudio del estado del arte.

Investigación sobre diseño generativo, optimización topológica y fabricación aditiva. Análisis de soluciones existentes en la industria.

2. Formación en herramientas de diseño

Capacitación en Solid Edge para modelado y optimización topológica. Uso de simulación FEM para validar diseños.

3. Diseño y optimización.

Creación de varias versiones optimizadas de la palanca. Comparación y selección del diseño óptimo.

4. Fabricación aditiva.

Selección del material y tecnología de impresión 3D más adecuada. Producción del prototipo y postprocesado.

5. Validación del prototipo.

Ensayos mecánicos y comparación con simulaciones. Evaluación de viabilidad industrial.

6. Documentación y conclusiones.

Redacción del informe final y análisis de impacto en la industria.

Capítulo 2. ESTADO DEL ARTE

2.1 *PALANCA DE CAMBIO SECUENCIAL*

Las transmisiones secuenciales destacan por su capacidad para realizar cambios de marcha más rápidos y precisos. En este tipo de sistema, el conductor acciona una palanca lineal que solo permite subir o bajar marchas de forma ordenada, sin necesidad de desplazamientos laterales. Esto elimina errores de engrane y mejora la velocidad de cambio, siendo un formato muy utilizado en competición, motocicletas y vehículos de altas prestaciones. La velocidad de cambio de marcha con este tipo de palancas puede ser tan baja como 20 milisegundos, más rápida que la mayoría de cajas de doble embrague, y lo consigue siendo, además, robusta, ligera y sencilla para su tamaño [7]. Es por todo esto que este es el tipo de mecanismo por excelencia en el Campeonato Mundial de Rally (WRC) y forma parte de la regulación del campeonato, ya que se requiere un accionamiento manual con baja latencia y mucha resistencia a altas cargas.



Figura 12: Aplicación real de una palanca de cambio secuencial en el Porsche GT3 R.

Fuente: (Spare Wheel 2010) [8]

Actualmente, existen modelos 3D disponibles para la impresión de palancas de cambio secuenciales. Por ejemplo, plataformas como Cults 3D [9] ofrecen archivos STL que permiten a los usuarios imprimir sus propias estructuras. Sin embargo, estos diseños suelen estar destinados para instalarlos en simuladores, por lo que los requerimientos de peso y capacidad para soportar ciertas cargas no son los mismos que se requieren en aplicaciones reales del sector de la automoción.



Figura 13: Palanca secuencial instalada en un simulador.

Fuente: DSD Pro Sequential Shifter [10]

Los estudios sobre el rediseño de palancas de cambio enfocadas a la fabricación aditiva y optimización topológica son todavía escasos. Sin embargo, algunos trabajos recientes han abordado piezas con funciones equivalentes, como levas de embrague o pedales de automóviles, utilizando criterios similares a los planteados en este proyecto: reducción de peso, mejora de la distribución de tensiones y fabricación mediante impresión 3D. Estos trabajos demuestran que la aplicación de técnicas de diseño, como la optimización topológica y el diseño generativo, permiten obtener componentes eficientes con geometrías no convencionales.

En cuanto a modelos de referencia, plataformas como GrabCAD ofrecen conjuntos CAD de palancas secuenciales utilizadas como punto de partida para simulaciones, rediseño o validación estructural. En este proyecto se ha tomado como referencia un modelo de palanca de cambio secuencial ajustable con tres posiciones, adaptado principalmente a aplicaciones de transeje. A partir de dicho modelo, se ha replanteado el diseño de la palanca aplicando metodologías avanzadas con el fin de mejorar su comportamiento estructural y su viabilidad como pieza de uso final impresa en 3D.

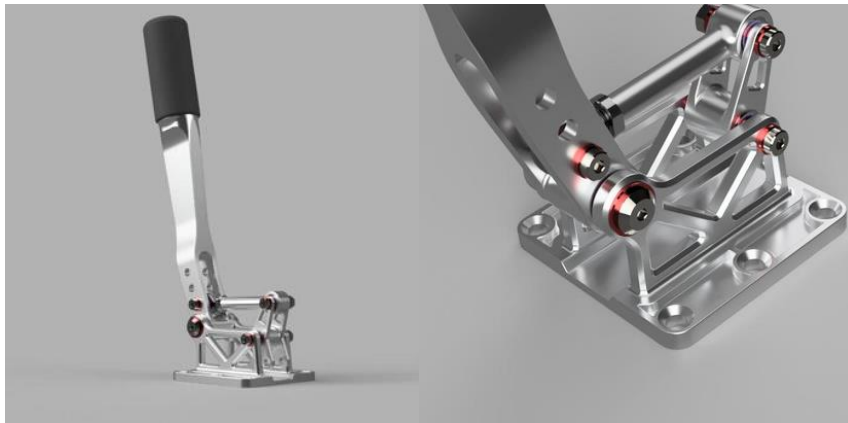


Figura 14: Modelo utilizado como referencia para el proyecto.

Fuente: GrabCAD [1]

2.2 FABRICACIÓN ADITIVA EN COMPONENTES FUNCIONALES

La fabricación aditiva (FA) es un conjunto de tecnologías de producción que se basan en la generación de piezas mediante deposición o sinterizado de material capa a capa a partir de modelos 3D. A diferencia de los procesos convencionales, que suelen extraer material o necesitar utillajes específicos, la FA construye geometrías complejas sin herramientas dedicadas, lo que permite un alto grado de libertad de diseño, personalización y reducción de exceso de material.

En su forma más habitual para polímeros, la FA incluye procesos como el SLS (Selective Laser Sintering), el MJF (Multi Jet Fusion) y el FDM (Fused Deposition Modeling). Para

metales, predomina el DMLS (Direct Metal Laser Sintering) y el EBM (Electron Beam Melting). El principio utilizado para la deposición de material para cada tipo de tecnología consiste en un haz o luz de alta energía (láser, haz de electrones, resistencia eléctrica) para SLA – DLP – SLS – MJF – SLM y DMLS, e inyección, extrusión o corte para BJ – MJ – FDM y LOM [11].

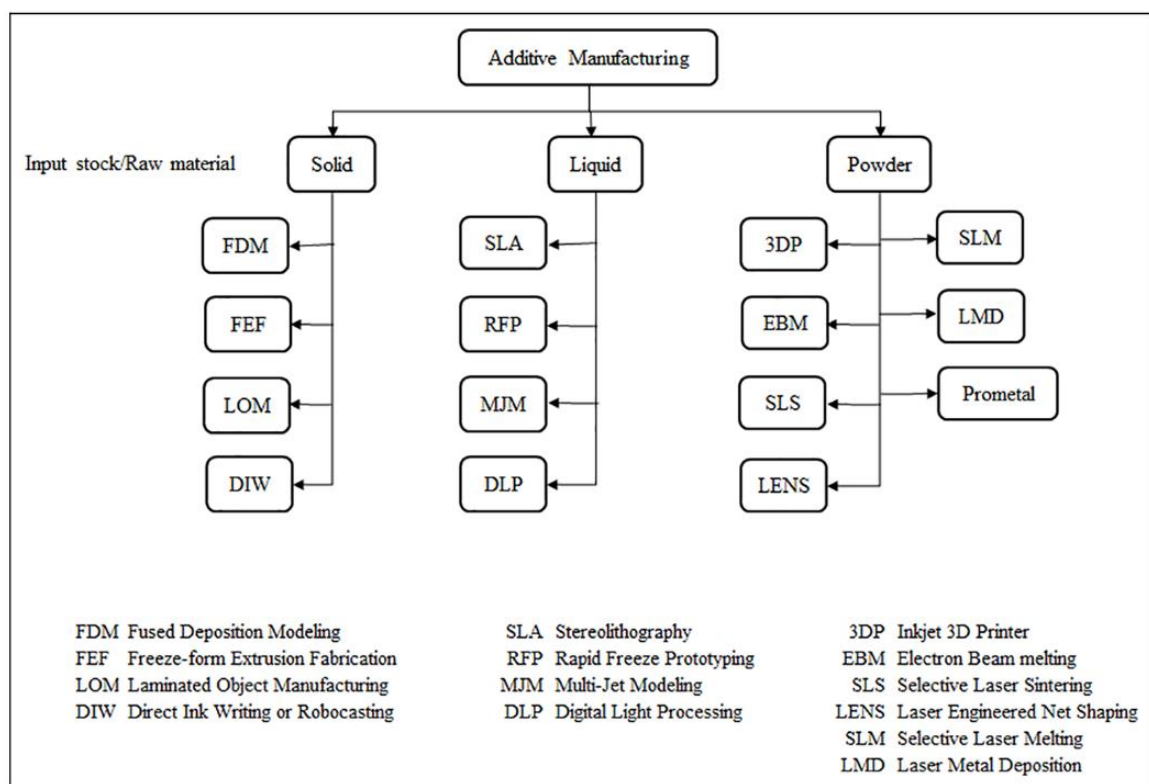


Figura 15: Clasificación de procesos de fabricación aditiva dependiendo del estado del material base.

Fuente: Additive manufacturing: Challenges, trends, and applications [12]

Para que un componente fabricado mediante FA sea completamente funcional, es decir, capaz de soportar cargas mecánicas reales y mantener tolerancias dimensionales, es necesario:

- Diseñar la geometría considerando las limitaciones (espesor mínimo, ángulos de voladizo, etc).

- Seleccionar el material adecuado: en este proyecto se ha optado por poliamida PA 12 en MJF, por su buena rigidez-peso y estabilidad dimensional.
- Optimizar la orientación de impresión y los parámetros del proceso para minimizar defectos (porosidad) y garantizar que este proceso pueda ser realizado en series.



Figura 16: Fabricación aditiva en metal.

Fuente: Podcast Industria 4.0 [13]

Entre las ventajas que vienen asociadas a los procesos de ejecución de la fabricación aditiva, caben destacar los mencionados por Manuel Zahera, en su publicación sobre la FA [14]:

- Esta modalidad de fabricación permite reducir los lotes, llegando incluso a la producción de series unitarias, ya que no hay necesidad de utilizar utillajes personalizados.
- Permite la fabricación de una sola vez del producto acabado, evitando procesos de ensamblaje de componentes, reduciendo además posibles errores durante el ciclo completo de producción.
- Se consigue una reducción o eliminación de costes asociados (fabricación del utillaje, paradas por cambios de referencia, mantenimiento e inspección), y de muchos procesos intermedios.

Estos principios permiten pasar de prototipos a piezas de uso final, con prestaciones mecánicas comparables a otras técnicas de fabricación. En el caso de la palanca de cambio secuencial de este trabajo, la FA ofrece la posibilidad de producir una geometría optimizada topológicamente y adaptada ergonómicamente, sin los costes ni tiempos asociados al mecanizado de series cortas.

2.3 DISEÑO PARA FABRICACIÓN ADITIVA

En la fabricación aditiva, existen herramientas de diseño específicas que se utilizan con el objetivo de crear un diseño optimizado para ser impreso posteriormente. El diseño para fabricación aditiva (DfAM) surge como una evolución del diseño convencional ante la necesidad de aprovechar al máximo las capacidades específicas de la fabricación aditiva. A diferencia de los métodos tradicionales, donde las limitaciones tecnológicas imponen fuertes restricciones geométricas, esta metodología permite eliminar gran parte de estas limitaciones y optimizar componentes con geometrías complejas, funcionales y personalizables.

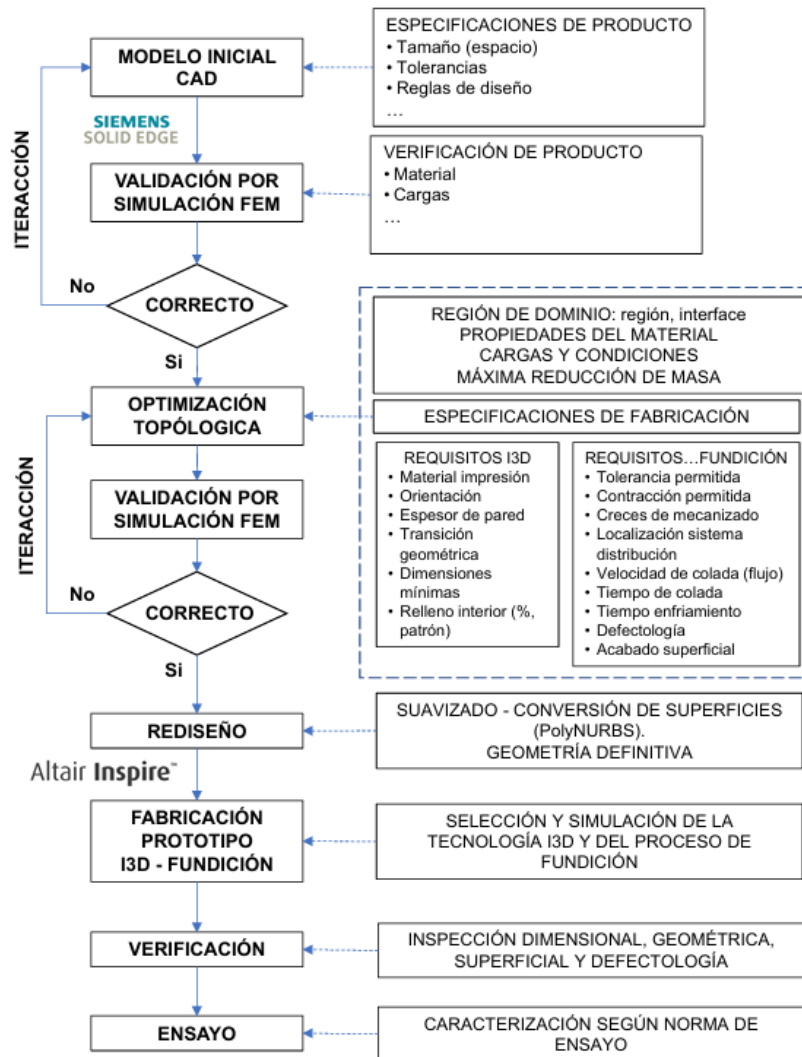


Figura 17: Diagrama de Flujo del Ciclo de Diseño.. Fuente: ETSI-ICAI

La metodología G-DfAM presentada por Tristan Briard, Frédéric Segonds y Nicolo Zamariola en su publicación de 2020 [15], plantea una integración entre diseño generativo y fabricación aditiva. Su enfoque se estructura en cuatro fases sucesivas: traducción, inicialización, integración de criterios AM y refinamiento. En la primera, se definen el espacio de diseño, zonas a preservar y cargas aplicadas. En la segunda, se realizan iteraciones de optimización para explorar el diseño sin restricciones. En la tercera, se ajusta la geometría a las limitaciones específicas del proceso (como ángulos, espesores o ejes de impresión) y

finalmente, en la cuarta fase, se aplica un refinamiento adicional mediante estructuras reticuladas tipo lattice.

Este planteamiento permite aprovechar el potencial de ambas tecnologías. En primer lugar, el diseño generativo permite reducir de forma significativa la masa de los componentes, ajustándose a requerimientos específicos de rigidez o resistencia. En segundo lugar, la fabricación aditiva garantiza que dichas geometrías complejas puedan producirse sin necesidad de utillajes, minimizando el número de piezas y facilitando la integración funcional. El resultado es una mejora en términos de sostenibilidad, rendimiento mecánico y viabilidad de fabricación.

Además, la consolidación de múltiples piezas en una sola, característica del enfoque A-DfAM [15], reduce costes de producción, simplifica la logística de ensamblaje y mejora la trazabilidad. Esto es relevante en sectores como la automoción o la aeronáutica, donde el número de componentes y su complejidad tiene un gran impacto en costes operativos y en el mantenimiento.

En el contexto del proyecto, el enfoque DfAM ha sido relevante para plantear la geometría optimizada de la palanca de cambio secuencial. Haciendo uso combinado de simulación estructural, herramientas de diseño generativo y refinamiento orientado a impresión, se ha podido desarrollar un componente funcional con reducción de masa, menor coste y fabricable mediante FA. La integración de este enfoque garantiza un flujo de trabajo repetible y adaptable a nuevos casos.

2.4 OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA

Como ya se mencionó en el apartado 1.1 de la introducción, la optimización topológica (OT) es una técnica de diseño estructural orientada a maximizar la eficiencia mecánica de un componente mediante la distribución óptima del material dentro de un volumen dado. A diferencia de otros métodos de optimización más convencionales, esta metodología no se basa únicamente en modificar la geometría externa del modelo, sino en definir la mejor

configuración posible del material según las condiciones de carga, restricciones y objetivos definidos, sin presuponer una forma inicial específica.



Figura 18: Ejemplo de pieza optimizada topológicamente. Fuente: [16]

El proceso se integra de forma natural con el análisis por elementos finitos, utilizando la misma malla para evaluar las distintas soluciones. A partir de un dominio de diseño, el software elimina progresivamente material de las regiones menos solicitadas para conseguir un modelo que minimice la rigidez estructural (compliance), el peso, o funciones objetivo establecidas. Este resultado puede usarse posteriormente como base para refinar el diseño final, adaptándolo a requisitos concretos del proceso de fabricación.

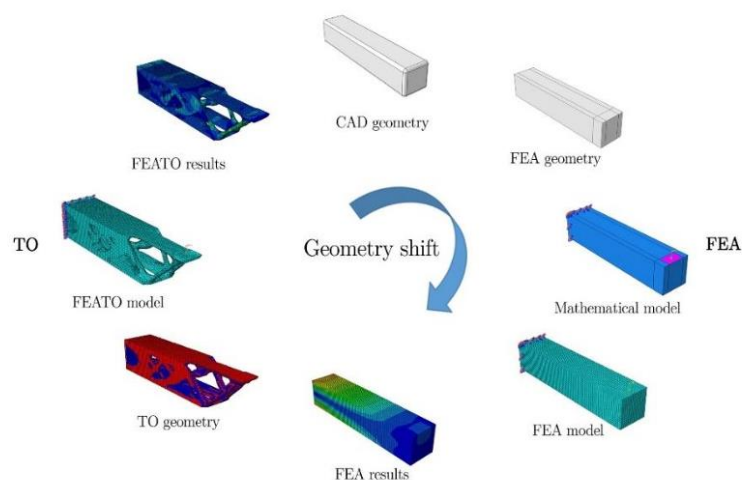


Figura 19: Ciclo de cambio de geometría de una viga.

Fuente: [17]

El artículo de Evangelos Tyflopoulos, David Tollnes Flem, Martin Steinert y Anna Olsen [17] expone cómo la OT ha evolucionado desde sus formulaciones iniciales hasta convertirse en una herramienta clave en la fase conceptual del diseño de producto. Se señalan como principales ventajas su capacidad para generar soluciones altamente eficientes desde el punto de vista estructural, así como su aplicabilidad directa en combinación con procesos de fabricación aditiva. Sin embargo, también se identifican limitaciones como la sensibilidad del método a las condiciones de contorno iniciales, la dependencia de la discretización de la malla o la dificultad para interpretar soluciones no fabricables directamente.

Otro aspecto relevante es que, pese a la evolución de los algoritmos, la mayoría de enfoques actuales tienden a encontrar óptimos que dependen del diseño inicial. Esto significa que, si las restricciones geométricas o de carga están mal definidas, el modelo resultante puede no ser el más eficiente en términos globales. Es por esto que en aplicaciones reales como la de este proyecto, es importante realizar una definición del espacio de diseño y de las condiciones de contorno, así como aplicar un refinamiento posterior a la optimización que adapte el modelo resultante a criterios de fabricación reales.

En resumen, la optimización topológica constituye una herramienta fundamental dentro del flujo de trabajo basado en diseño generativo y fabricación aditiva. Su integración permite obtener diseños que combinan un resultado ligero y estructuralmente eficiente, siendo especialmente útil en componentes que requieren un alto rendimiento con peso reducido, como piezas funcionales para automoción o aeronáutica.

2.5 DISEÑO GENERATIVO

El diseño generativo es un método que permite generar nuevas soluciones de diseño a partir de unos objetivos funcionales definidos y un conjunto de restricciones. A diferencia de los métodos tradicionales de optimización, que trabajan sobre una geometría existente, el diseño generativo parte de un espacio de diseño vacío y lo explora mediante algoritmos avanzados para encontrar configuraciones óptimas que cumplan con los requerimientos solicitados. De esta forma se obtienen geometrías poco convencionales que difícilmente serían generadas por otros métodos de diseño.

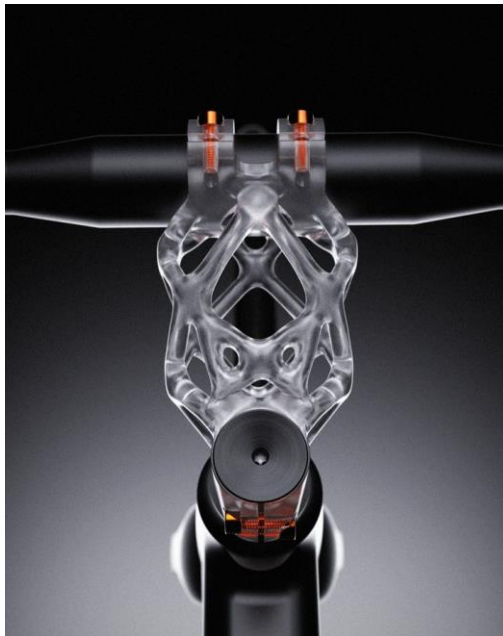


Figura 20: Aplicación del diseño generativo a una pieza de bicicleta.

Fuente: Generative bike stem [18]

El proceso combina simulación estructural, parámetros de fabricación y lógica algorítmica, integrando desde el inicio del ciclo variables como el material, las cargas, las restricciones y la tecnología de fabricación. A través de esta integración, se generan varias alternativas geométricas, que luego se filtran o refinan en función de ciertos criterios funcionales, mecánicos o económicos. Esta lógica se traslada a preguntarse de qué forma cumple el diseño con los requisitos definidos.

Tal y como recogen Lucas García Menéndez, Manuel Domínguez Somonte y María del Mar Espinosa Escudero en su publicación [19], el diseño generativo se apoya en algoritmos que simulan procesos naturales, como los algoritmos genéticos, los autómatas celulares, la gramática geométrica o los sistemas multiagente, entre otros. Cada uno de estos enfoques sirve para averiguar configuraciones distintas del espacio de diseño, generando soluciones originales adaptadas al proceso de fabricación seleccionado. En este sentido, la fabricación aditiva ha sido uno de los métodos más importantes para el desarrollo de esta disciplina, ya que elimina muchas de las limitaciones geométricas que pueden presentar los métodos de producción tradicionales.

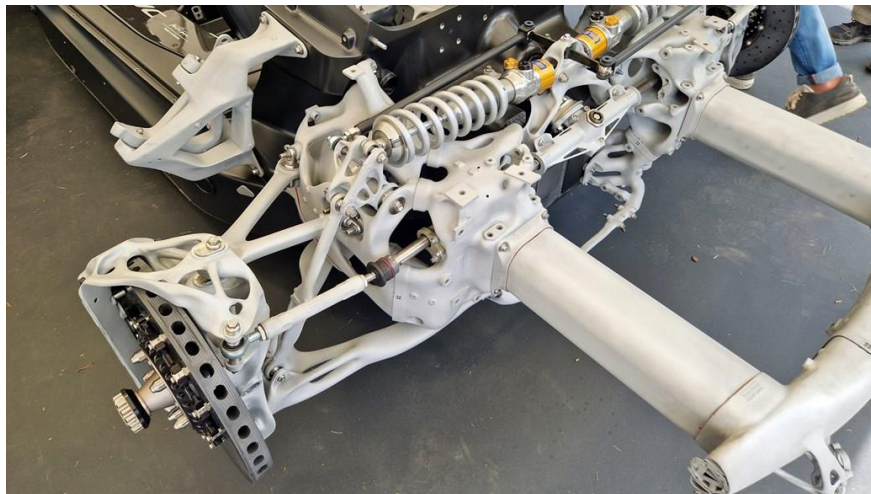


Figura 21: Diseño generativo aplicado a la impresión 3D de un chasis.

Fuente: Czinger 21C [20].

En el ámbito del diseño mecánico, su aplicación ha ido en aumento gracias al desarrollo de plataformas como Autodesk Fusion 360 o CATIA Function-Driven Generative Designer.

Estas herramientas permiten integrar el diseño paramétrico, la simulación FEM y los criterios de fabricación aditiva en un entorno único, automatizando gran parte del flujo de trabajo. Como referencia, uno de los casos más representativos es el de General Motors, que rediseñó un soporte de asiento utilizando Autodesk Generative Design, reduciendo su peso en un 40 % y consolidando ocho piezas en una sola, manteniendo los requisitos funcionales y de seguridad [19].

Hay que realizar una distinción entre el diseño generativo y la optimización topológica. La optimización topológica actúa sobre una geometría existente, el diseño generativo parte de cero, generando las formas desde los requisitos establecidos. Además, incorpora de forma explícita la tecnología de fabricación desde las primeras etapas, lo que evita rediseños posteriores y garantiza que las soluciones propuestas sean viables en la producción.

En el contexto de este proyecto, el uso de diseño generativo ha sido clave para obtener una palanca optimizada, fabricada mediante impresión 3D, y adaptada a los requerimientos establecidos. Con el uso de esta herramienta, ha sido posible generar una geometría con un 50 % menos de masa respecto al modelo original, conservando su integridad estructural y reduciendo los costes de fabricación.

2.6 SIMULACIÓN POR EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

El método de elementos finitos (FEM) es una herramienta que posee la capacidad de predecir el comportamiento mecánico de componentes complejos bajo diferentes condiciones de carga, siendo un recurso muy utilizado en el diseño asistido por ordenador. Consiste en una técnica numérica utilizada para resolver sistemas complejos de ecuaciones diferenciales parciales que describen problemas físicos continuos. Se resuelve mediante la discretización en pequeñas entidades que se llaman elementos. Cada uno de estos elementos se comporta según una formulación matemática específica, y el conjunto de ellos representa una aproximación del comportamiento del sistema completo.

El flujo de trabajo general en un análisis por FEM consta de tres fases fundamentales: pre-procesamiento, solución y post-procesado. En la primera, se define la geometría CAD del

modelo, se asignan las propiedades de los materiales, las condiciones de contorno y se genera el mallado. Luego, se ejecuta la simulación mediante un solucionador numérico que entrega los resultados de desplazamientos, tensiones y deformaciones. Finalmente, se interpretan estos resultados, comúnmente a través de la tensión de von Mises como criterio de fallo para materiales dúctiles [21].

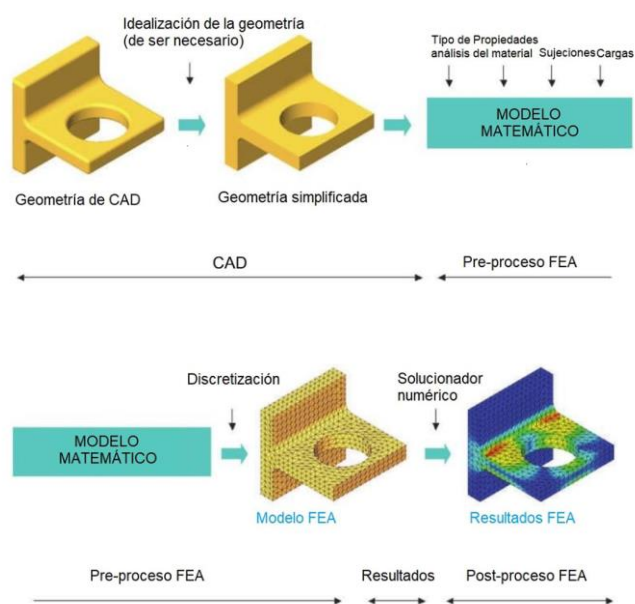


Figura 22: Procedimiento de análisis de elementos finitos.

Fuente: Introducción al método de elementos finitos [21]

Entre los programas más empleados para el análisis FEM en el ámbito académico e industrial se encuentran SolidWorks, Solid Edge y Matlab PDE Toolbox. Ambos son capaces de realizar análisis estructurales estáticos mediante elementos que permiten representar adecuadamente las geometrías y obtener campos de desplazamiento más precisos.

Para obtener resultados fiables, es imprescindible realizar un mallado adecuado del modelo CAD. Esto implica una simplificación geométrica que elimine elementos irrelevantes y una limpieza del modelo cuando sea necesario. La calidad del mallado influye directamente en la precisión del análisis y en el tiempo de computación requerido, por lo que se debe encontrar un equilibrio entre ambos.

Los análisis se realizan bajo el comportamiento lineal del material, deformaciones pequeñas y cargas estáticas. Estos requisitos pueden llegar a suponer una limitación en el análisis de componentes sometidos a condiciones extremas, como altas velocidades o impactos. Para tales casos, se requieren modelos más complejos que consideren no linealidad geométrica o material, y análisis dinámico.

La integración del método de elementos finitos en el proceso de rediseño de una palanca de cambio secuencial permite anticipar el comportamiento mecánico de la pieza bajo esfuerzos reales. Esta simulación facilita la validación estructural del diseño y justifica su fabricación final mediante impresión 3D. Además, facilita el flujo de trabajo mediante un proceso iterativo de diseño generativo, identificando la configuración más favorable.

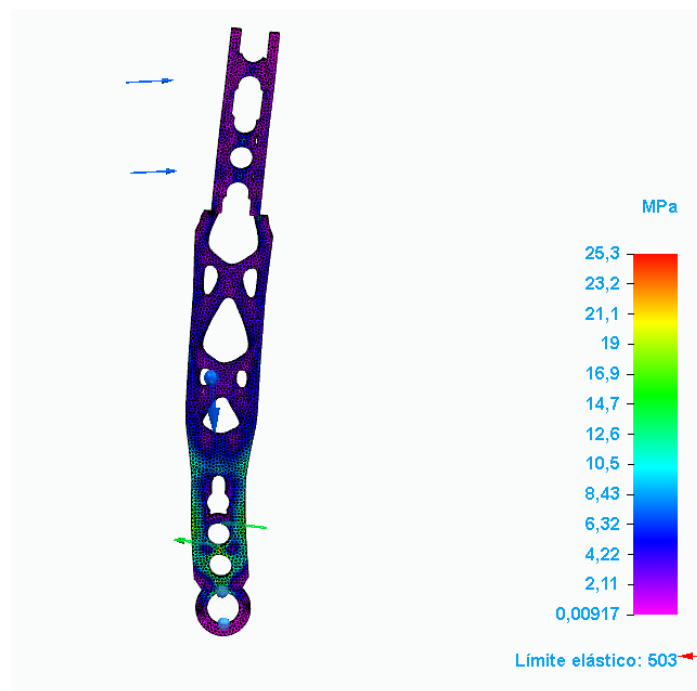


Figura 23: Ejemplo de aplicación de FEM al proyecto.

Fuente propia

2.7 VACÍOS *DETECTADOS*

En el apartado 2 se ha revisado el estado actual de las tecnologías relacionadas con el rediseño de componentes mecánicos mediante fabricación aditiva. Se ha comprobado que existen herramientas como la optimización topológica, el diseño generativo o la simulación FEM que ya están dando buenos resultados en sectores como la automoción o la aeronáutica.

Sin embargo, también se han detectado ciertos vacíos. Por ejemplo, no se encuentran muchos casos en los que se aplique todo este conjunto de técnicas para rediseñar palancas de cambio secuencial. Tampoco hay mucha documentación que explique de forma práctica cómo integrar herramientas generativas y simulación FEM en un flujo de trabajo realista, desde el análisis inicial hasta la fabricación final en 3D.

Aunque hay estudios que llegan hasta el modelo optimizado o simulado, pocos incluyen una validación experimental o una reflexión sobre la viabilidad económica del proceso. Por eso, este proyecto busca aportar un ejemplo concreto y documentado que pueda servir de referencia para futuros desarrollos similares.

Capítulo 3. METODOLOGÍA DE DISEÑO Y ANÁLISIS

La propuesta de estudio de este proyecto consiste combinar el análisis numérico (FEM), la innovación del diseño generativo y la flexibilidad de la fabricación aditiva, con el objetivo de desarrollar una palanca de cambio secuencial optimizada, lista para producirse y comercializarse.

Para ello, se han seguido las fases que aparecen en el siguiente ciclo de diseño.

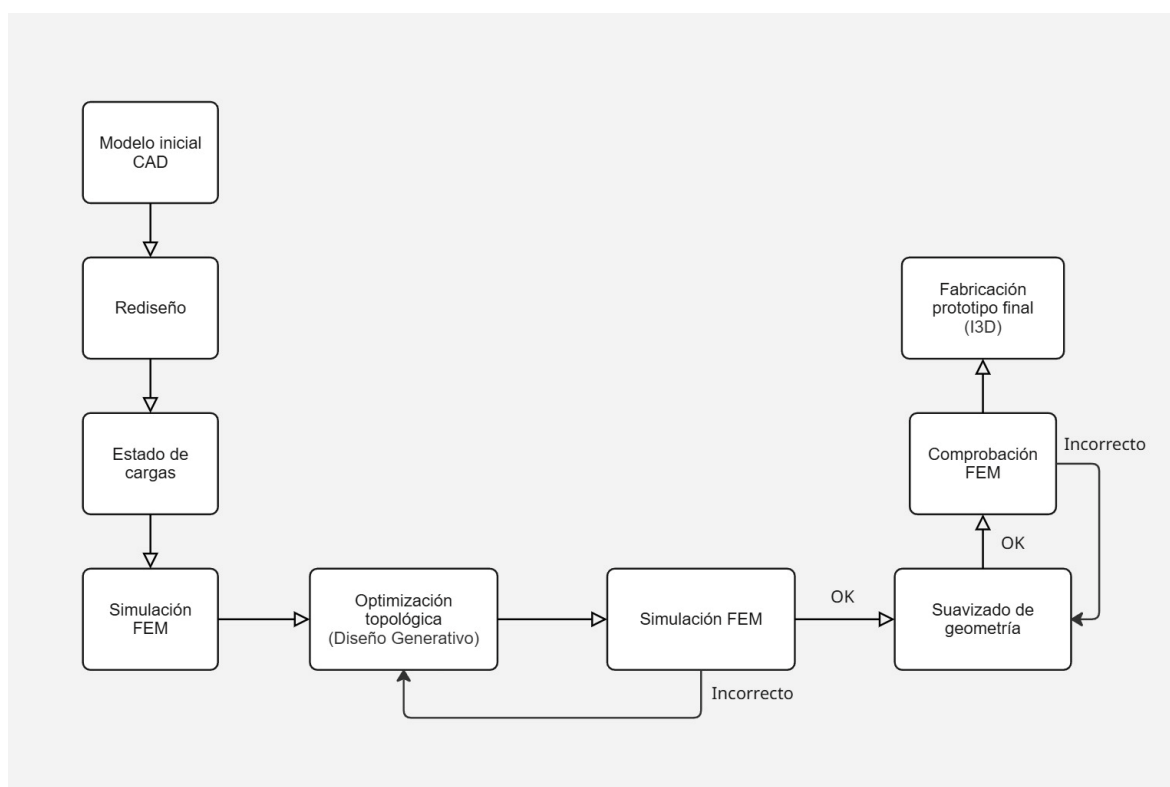


Figura 24: Ciclo de diseño utilizado para el desarrollo del proyecto.

Fuente propia

Siguiendo esta metodología, se logra reducir el peso del componente (hasta un 40 %) sin comprometer su rigidez ni fiabilidad, disminuyendo costes de material y consumo energético. Gracias a un flujo iterativo de simulación, optimización y suavizado, se asegura la consecución rápida hacia un diseño óptimo. Al validar cada versión mediante FEM y

simular el proceso de impresión 3D antes de pasar al prototipado, se reducen los riesgos en la fabricación del modelo final. Con esta dinámica se logra facilitar la personalización de componentes de uso final, pudiendo adaptar geometrías para distintos modelos de vehículo o exigencias de cliente sin necesidad de añadir utillajes.

3.1 DEFINICIÓN DE LA GEOMETRÍA

Para poder comenzar con el ciclo de diseño, se parte de un conjunto mecánico de una palanca secuencial ajustable en 3 posiciones, adaptable para el accionamiento por cable o barra, descargado de GrabCAD. El diseño original fue elaborado por Albert Rankin, construido a partir de aluminio macizo y modelado con herrajes de titanio [1].

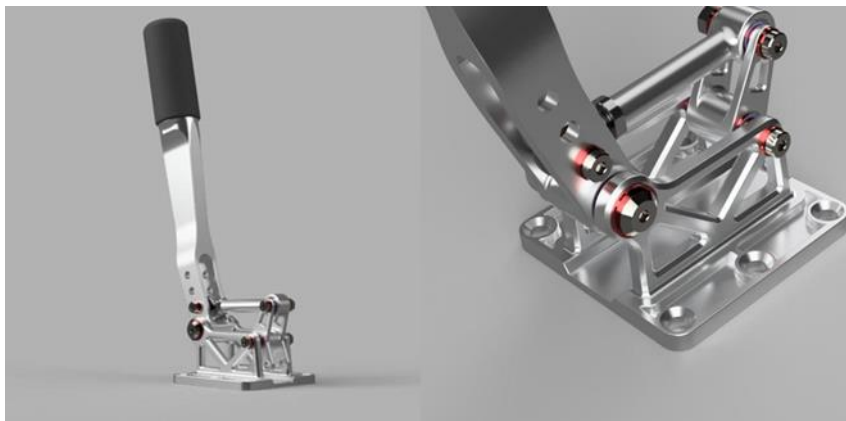


Figura 25: Modelo de referencia base.

Fuente: [1]

Todas las piezas fueron descargadas de GrabCAD en formato STEP, convertidas a Solid Edge y ensambladas creando relaciones entre las piezas. Este proceso fue clave para comprender el funcionamiento del mecanismo completo.



Figura 26: Ensamble del mecanismo de la Palanca Secuencial.

Fuente propia



Figura 27: Vista explosionada de todas las piezas del conjunto.

Fuente propia

De todo el conjunto, se ha seleccionado únicamente la pieza de la palanca para optimizarla



Figura 28: Pieza del conjunto seleccionada para la optimización.

Fuente propia

3.2 SELECCIÓN DEL MATERIAL

Con el objetivo de realizar las simulaciones de la palanca, se ha escogido la aleación de Aluminio 7075-T6. La aleación 7075, un producto de aluminio forjado conformado en frío, posee la mayor resistencia de entre todas las aleaciones de aluminio empleadas en la industria mecánica. Los tratamientos T-6 y T-651 presentan una resistencia a la tracción típica de 572 MPa, superior a la de muchos aceros no aleados [22].

Como bien describe Alcoa Global Cold Finished Products [22], Debido a su muy alta resistencia, la aleación 7075 se utiliza en piezas estructurales con elevadas solicitaciones. Entre sus aplicaciones se incluyen accesorios para aeronaves, engranajes y ejes, partes de fuselaje, engranajes medidores y de velocímetro, partes de misiles y diversos componentes de equipos comerciales de aviación, aeroespacial y de defensa.

Alloy 7075 sheet and plate products have application throughout aircraft and aerospace structures where a combination of high strength with moderate toughness and corrosion resistance are required.

Typical applications are alclad skin sheet, structural plate components up to 4 inches in thickness and general aluminum aerospace applications.

CHEMICAL COMPOSITION LIMITS (WT. %)

Si	0.40	Zn	5.1-6.1
Fe	0.50	Ti	0.20
Cu	1.2-2.0	Others, each	0.5
Mn	0.30	Others, total	0.15
Mg	2.1-2.9	Balance, Aluminum	
Cr	0.18-0.28		

Note: Value maximum if range not shown.

MECHANICAL PROPERTIES

ALLOY 7075 All values are minimum long transverse mechanical properties except where noted.

TEMPER	THICKNESS in. (mm)	TENSILE STRENGTH ksi (MPa)	YIELD STRENGTH ksi (MPa)	ELONGATION %
0 Sheet & plate	0.015-2.00 (0.38-50.80)	40 (max) (276)	21 (max) (145)	9-10
T6 Sheet	0.008-0.249 (0.203-6.32)	74-78 (510-538)	63-69 (434-476)	5-8
T651 Plate	0.250-4.000 (6.35-101.60)	78-67 (538-462)	67-54 (462-372)	9-3
T76 Sheet	0.125-0.249 (3.18-6.32)	73 (503)	62 (427)	8
T7651 Plate	0.250-1.000 (6.35-25.40)	72-71 (496-490)	61-60 (421-414)	8-6
T73 Sheet	0.040-0.249 (1.02-6.32)	67 (462)	56 (386)	8
T7351 Plate	0.250-4.000 (6.35-101.60)	69-61 (476-421)	57-48 (393-331)	7-6

Figura 29: Ficha técnica del Aluminio 7075-T6.

Fuente: Alcoa Global Cold Finished Products [22]

Entre los principales beneficios de emplear la aleación de Aluminio 7075-T6 en la palanca de cambio secuencial, se incluyen los siguientes:

- Relación resistencia-peso:

Con una resistencia a tracción de 572 MPa y una densidad de 2,81 g/cm³, ofrece rigidez estructural sin penalizar la masa del conjunto.

- Resistencia al límite elástico:
Su límite elástico de 503 MPa permite diseñar con factores de seguridad elevados ($\geq 1,5$) frente a solicitudes estáticas y dinámicas.
- Comportamiento a fatiga:
Con una resistencia a fatiga aproximada de 159 MPa a $5 \cdot 10^7$ ciclos, garantiza durabilidad en aplicaciones de carga cíclica como el accionamiento de palancas.
- Buena tenacidad y resistencia al agrietamiento:
Su tratamiento T6 refina la microestructura, reduciendo la propagación de grietas y mejorando la seguridad en servicio.
- Maquinabilidad y acabado:
Altamente mecanizable con herramientas convencionales, admite tolerancias ajustadas y acabados de superficie finos.
- Compatibilidad con tratamientos superficiales:
Puede anodizarse, pintarse o recubrirse para mejorar la resistencia a la corrosión y la estética sin afectar sus propiedades mecánicas.
- Disponibilidad industrial y coste moderado:
Es una de las aleaciones de alta resistencia más extendidas en el mercado, lo que facilita el abastecimiento y mantiene costes competitivos.

3.3 DESCRIPCIÓN DE CARGAS Y CONDICIONES DE CONTORNO

El objetivo es representar, en un único caso de carga, las condiciones límite que puede experimentar la palanca tanto en la subida como en la bajada de marcha. El cálculo del estado de cargas ha sido una estimación en la que se ha resuelto un equilibrio dinámico de fuerzas. Para ello, se partió del estudio: Simulation of the shift force for a manual transmission (2003) [23] para estimar la fuerza de accionamiento del actuador sobre la palanca, además de estimar el tiempo de accionamiento.

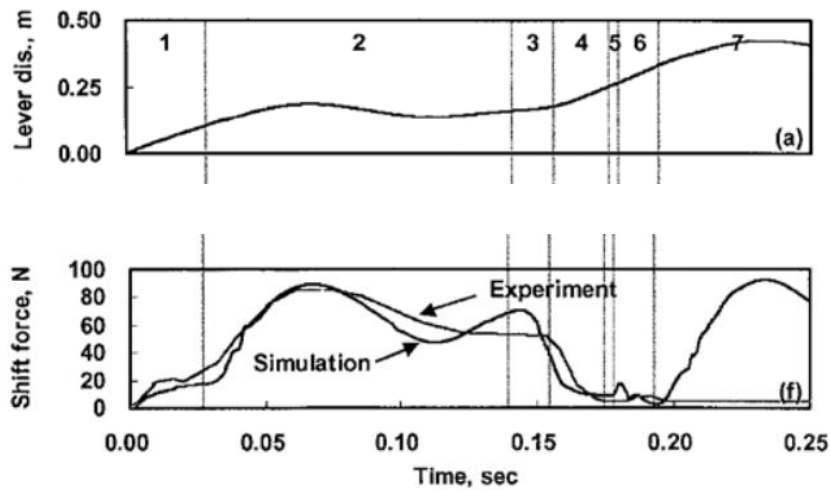


Figura 30: Simulación y resultados experimentales de la subida de marcha. Fuente: [23]

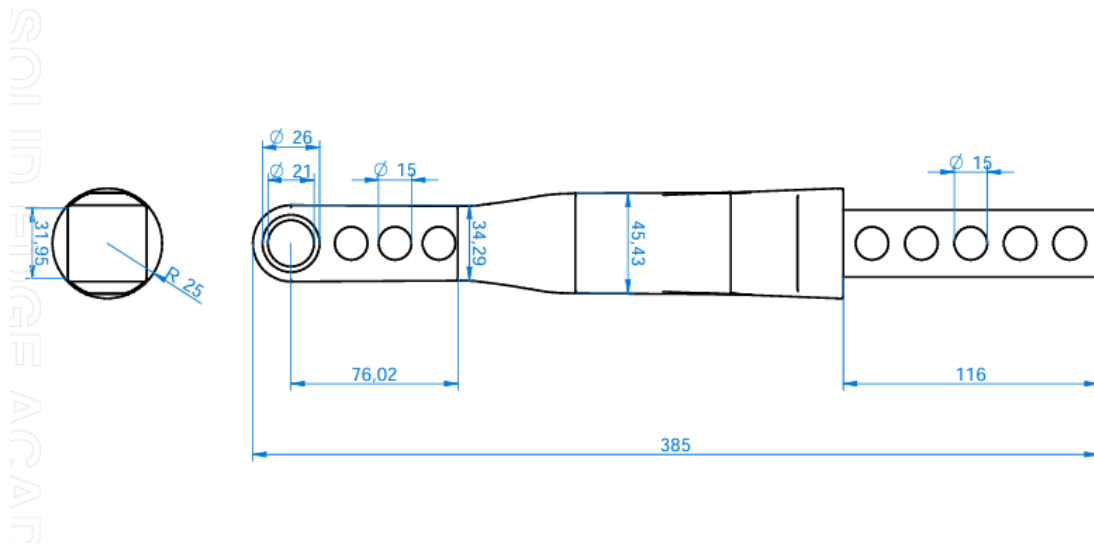


Figura 31: Extracto del plano de la palanca a optimizar.

Fuente Propia

Para los cálculos, se considera la fuerza del actuador de la palanca en una de las caras de la zona de agarre y se ha seleccionado la segunda posición (orificio) para la conexión de la biela al balancín. Se va a utilizar una barra equivalente con los siguientes datos:

Longitud: $L=385$ mm

Masa: $M=0,756$ kg

Distancia pivote-agarre: $L1=314$ mm

Distancia pivote-orificio: $L2=38$ mm

1. Fuerza aplicada por el usuario en el agarre (Fagarre):

Se considera que el operador ejerce una fuerza de 150 N de forma distribuida sobre una de las caras del agarre superior de la palanca. Esta fuerza se considera uniforme, y su resultante se aplica en el centro de dicha cara, a una distancia: $L=314$ mm.

2. Momento de inercia de la palanca:

Se modela la palanca como una barra homogénea de masa $m=0,756$ y longitud $L=0,385$ m girando alrededor de un extremo. El momento de inercia respecto al pivote se calcula como:

$$I = \frac{1}{3} * M * L^2 = \frac{1}{3} * 0,765 * (0,385)^2 = 0,03735 \text{ kg} * \text{m}^2$$

3. Aceleración angular (α):

Para estimar el valor de aceleración angular, se parte de una suposición de uso en entorno competitivo, donde el operador realiza un giro de aproximadamente 30° ($0,5236$ rad) en un tiempo de 0,1 segundos. Asumiendo aceleración constante:

$$\theta = \frac{1}{2} * \alpha * t^2 \rightarrow \alpha = \frac{2\theta}{t^2} = 104,72 \text{ rad/s}^2$$

4. Momento total generado en el pivote:

La fuerza aplicada genera un momento respecto al eje de rotación (pivote de la palanca). Dicho momento se calcula como:

$$M_{total} = F_{agarre} * L1 = 150 * 0,314 = 47,1 \text{ N} * \text{m}$$

5. Momento inercial:

Momento generado por la inercia de la palanca durante su aceleración:

$$M_{inercial} = I * \alpha = 0,03735 * 104,72 = 3,91 \text{ N} * \text{m}$$

6. Momento efectivo transmitido al sistema de varillaje:

Restando el momento inercial al total aplicado, se obtiene el momento efectivo que debe ser compensado por la fuerza transmitida al sistema de cambio:

$$M_{efectivo} = M_{total} - M_{inercial} = 43,19 \text{ N} \cdot m$$

7. Fuerza equivalente en los orificios de conexión de la biela:

El momento debe ser compensado a través de los orificios ubicados a 38 mm del pivote:

$$L_2 = 0,038 \text{ m}$$

$$F_{orificio} = \frac{M_{efectivo}}{L_2} = 1136,58 \text{ N}$$

(Nota: En cálculos posteriores se ajustó este valor a 1154,07 N como carga de diseño para mayor seguridad estructural. Al resolver la ecuación del equilibrio dinámico, proyectando la fuerza en el orificio con un ángulo de 10°, se obtiene un valor de $F_{orificio}=1154,07\text{N}$)

8. Descomposición de la fuerza en el orificio:

La fuerza en los orificios se aplica con una inclinación de 10° respecto a la horizontal, por lo que se descompone en los ejes horizontal (X) y vertical (Z):

$$F_x = F_{orificio} \cdot \cos(10^\circ) = 1154,07 \cdot \cos(10^\circ) = 1136,54 \text{ N}$$

$$F_z = F_{orificio} \cdot \sin(10^\circ) = 1154,07 \cdot \sin(10^\circ) = 200,40 \text{ N}$$

En cuanto a las condiciones de contorno, se fijó el punto pivote de la articulación de la palanca y mediante simulaciones con el Método de los Elementos Finitos y el módulo de Diseño Generativo, se procede con el método iterativo mediante estudios estáticos.

El objetivo consiste en conseguir reducir al máximo la masa del componente, conservando la geometría crítica para su funcionamiento y evitando que se supere el límite elástico del material, para que no se rompa.

Capítulo 4. DESARROLLO DEL TRABAJO

En este capítulo se describe paso a paso el flujo de trabajo aplicado para transformar el modelo CAD original en una palanca optimizada y lista para su fabricación aditiva. Partiendo de la geometría base, se incorporan progresivamente las propiedades del material, las condiciones de carga y restricciones, y se valida la respuesta estructural mediante simulaciones de elementos finitos. A continuación, se emplea diseño generativo para reducir masa manteniendo sin comprometer su rigidez, y el resultado se refina geométricamente para garantizar una superficie continua y apta para impresión 3D. Finalmente, se realiza una comprobación FEM con el diseño definitivo, asegurando un factor de seguridad adecuado antes de pasar al prototipado físico. Este enfoque iterativo asegura que cada fase aporte un control de calidad y una mejora tangible al producto final.

4.1 *MODELADO CAD*

Como se ha descrito previamente en el apartado 3.1. Definición de la geometría, se parte del conjunto de GrabCAD [1] para entender el funcionamiento del mecanismo, y diseñar la pieza a partir de éste.

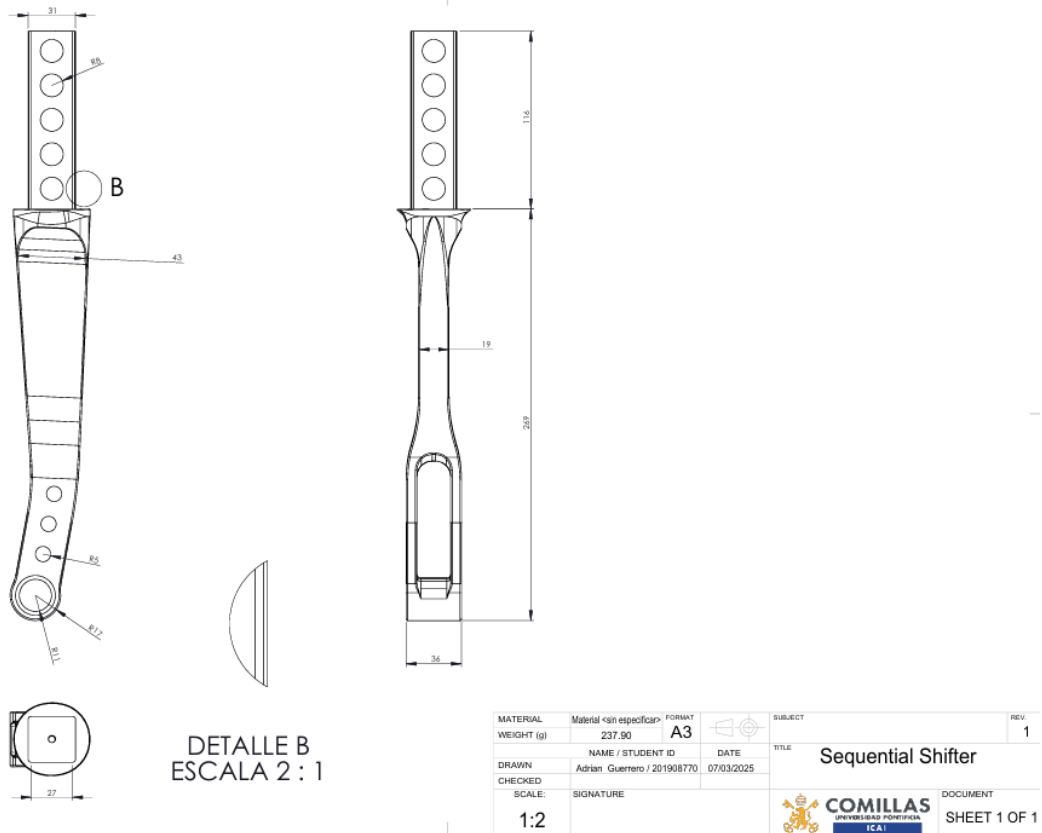


Figura 32: Planos de la pieza de GrabCAD.

Fuente propia

Con las dimensiones aproximadas de la pieza importada, se comienza a modelar:

En el plano XY, partiendo de la parte superior de la palanca, donde se encuentra el agarre, se empieza a generar la geometría generando bocetos con las dimensiones mencionadas y realizando operaciones de extrusión y vaciado. En las siguientes imágenes se ilustra el proceso de modelado seguido:

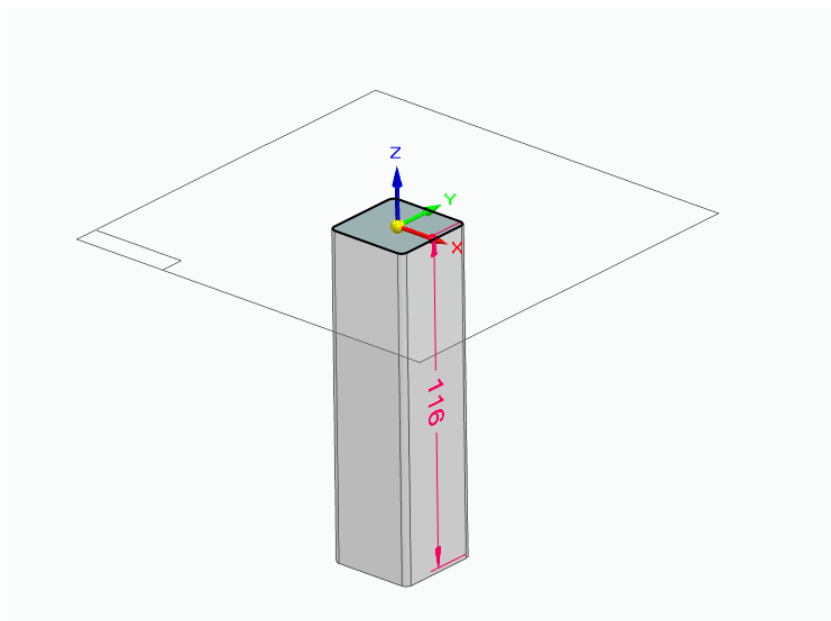


Figura 33: Operaciones de extrusión del agarre.

Fuente propia

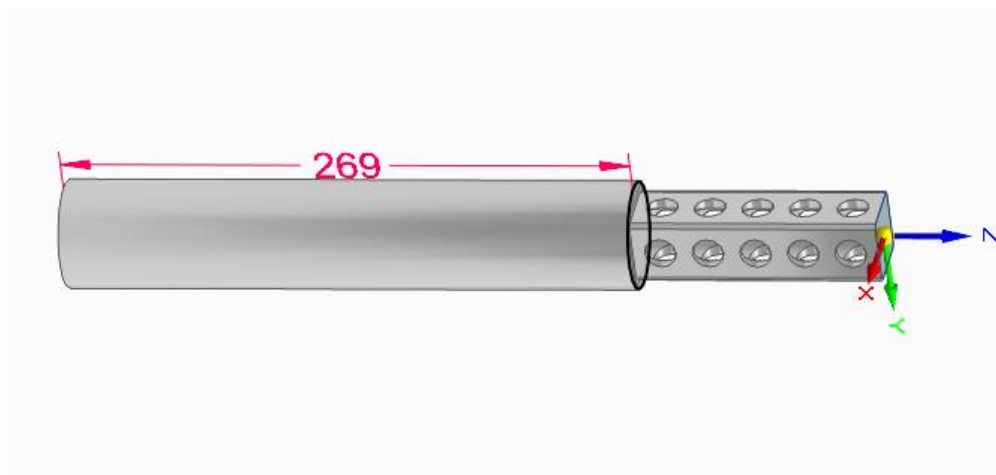


Figura 34: Operaciones de vaciado del agarre y extrusión del cuerpo principal.

Fuente propia

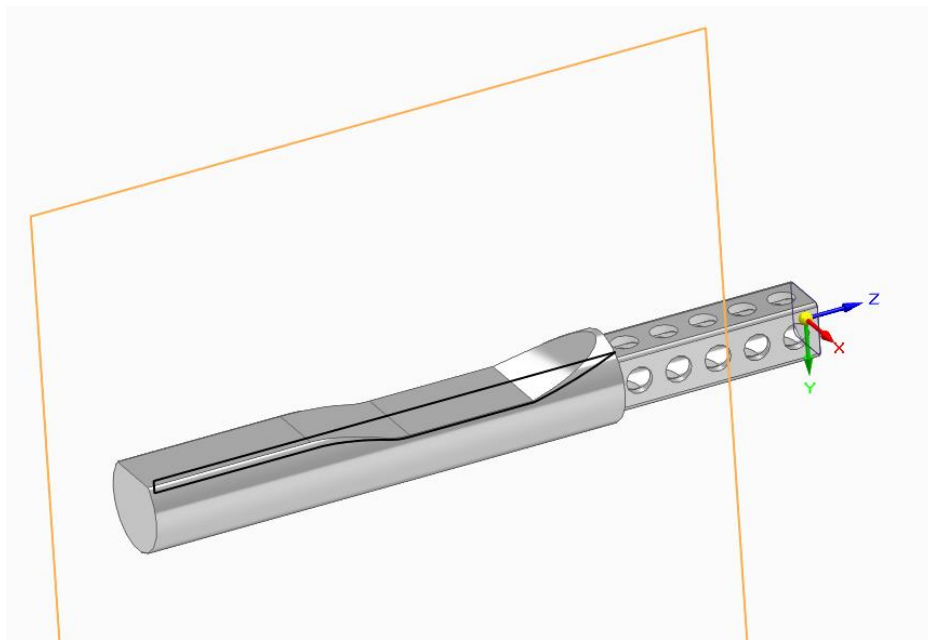


Figura 35: Vaciado del cuerpo principal.

Fuente propia

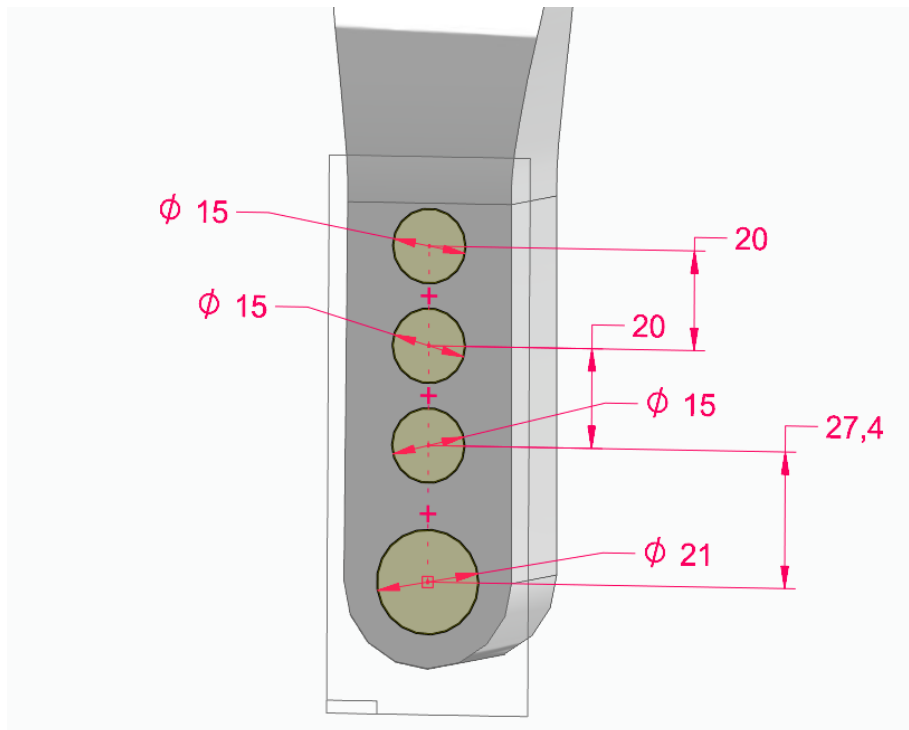


Figura 36: Modelado de los agujeros del pivote y las posiciones articuladas.

Fuente propia

Tras varias operaciones de modelado, se obtienen los siguientes resultados de la pieza con la geometría base:

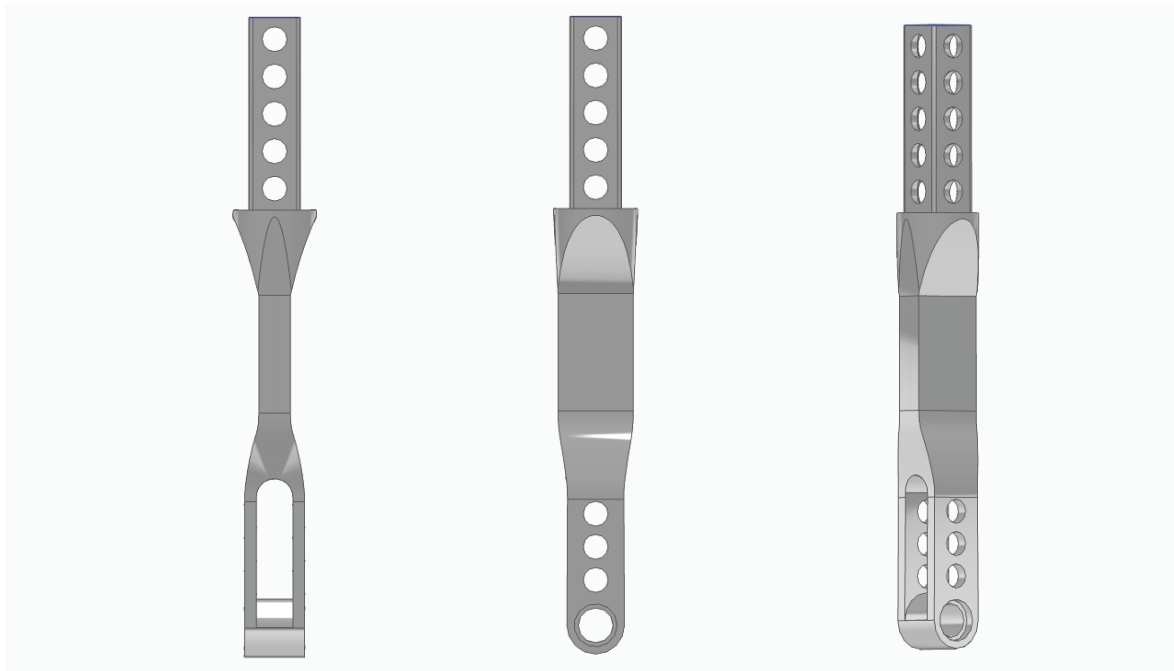


Figura 37: Resultados del modelado de la pieza.

Fuente propia

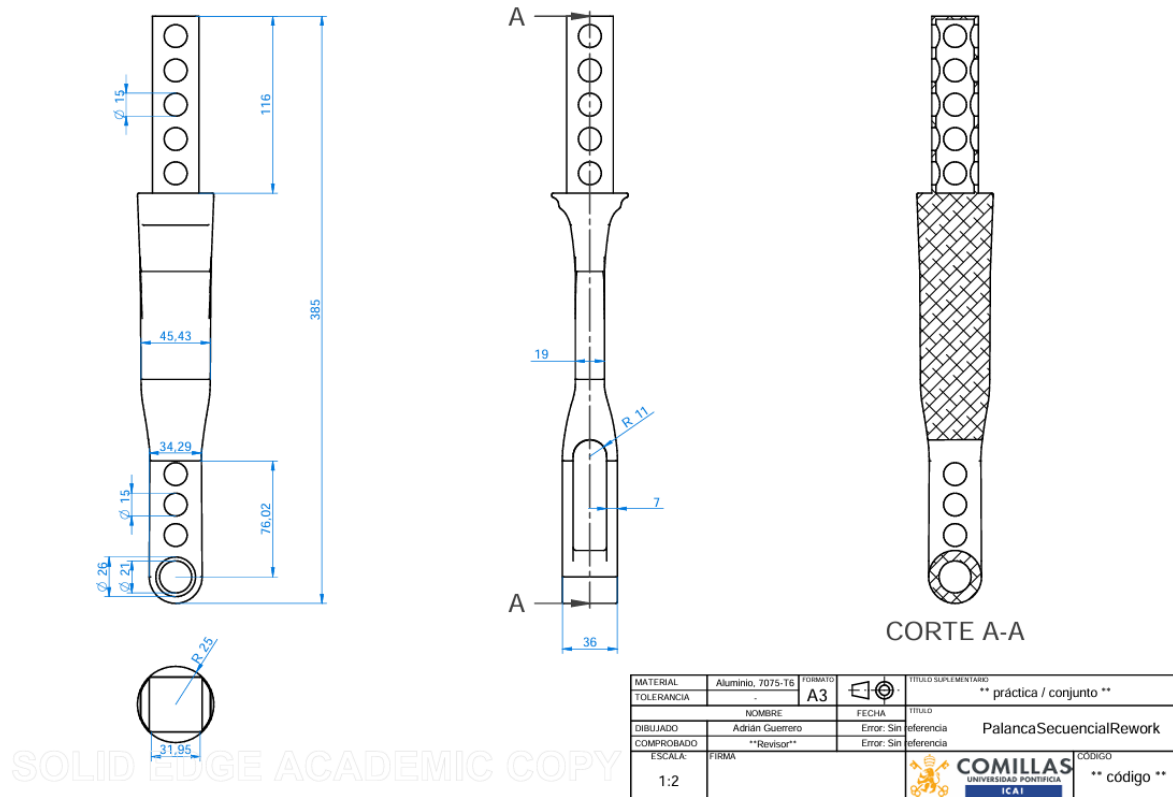


Figura 38: Planos de la pieza base.

Fuente propia

4.2 ASIGNACIÓN DE MATERIALES

En esta fase se importan al modelo, en el entorno de simulación, las propiedades propias de la aleación de Aluminio 7075-T6, de modo que cada elemento del mallado refleje con precisión el comportamiento real del material bajo carga. De esta forma, todas las iteraciones posteriores de simulación y optimización tendrán una base material rigurosa y fiable.

Mostrando propiedades de:

Estilo de cara

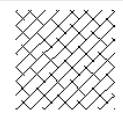
 Aluminio



Administrar estilos...

Estilo de relleno

ANSI38(Aluminio)



Administrar estilos...

Propiedades

Nombre de propiedad	Valor	Eliminar...	Editar ...
Densidad	2795,000 kg/m^3		
Coefficiente de expansión térmica	0,0000 /C		
Conductividad térmica	0,121 kW/m-C		
Calor específico	920,000 J/kg-C		
Módulo de elasticidad	71705,473 MPa		
Coefficiente de Poisson	0,330		
Límite elástico	503,317 MPa		
Tensión de rotura	572,265 MPa		
Elongación %	0,000		

Descripción

Definición de material = Aluminio, 7075-T6, Estilo de cara = Aluminio, Estilo de relleno = ANSI38(Aluminio)

Figura 39: Propiedades del Aluminio 7075-T6.

Fuente: Solid Edge 2024

4.3 ASIGNACIÓN DE CARGAS Y RESTRICCIONES

En este apartado se añaden al modelo CAD los esfuerzos reales, calculados en el apartado 3.3., a los que estará sometida la palanca y las condiciones de contorno que definen su comportamiento.

En primer lugar, se añade la fuerza de la gravedad en sentido descendente (negativo del eje Z).

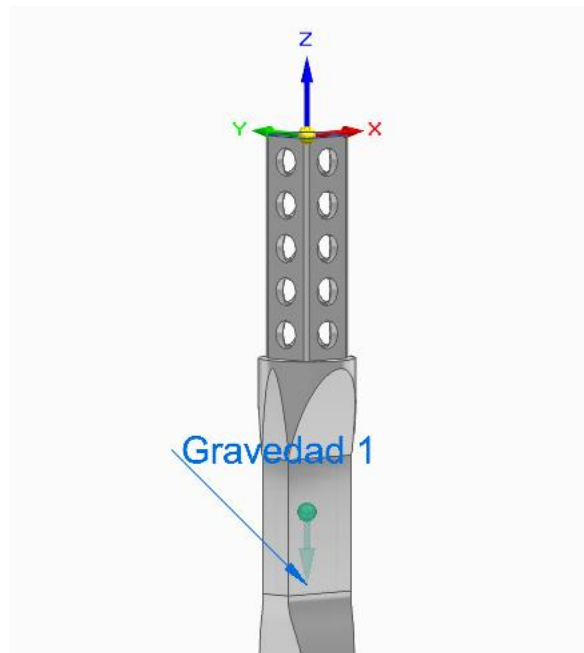


Figura 40: Adición de fuerza de gravedad al modelo.

Fuente propia

Seguidamente, se incluye la fuerza del operador, situada de manera distribuida en una de las caras de la zona de agarre, con un valor de 150N.

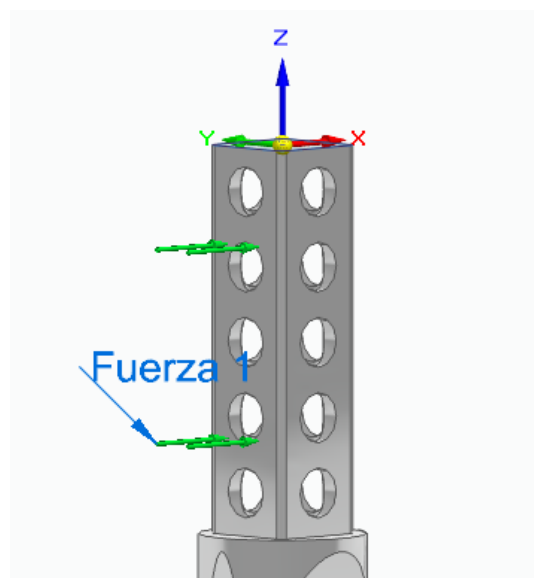


Figura 41: Adición de la fuerza del actuador sobre la palanca.

Fuente propia

A continuación, se incluye la fuerza transmitida mediante la biela de conexión, articulada en ambos orificios de la segunda posición, con una inclinación de 10° respecto a la horizontal. Los valores descompuestos en las componentes X, Y y Z son los siguientes, utilizando el sistema de referencia de las figuras: $F_x = -1136,54 \text{ N}$; $F_y = 0 \text{ N}$; $F_z = 200,4 \text{ N}$.

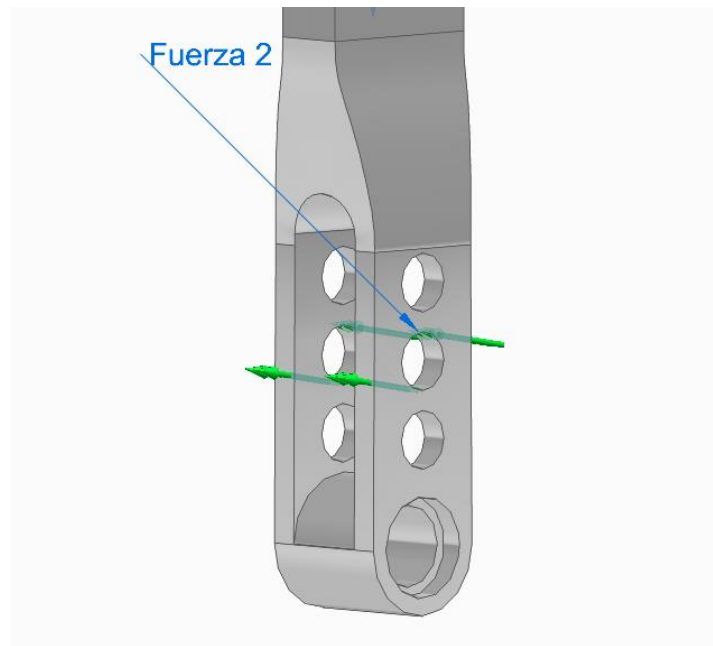


Figura 42: Adición de la fuerza comunicada a las articulaciones.

Fuente propia

Acto seguido, se fijan las translaciones en la zona del pivote para asegurar la convergencia de la simulación.

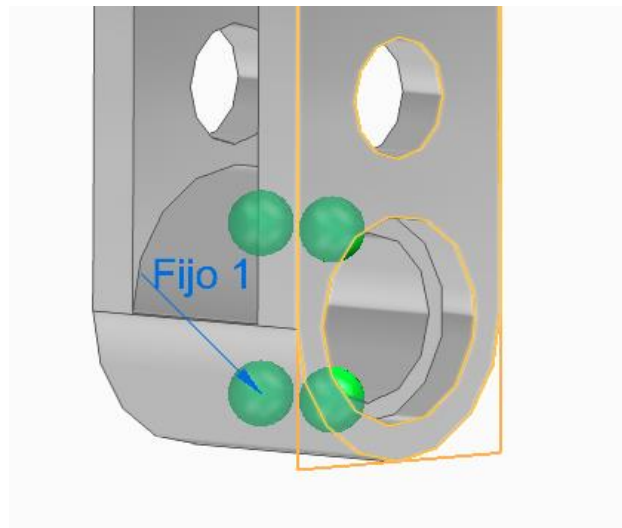


Figura 43: Adición de la restricción fija en la zona del pivote de la palanca.

Fuente propia

Finalmente, se realiza el mallado de la pieza. Para ello, se selecciona la opción de malla de cuerpo para mejorar la calidad de la malla mediante un mallado suave que atraviese las caras de cada cuerpo. Se elige un tamaño de malla lo suficientemente fino como para identificar las zonas con cambios bruscos de geometría (orificios, bordes, chaflanes o nervios) que generan concentraciones de esfuerzo.

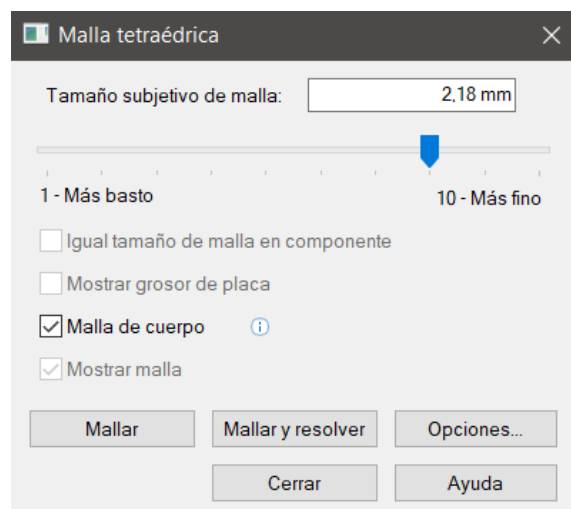


Figura 44: Configuración del mallado.

Fuente propia

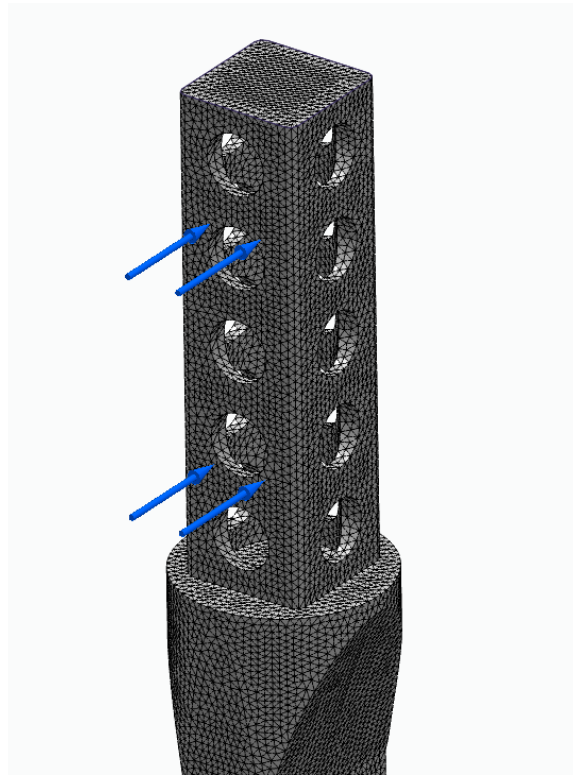


Figura 45: Mallado de la pieza.

Fuente propia

4.4 SIMULACIÓN FEM

Tras el modelado de la pieza original, se realiza un estudio estático de la palanca con las restricciones y cargas planteadas. El objetivo del estudio estático mediante FEM es evaluar el comportamiento estructural de la palanca de cambio secuencial bajo las condiciones de carga definidas. Esta simulación permite identificar la distribución de tensiones, los desplazamientos máximos y el factor de seguridad de la pieza en su configuración inicial, antes de ser optimizada.

Con este primer análisis, se verifica que el modelo base cumple con los requisitos de resistencia mecánica, y, al mismo tiempo, se establece una referencia sobre la cual se compararán las versiones optimizadas. A través de esta primera iteración se localizan zonas de baja exigencia estructural susceptibles de ser aligeradas, así como regiones críticas que deben conservarse durante la optimización topológica.

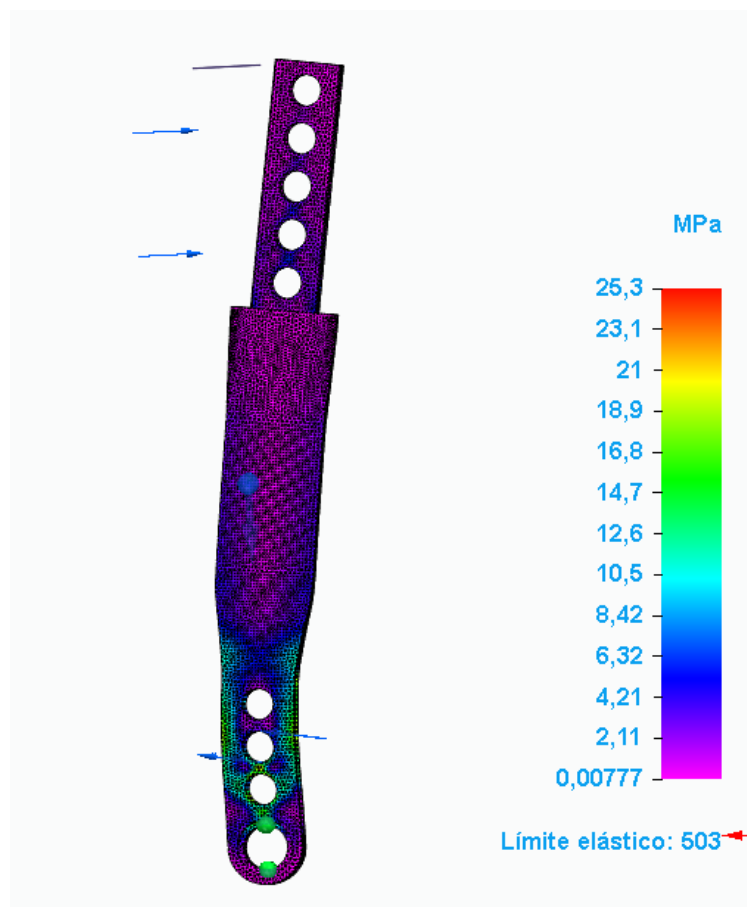


Figura 46: Simulación del estudio estático original.

Fuente propia

Se observa que el valor del esfuerzo máximo está localizado en la zona inferior de la palanca, cerca de las posiciones de articulación de la biela de conexión, con un valor de 25,3 MPa. El límite elástico del Aluminio 7075-T6 es de 503 MPa, por lo que se comprueba que la pieza sometida al estado de cargas, no rompería, ya que el valor de tensión máxima en la pieza está muy alejado de dicho límite.

4.5 OPTIMIZACIÓN CON DISEÑO GENERATIVO

El objetivo principal del proceso de diseño generativo es reducir al máximo la masa del componente manteniendo su funcionalidad mecánica, mediante la generación automática de geometrías optimizadas en función de las cargas, restricciones y zonas críticas definidas.

El diseño generativo parte de una envolvente volumétrica inicial y define únicamente las zonas que deben conservarse (preservadas), puntos de carga y apoyos, dirección del esfuerzo

principal y el porcentaje de reducción de masa deseado. El software emplea esta información para eliminar progresivamente material innecesario.

Seguidamente, una vez comprobado que tras el estado de cargas calculado no se supera el límite elástico del material en la pieza original, se procede con la optimización topológica de la pieza. Mediante el módulo de diseño generativo de Solid Edge, se comienza el proceso iterativo. Tras una primera generación del modelo optimizado, se analizan los resultados, se ajustan parámetros o restricciones si es necesario, y se vuelve a lanzar el proceso. En este proyecto, se han realizado varias iteraciones hasta obtener una geometría que logra una reducción significativa de masa. Aproximadamente se logra un 50 % de reducción respecto al modelo original, preservando la rigidez y las condiciones de ensamblaje del conjunto.

4.5.1 PRESERVAR REGIONES

En primer lugar, desde el módulo de diseño generativo, se crea un nuevo estudio, escogiendo el material y el espacio de diseño. Es necesario identificar las regiones funcionales de la pieza que debían conservarse inalteradas. Estas zonas incluyen:

- Los orificios de unión con la biela, por donde se transmite la carga de accionamiento.
- La zona de apoyo con la base donde se articula la palanca (punto pivote).
- El área superior de agarre, necesaria para el accionamiento manual o mecánico.

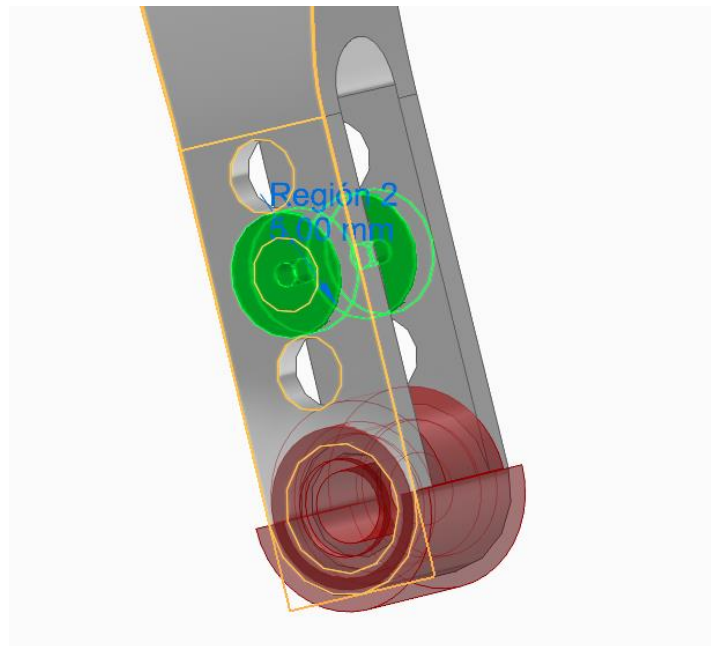


Figura 47: Proceso de selección de regiones de la pieza a preservar.

Fuente propia



Figura 48: Regiones a preservar (en color rojo).

Fuente propia

4.5.2 ADICIÓN DE CARGAS Y RESTRICCIONES

Para mantener la coherencia con los análisis previos, se replicaron las condiciones de carga y contorno utilizadas en la primera simulación FEM:

- Aplicación de una fuerza vertical de 150 N en la parte superior de la palanca (zona de agarre).
- Fuerza simulada en los orificios de conexión con la biela, replicando la reacción generada por el balancín.
- Restricción fija en la zona de articulación con la base.

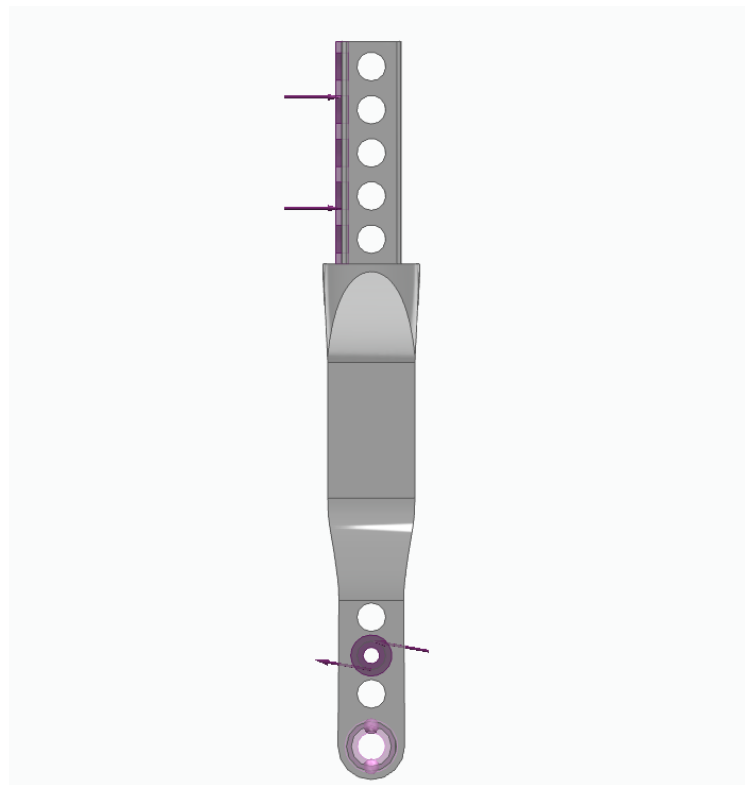


Figura 49: Estado de cargas para el diseño generativo.

Fuente propia

4.5.3 AJUSTES DE FABRICACIÓN

Para que la geometría resultante sea válida para los estados de carga asociados al accionamiento de la palanca en la subida y la bajada de marcha, simulando únicamente un

estado de cargas, se establece una simetría situada en el plano YZ. Mediante este ajuste de fabricación, nos aseguramos de que los esfuerzos ejercidos sobre la palanca en ambas configuraciones no superen el límite elástico del material y no rompa.

4.5.4 PROCESO ITERATIVO

Una vez definidas las condiciones de contorno, zonas preservadas y restricciones de fabricación, se ejecuta el proceso de diseño generativo. Se realizaron múltiples iteraciones, ajustando los siguientes parámetros:

- Objetivo de reducción de masa: se comenzaron con reducciones del 20 %, alcanzando hasta el 50 % en los últimos ciclos.
- Calidad del estudio: uniformidad del mallado y suavidad de la forma generada para evitar discontinuidades no deseadas.

1ª ITERACIÓN:

En la primera iteración se genera un estudio con una reducción de la masa frente a la pieza original de un 20%. Se establece la calidad del estudio en 10.

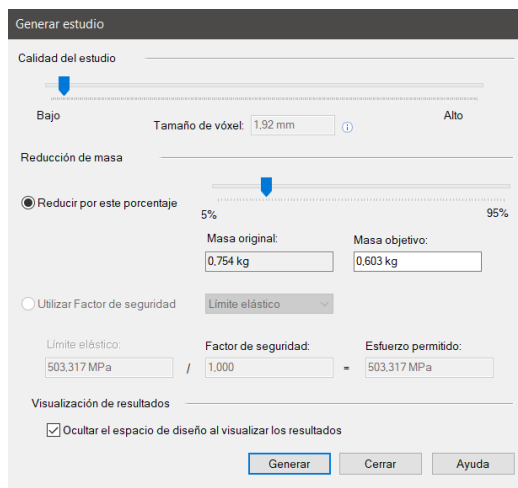


Figura 50: Configuración del estudio de diseño generativo de la 1ª iteración.

Fuente propia

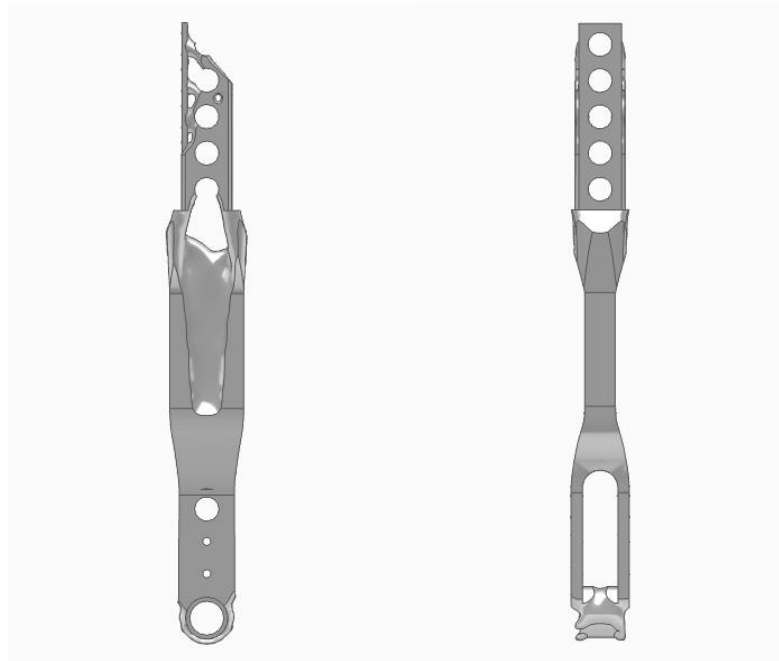


Figura 51: Resultados erróneos de la 1ª iteración.

Fuente propia

Como se observa en la Figura 43, las regiones críticas no se han llegado a preservar bien, ya que los orificios de conexión han cambiado su geometría, además de faltar material en la zona del agarre. Esto es importante, ya que la geometría debe ser capaz de servir de apoyo para posteriormente colocar el mango sobre el agarre y poder conectar la pieza con el resto del mecanismo de manera efectiva. Además, el resultado presenta una asimetría muy clara en el plano YZ, por lo que se descarta y se procede a realizar una segunda iteración, cambiando los parámetros de optimización.

2ª ITERACIÓN

En esta iteración, se incrementó la calidad del estudio a 20, para tratar de conservar todas las geometrías críticas. También se incrementó el porcentaje de reducción de masa en un 30%.

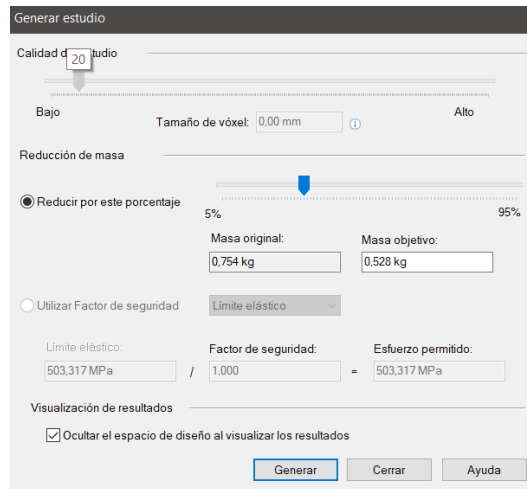


Figura 52: Configuración del estudio de diseño generativo de la 2ª iteración.

Fuente propia

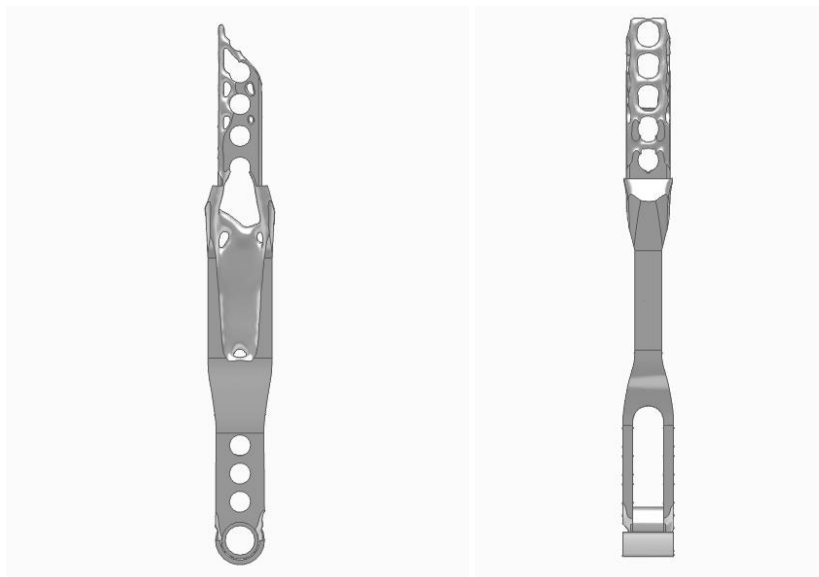


Figura 53: Resultados erróneos de la 2ª iteración.

Fuente propia

Como se observa en la figura 45, se ha logrado preservar la zona inferior de la palanca (los orificios de conexión y la articulación principal o punto pivote), pero la parte superior de agarre no ha logrado preservarse bien, además de seguir presentando una asimetría muy apreciable. Con el nuevo porcentaje de reducción de masa se comienza a apreciar la geometría de la zona media optimizada.

En estas dos primeras iteraciones, no se ha comprobado la simulación FEM, ya que la geometría no cumplía con los requisitos críticos para su montaje y funcionamiento.

3º ITERACIÓN

Para esta iteración, se mantuvo la calidad del estudio de la anterior, incrementando el porcentaje de reducción de masa al 40%. Se obtuvieron los siguientes resultados:

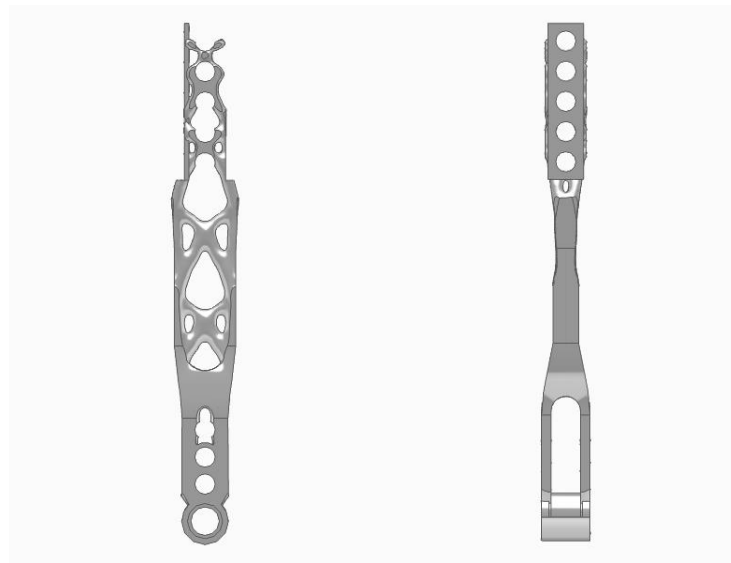


Figura 54: Resultados de la 3ª iteración.

Fuente propia

En este momento del proceso iterativo, ya se observa una geometría que se asimila mucho al resultado final. Se puede apreciar simetría en la zona inferior y media de la pieza, se han conservado las regiones críticas de articulación (al menos la segunda y tercera posición de conexión y toda la zona del pivote). Únicamente no se ha preservado parte del agarre, pero se considera la posibilidad de modelar la pieza del mango para ajustarse a la geometría generada.

Se procede con la simulación FEM:

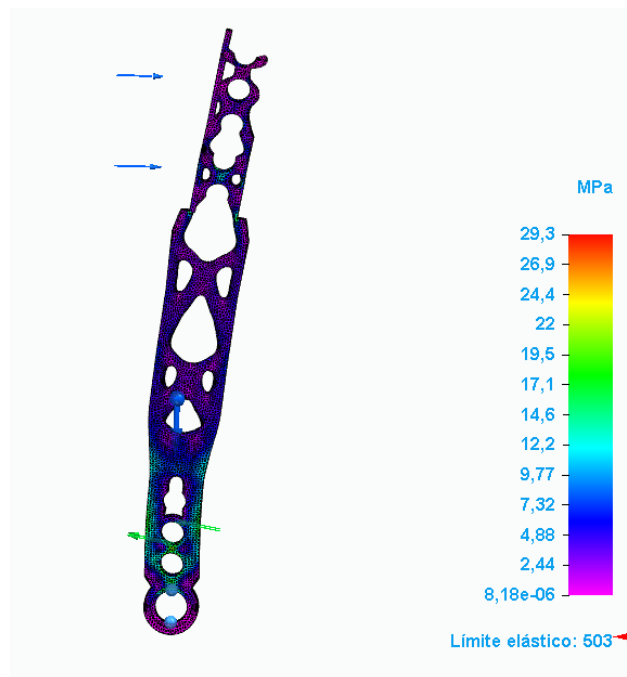


Figura 55: Resultados de simulación de la 3ª Iteración.

Fuente propia

Se comprueba, como se puede apreciar en la Figura 47, que el valor de la máxima tensión es mucho menor que el límite elástico del material, por lo que se continúa iterando, reduciendo masa hasta llegar a una solución óptima.

4ª ITERACIÓN

En esta iteración se mantiene el porcentaje de reducción en un 40%, y se cambia la calidad del estudio a 30. Con esta configuración, se obtienen los siguientes resultados:

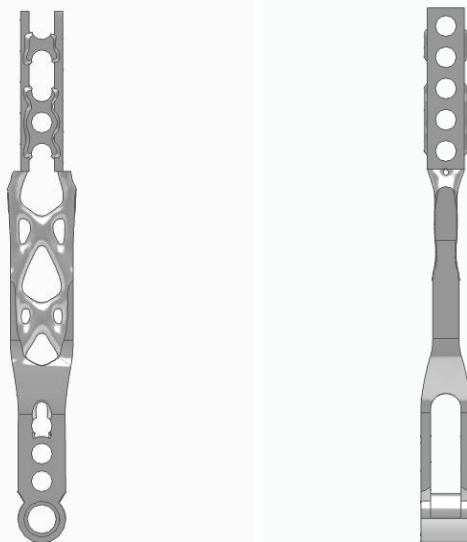


Figura 56: Resultados de la 4ª Iteración.

Fuente propia

En esta iteración, ya se observa una simetría casi perfecta respecto al plano YZ. Se han preservado exitosamente las regiones críticas, con la excepción del orificio correspondiente a la primera posición. La zona del agarre ya contiene suficiente material como para respetar la funcionalidad de la palanca en ambos casos de carga (subida y bajada de marcha).

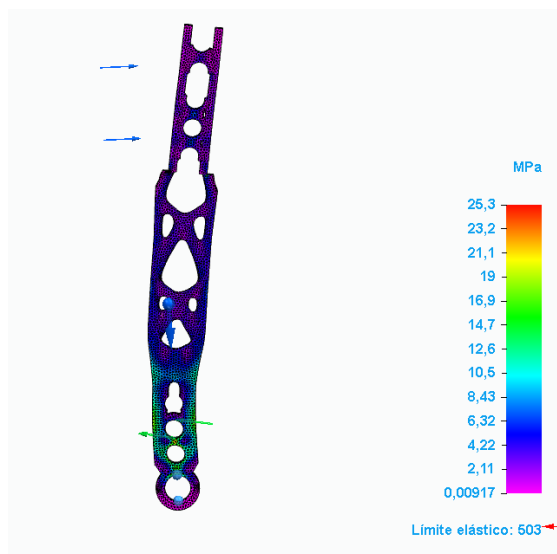


Figura 57: Resultados de simulación de la 4ª Iteración.

Fuente propia

Se comprueba, de nuevo, como se muestra en la Figura 48, que el valor de la máxima tensión es mucho menor que el límite elástico del material, por lo que se continúa iterando, reduciendo masa hasta llegar a una solución óptima.

5ª ITERACIÓN

En la 5ª iteración, se mantiene la calidad del estudio a 25, y se aumenta el porcentaje de reducción de masa al 50%. Para esas condiciones, se obtienen los resultados siguientes:

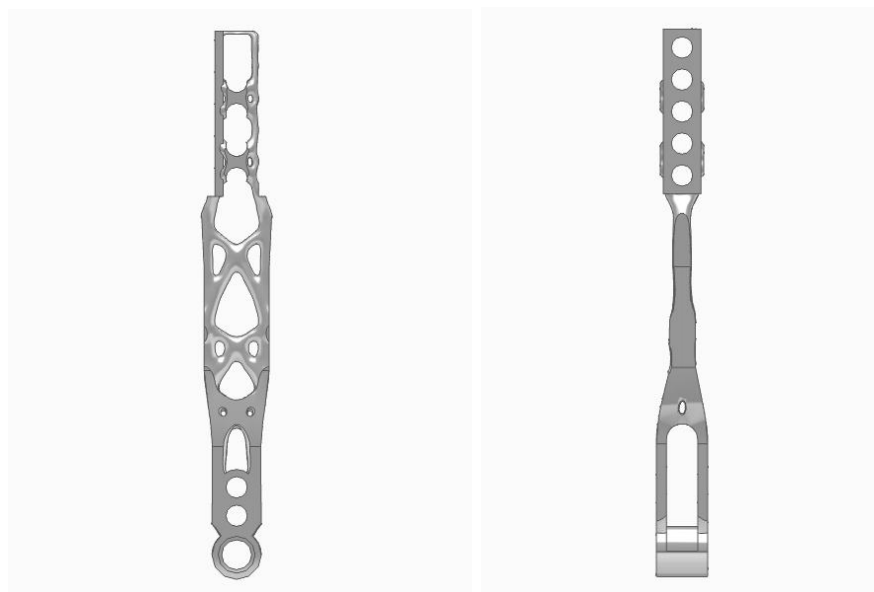


Figura 58: Resultados de la 4ª Iteración.

Fuente propia

Observando la Figura 50, se comprueba que la geometría crítica de las articulaciones se ha preservado correctamente, pero no la del agarre, ya que no presenta la simetría requerida.

Tras un intento fallido de mallar la pieza generada para la comprobación mediante FEM, se procede a reiterar.

6ª ITERACIÓN

Tras varios intentos y configuraciones distintas sin éxito, finalmente se toman los parámetros siguientes:

- Porcentaje de reducción de masa respecto a la pieza original: 50%
- Calidad del estudio: 30.

Con esta configuración, se obtienen los siguientes resultados, observados en la figura 51:

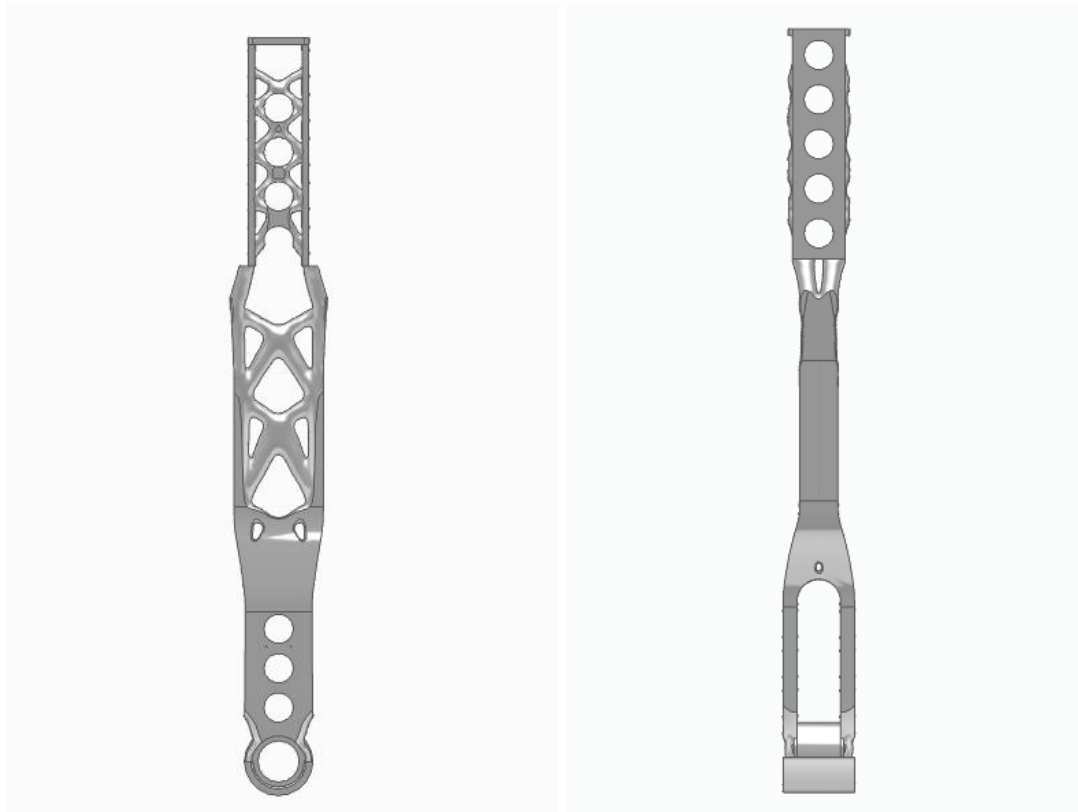


Figura 59: Resultados de la 6ª Iteración. Fin del proceso iterativo.

Fuente propia

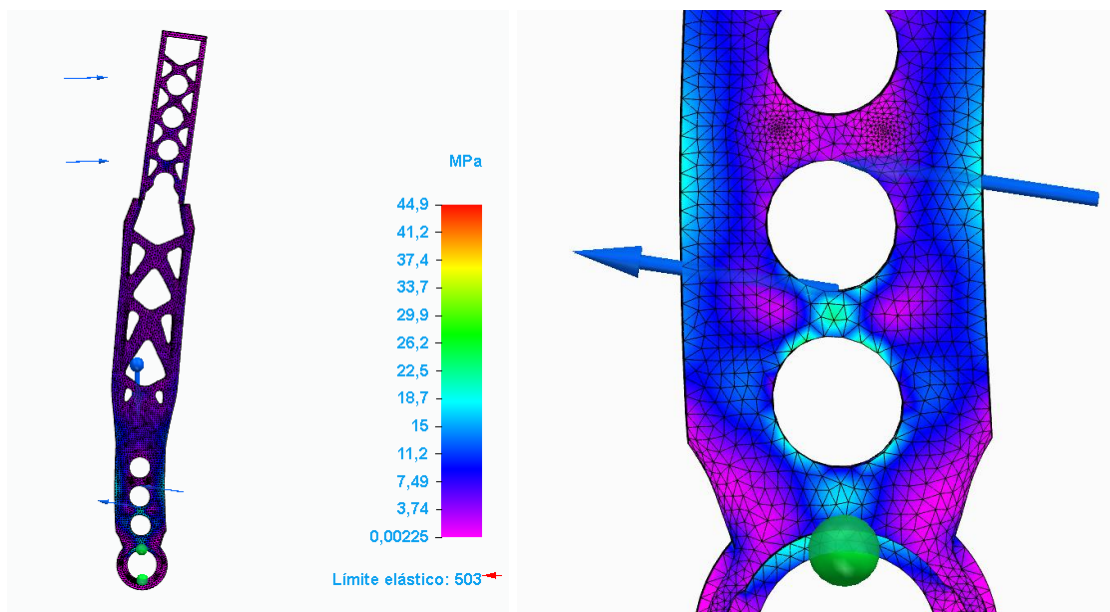


Figura 60: Resultados de simulación de la 6ª Iteración.

Fuente propia

Finalmente, se llega a la pieza optimizada definitiva. Como se observa en la Figura 51, existe una simetría perfecta respecto al plano YZ, y se ha preservado de forma efectiva toda la geometría crítica, necesaria para el posterior montaje y funcionamiento del conjunto mecánico. La masa se ha reducido en un 54%, partiendo de la pieza original, con una masa de 0,753 kg, y con una masa final de la pieza optimizada de 0,349 kg.

En la Figura 52, se observa que la concentración máxima de tensiones se da en la zona de las articulaciones, cerca de los orificios de conexión con el resto del mecanismo. El valor de la tensión máxima es de 44,9 MPa, que es mucho menor que el límite elástico del material, por lo que se confirma que el modelo optimizado es válido y está listo para el suavizado de su geometría.

4.6 REFINAMIENTO DE LA GEOMETRÍA

Tras la obtención del modelo optimizado mediante diseño generativo, la geometría resultante presenta una superficie con discontinuidades, propia del mallado generado automáticamente por el software. Aunque la distribución de material es estructuralmente válida, este tipo de

geometrías no es directamente imprimible ni adecuado para su fabricación con garantías funcionales. Por tanto, es necesario un proceso de refinamiento que transforme la malla en una geometría continua, suave y funcional, preservando la topología estructural.

Para ello se emplea el software Altair Inspire, utilizando la herramienta PolyNURBS, que permite reconstruir de forma interactiva superficies suaves sobre la malla generativa. El proceso de refinamiento se ha llevado a cabo siguiendo los siguientes pasos:

- Importación del modelo STL generado tras la optimización topológica, y del modelo original



Figura 61: Modelos STL importados a Altair.

Fuente propia

- Creación de una superficie suavizada o PolyNURB de la pieza optimizada.

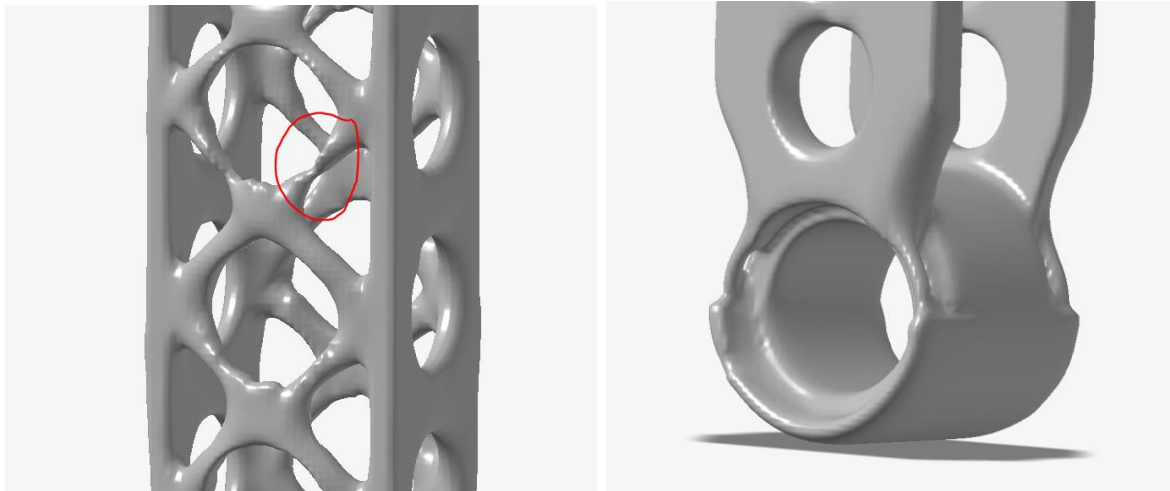


Figura 62: Vistas detalladas de los defectos generados tras la creación de la PolyNURBS.

Fuente propia

En la Figura 54, se puede apreciar la geometría de la geometría tras el suavizado mediante la función “Ajustar” de Altair Inspire. Tras varias pruebas en este módulo y cambiando los parámetros, finalmente se consigue una superficie cerrada. También se resalta en la imagen parte de la geometría que no ha logrado generarse correctamente y puede suponer un problema para la impresión posterior.

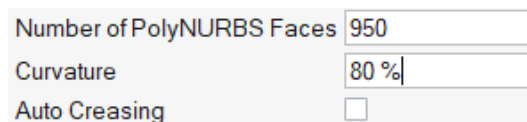


Figura 63: Configuración del ajuste mediante PolyNURBS.

Fuente propia

- Ajuste de bordes, superficies y continuidad en las zonas críticas.

Mediante la herramienta “Reparar” en la sección de PolyNURBS, se puede cerrar parte de la geometría que, tras el ajuste, ha quedado abierta.

- Aplicación de operaciones booleanas para conservar los elementos que permiten la interacción con el conjunto mecánico: orificios de la biela, zonas de pivote y superficie de agarre.

Se ha observado que parte de la geometría suavizada ha sido modificada respecto al modelo optimizado exportado de Solid Edge. Por este motivo se ha decidido realizar una serie de operaciones booleanas para asegurarse de que la pieza conserva todas sus regiones críticas.

En primer lugar, se divide la pieza optimizada mediante bosquejos, para extruir material y, con una posterior operación booleana entre dichos cuerpos, mantener únicamente la zona central.

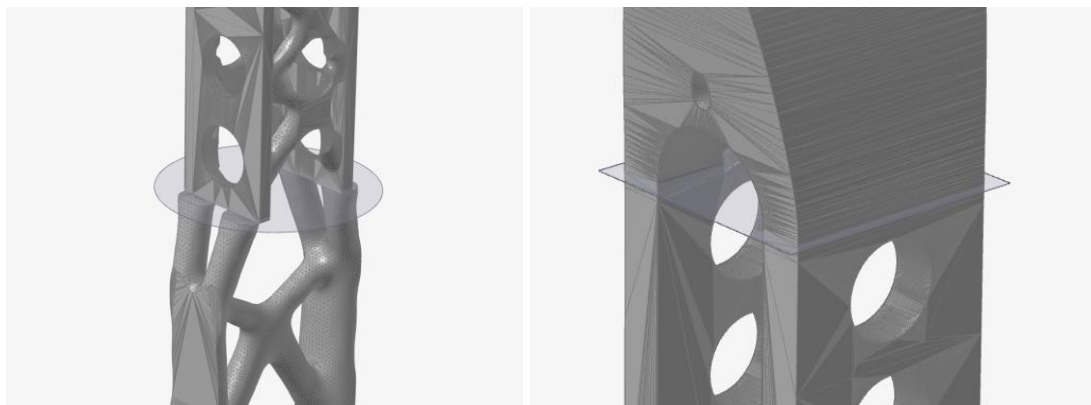


Figura 64: Creación de bosquejos para seccionar la pieza optimizada

Luego, se hace la misma operación con la palanca sin optimizar, manteniendo las regiones del agarre y la zona inferior.

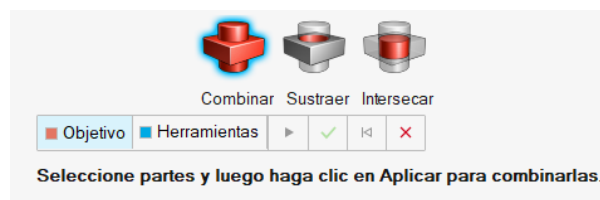


Figura 65: Herramienta de adición y sustracción booleana.

Fuente propia

Finalmente, se obtiene la geometría definitiva. El resultado de este proceso es una pieza refinada geométricamente, con una superficie continua y apta tanto para impresión 3D como para simulación FEM final.



Figura 66: Modelo definitivo refinado.

Fuente propia

4.7 COMPROBACIÓN FEM FINAL

En el siguiente apartado se presenta la validación estructural del modelo suavizado mediante simulación FEM, con el fin de confirmar que el rediseño no supera el límite elástico del material.

Según las propiedades de la pieza generada, indicado en Altair, la palanca final con la geometría refinada tiene una masa de 0,396 kg, ligeramente mayor a la pieza optimizada importada desde Solid Edge (0,345 kg). Por tanto, como la pieza refinada tiene un volumen algo mayor que la optimizada, podemos realizar la hipótesis de que no se va a superar el límite elástico. Además, se debe tener en cuenta que hay mucha diferencia entre la tensión máxima que presenta la palanca optimizada frente al estado de cargas empleado y su límite elástico.

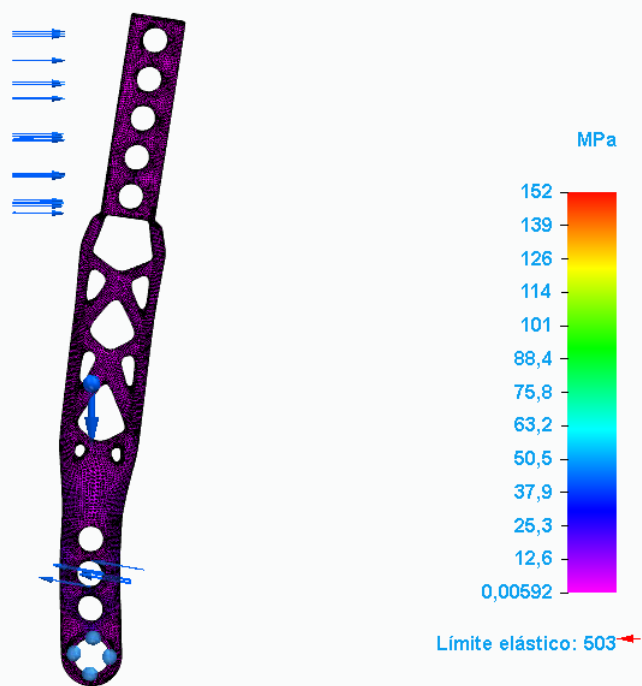


Figura 67: Comprobación FEM final.

Fuente propia

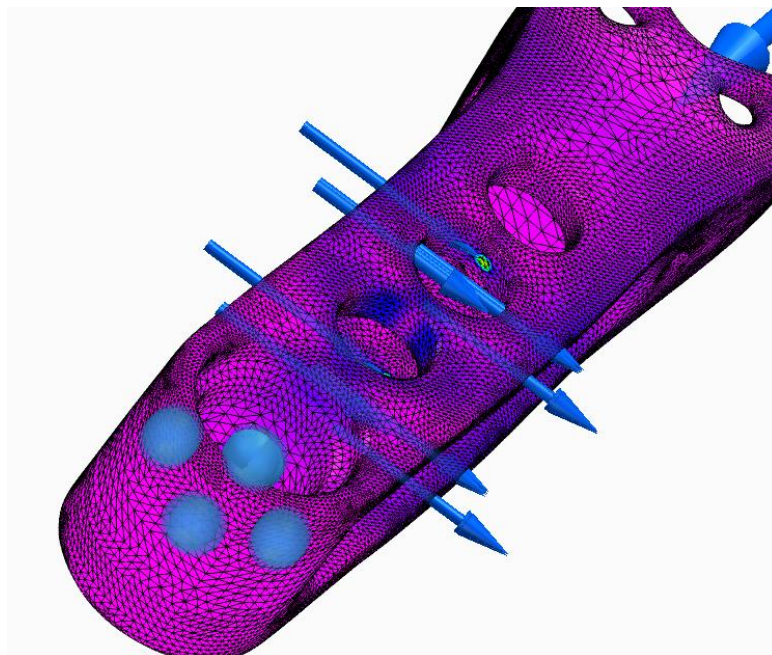


Figura 68: Zona de máxima concentración de tensiones. Fuente propia

Tras un mallado con tamaño de malla de 15, se puede observar en las Figuras 59 y 60 cómo no se supera el límite elástico del Aluminio 7075-T6, confirmando que la pieza final no rompería.

Capítulo 5. PROTOTIPADO FINAL MEDIANTE FA

Esta última fase del proyecto, consistió en la fabricación de la palanca de cambio secuencial optimizada, creando un componente funcional. Para ello, se utilizó una tecnología de fabricación aditiva de lecho de polvo y material polimérico, seleccionada por su capacidad para reproducir geometrías complejas con buena precisión y resistencia mecánica. El proceso se aplicó tanto al modelo original como al diseño optimizado, permitiendo comparar directamente las diferencias de masa, coste y otros parámetros de fabricación entre ambas versiones.

La fabricación aditiva es el proceso de unión de materiales para fabricar piezas u objetos a partir de datos de modelos 3D, generalmente capa a capa, en oposición a métodos de fabricación mediante eliminación de material y conformado [14]. Permite materializar directamente las geometrías optimizadas generadas mediante diseño generativo, especialmente aquellas que no serían viables mediante procesos tradicionales de fabricación. En este apartado se describe el proceso completo de producción del prototipo optimizado, y del original, desde la elección de la tecnología hasta la validación del modelo físico impreso.

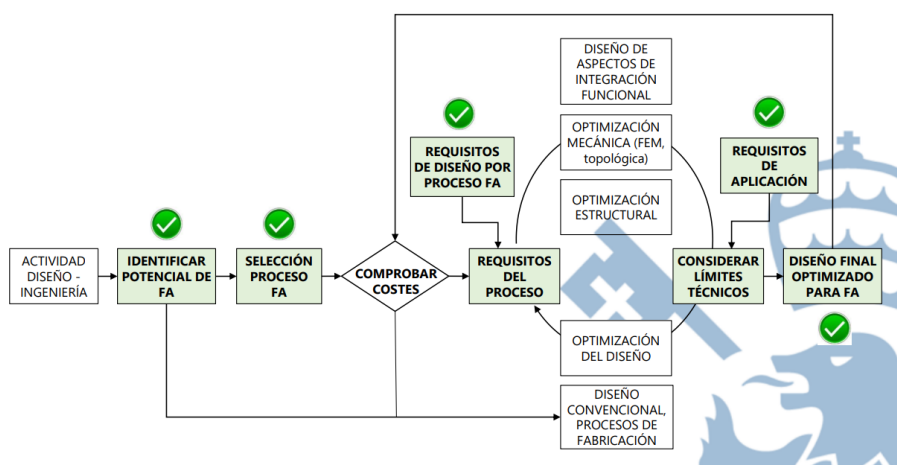


Figura 69: Flujo de trabajo para Fabricación Aditiva.

Fuente: Tema 7 – Fabricación Aditiva (2021) [11]

En el caso de este proyecto, se han seguido las etapas de la Figura 61 de forma coherente, desde la validación del potencial de rediseño mediante optimización topológica hasta la generación de una geometría fabricable en polvo de poliamida PA 12. La ruta final incluyó procesos de ajuste estructural, suavizado geométrico, selección de tecnología de impresión y validación funcional.

5.1 TECNOLOGÍAS DE IMPRESIÓN 3D

Las tecnologías existentes son las que se presentan en la siguiente figura:

UNE-EN ISO 17296 (2017)

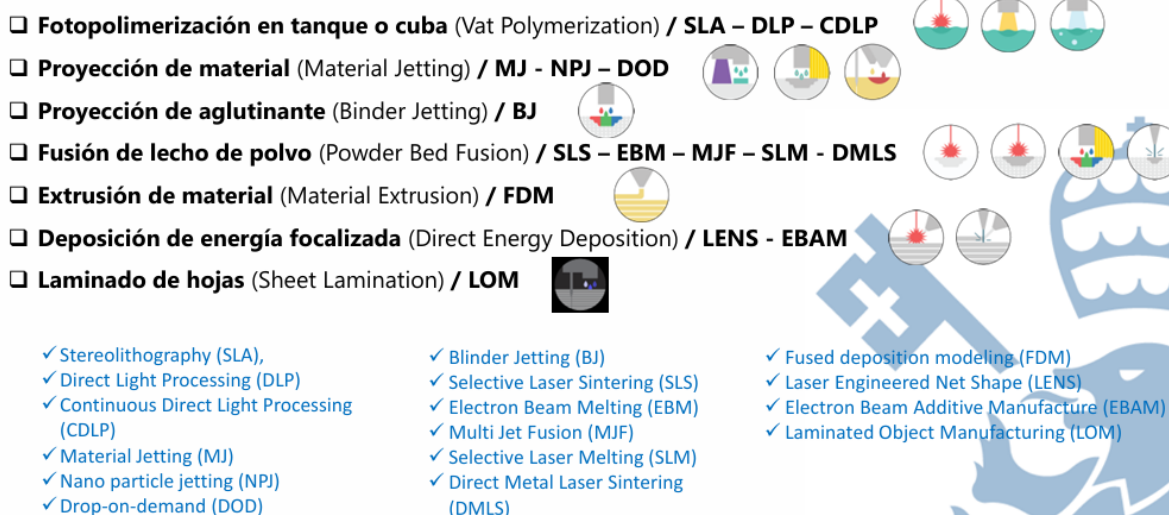


Figura 70: Tecnologías de impresión 3D.

Fuente: Tema 7 – Fabricación Aditiva (2021) [11]

En este proyecto se han utilizado dos tecnologías distintas, cada una aplicada a una versión diferente del modelo de la palanca de cambio secuencial: por un lado, Extrusión de material (FDM) para imprimir el modelo original, y por otro, Fusión de lecho de polvo (MJF) para la geometría optimizada refinada.

Fusión de lecho de polvo (Power Bed Fusion):

La tecnología Multi Jet Fusion (MJF), desarrollada por HP, se utiliza para la fusión de lecho de polvo. En este proceso, una capa de polvo del material utilizado (en este caso, PA 12) se

extiende sobre la superficie de trabajo. A continuación, un agente de fusión y un agente de detalle se aplican mediante inyectores en las zonas requeridas. Una fuente de energía calienta la superficie, provocando la fusión localizada del polvo en la zona donde se ha depositado el agente de fusión. El proceso se repite capa a capa hasta formar la pieza completa.

Las ventajas de usar esta tecnología incluyen:

- Alta resolución y precisión dimensional.
- Propiedades mecánicas superiores a otros procesos como FDM.
- No requiere estructuras de soporte, ya que el propio polvo actúa como soporte durante la fabricación.
- Gran productividad, adecuada para prototipado funcional y series cortas.

Extrusión de material (FDM)

La tecnología de extrusión de material, más conocida como Fused Deposition Modeling (FDM), es uno de los métodos más accesibles en la fabricación aditiva. El funcionamiento consiste en fundir un filamento termoplástico (en este caso PLA) y depositarlo capa a capa a través de una boquilla calefactora. Al enfriarse, el material se solidifica y se une a la capa anterior, construyendo progresivamente la pieza tridimensional.

FDM presenta ventajas como su bajo coste, facilidad de uso y rapidez de configuración, aunque también tiene limitaciones en cuanto a precisión, propiedades mecánicas y acabado superficial. Por estos motivos, se utilizó en este proyecto únicamente para fabricar el modelo original sin optimizar, cuya finalidad era la comparación física y visual con el modelo final.

5.2 METODOLOGÍA DE IMPRESIÓN



Figura 71: Proceso de trabajo de fabricación aditiva.

Fuente: Tema 7 – Fabricación Aditiva (2021) [11]

El proceso de fabricación de las piezas mediante impresión 3D se llevó a cabo siguiendo una metodología estructurada que abarca desde el diseño inicial hasta el postprocesado de la pieza final. La Figura 63 muestra las diferentes etapas del flujo de trabajo general para la fabricación aditiva, que se detallan a continuación:

1. Diseño – Modelo 3D (CAD)

El primer paso consistió en la generación del modelo de la palanca, utilizando el software Solid Edge. Tanto el modelo original como el diseño optimizado y suavizado se desarrollaron manteniendo las dimensiones funcionales y las restricciones geométricas necesarias para su posterior montaje y funcionamiento.

2. Fichero de intercambio (STL)

Una vez finalizado el diseño, el modelo se exportó a un formato compatible con el software de impresión. En este caso, se utilizó el formato *.STL, estándar en la mayoría de tecnologías de fabricación aditiva. Para exportar la pieza en ese formato, se seleccionó una tolerancia de cuerda de 0,01 y una tolerancia angular de 3°, para que la pieza tuviera un mallado correcto,

con un número de triángulos razonable. Este tipo de archivo representa la geometría mediante esa malla de triángulos, para que el sistema pueda interpretar correctamente los volúmenes. Hay que encontrar un valor adecuado de resolución para que el archivo pueda ser manejable por el programa y no sea un archivo demasiado pesado.



Figura 72: Selección del tipo de mallado de exportación en STL.

Fuente: Tema 7 – Fabricación Aditiva (2021) [11]

3. Software de impresión 3D

El archivo STL fue importado en el software de preparación de impresión. Para el modelo optimizado, se utilizó PreForm, que simula entornos de impresión por lecho de polvo como MJF. En él se definieron la orientación de la pieza, la posición en el volumen de fabricación, junto con los apoyos necesarios para la pieza impresa mediante FDM y se estimaron el consumo de material y el tiempo total de impresión.

4. Descomposición en capas (slicing)

La geometría se segmentó en una serie de capas horizontales, proceso conocido como “slicing”. Determina la resolución vertical y afecta directamente al acabado superficial y al tiempo de fabricación. Se adoptó un espesor de capa adecuado a cada tecnología: fino en MJF y más grueso en FDM.

5. Creación de capas y fabricación

Durante la impresión, el sistema construye la pieza capa a capa según la información generada durante el slicing. En el caso de FDM, el material se deposita de forma continua mediante extrusión de filamento. En el caso de MJF, cada capa de polvo se fusiona selectivamente mediante fusión y calor.

6. Post-procesado

Una vez completada la impresión, se procedió al post-procesado de ambas piezas. En FDM, se retiraron manualmente los soportes, y se alisaron las superficies. En MJF, el post-procesado consistió en el desempolvado y limpieza de la pieza, ya que no se requieren estructuras de soporte adicionales. Ambos modelos se sometieron a una inspección visual para verificar la calidad del resultado respecto al diseño CAD.

5.3 *IMPRESIÓN 3D Y POST PROCESADO*

En este apartado se presentan los resultados obtenidos tras la fabricación de ambos prototipos. Primero del modelo sin optimizar, fabricado en PLA utilizando tecnología FDM, simulado en Cura, y luego el modelo optimizado, impreso con tecnología HP MJF en PA12, simulado con SLS y PreForm. Se describen los parámetros de impresión, el proceso de postprocesado realizado y se comparan los resultados físicos de masa, calidad de superficie y fidelidad geométrica.

5.3.1 PROTOTIPO SIN OPTIMIZAR

En primer lugar, se simuló la impresión 3D de la palanca original en el software Cura Ultimaker. Se escaló la pieza a una escala 0,8 y se aplicaron los soportes necesarios para una buena calidad de impresión y un post-procesado sencillo. El material de impresión utilizado ha sido PLA, y la impresora usada para este fin Dynamical Tools DT600+, con tecnología FDM.

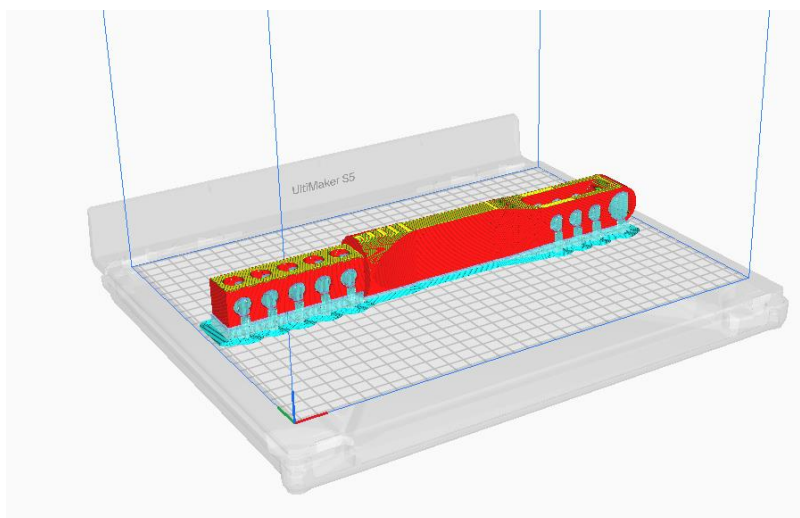


Figura 73: Simulación de impresión de la palanca original en Cura.

Fuente propia



Figura 74: Proceso de impresión en el laboratorio de la ETSI-ICAI.

Fuente propia

Tras la impresión en el laboratorio de ICAI, se obtiene un resumen de impresión proporcionado desde el software Simplify3D,

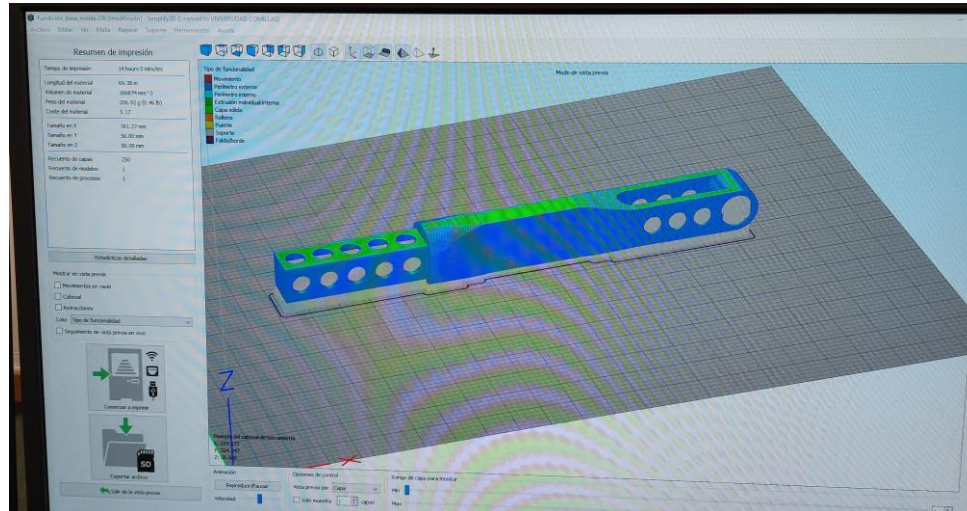


Figura 75: Configuración de la impresión real con Simplify3D.

Fuente propia

Parámetro	Valor
Tiempo de impresión	14 horas 0 minutos
Longitud del material	69,38 m
Volumen de material	166874 mm ³
Peso del material	206,92 g (0,46 lb)
Coste estimado del material	5,17 €
Dimensiones máximas	X: 391,27 mm Y: 50,00 mm Z: 50,08 mm
Recuento de capas	250
Recuento de modelos	1
Recuento de procesos	1

Tabla 1: Resumen de impresión de la palanca original.

Fuente propia

El post- procesamiento de la pieza impresa mediante tecnología FDM consistió en eliminar los soportes y el material sobrante, y el suavizado de las superficies.

5.3.2 PROTOTIPO OPTIMIZADO

El prototipo optimizado y refinado se imprimió utilizando tecnología MJF en la impresora HP 580C, con material Poliamida 12. Para simular la impresión, se utilizó el software Preform, seleccionando la impresora Fuse1+ 30W, utilizando tecnología SLS y el mismo material.

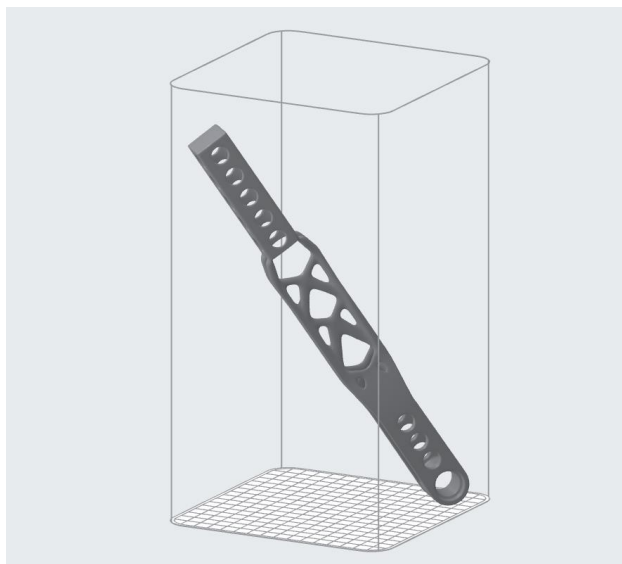


Figura 76: Simulación de la pieza optimizada en Preform.

Fuente propia

🕒 Total Print Time	9 h 4 m ▼
Preprint	41 m
Printing	7 h 26 m
Cool to 100 °C	58 m
🔥 Additional Cooling	13 h 55 m
📦 Total Powder	8.82 L / 3.92 kg ▼
Sintered Powder	0.07 L / 0.07 kg
📊 Mass Packing Density	2%
📏 Layers	2436
💰 Total Print Cost ⓘ	152.89 ▶

Figura 77: Resultados de la simulación con Preform.

Fuente propia

Los resultados obtenidos tras la impresión son los que se observan en la Figura 70:

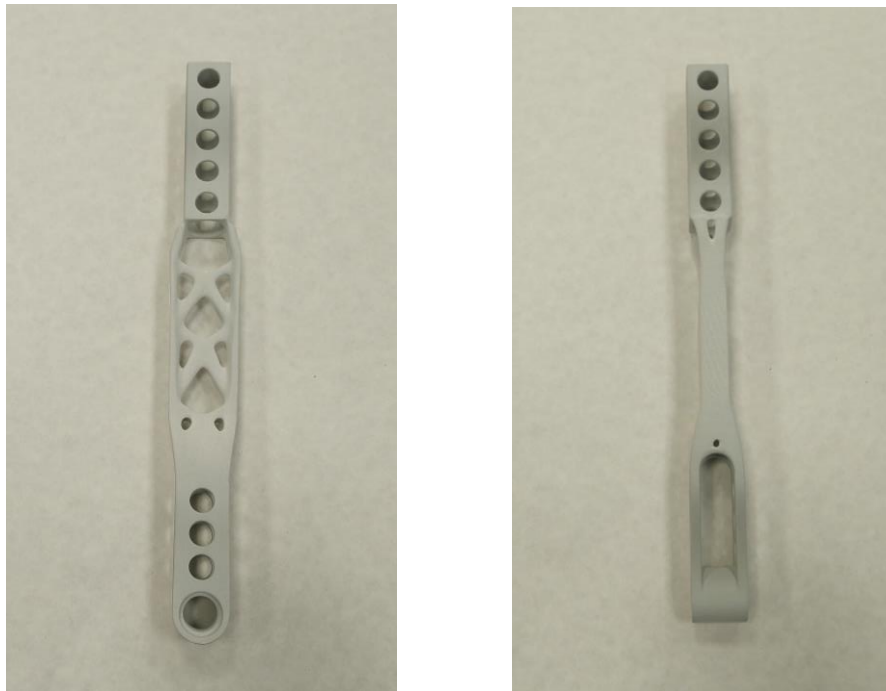


Figura 78: Resultados de la pieza impresa en 3D en MJF (HP 580 C).

Fuente propia

Para la simulación y la impresión, la pieza ha sido escalada a escala 0,8. Por tanto, para realizar una estimación de los parámetros de impresión a escala 1:1, se hace una estimación, siguiendo el siguiente razonamiento:

Partimos de que la pieza se imprimió al 80 % de escala lineal (0,8). Al aumentar a escala 1:1, el volumen (y, por tanto, masa, tiempo y coste) se escala por:

$$\left(\frac{1}{0,8}\right)^3 = 1,953$$

Por lo tanto, se obtienen los siguientes datos a escala estimada 1:1:

(Nota: Tener en cuenta que la tecnología utilizada en la impresión real es distinta de la simulación, por lo que todo son estimaciones)

Parámetro	Escala 0,8	Escala 1:1
Tiempo de impresión total	9 h 4 min	17 h 45 min
Tiempo de impresión activa	7 h 26 min	14 h 30 min
Total de capas	2.436	3.780
Altura total impresa	26,80 cm	33,50 cm
Polvo sinterizado (kg)	0,070 kg	0,137 kg
Polvo total (kg)	3,920 kg	7,66 kg
Exceso de polvo (kg)	1,106 kg	2,16 kg
Coste del material útil (€)	9,04 €	17,65 €
Coste del exceso (€)	143,84 €	280,88 €
Coste total estimado (€)	152,89 €	298,53 €

Tabla 2: Resumen de impresión de la palanca optimizada en Preform.

Fuente propia

El post- procesamiento de la pieza impresa mediante tecnología MJF consistió en eliminar el polvo sobrante y en limpiar las superficies de la pieza.

Capítulo 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

6.1 *PRESUPUESTOS*

Se realiza un análisis de los costes de fabricación de ambos prototipos: la palanca de cambio secuencial original utilizando PLA y tecnología FDM y la optimizada con la geometría refinada, usando tecnología MJF y la impresora HP 580C. Para poder comparar de forma objetiva los dos modelos fabricados se han considerado todos los factores relevantes del proceso de fabricación. En ambos casos se ha tenido en cuenta el consumo de material, el tiempo de impresión, el uso de máquina, la energía consumida y el tiempo técnico destinado al postprocesado.

La estimación se ha realizado utilizando como base el método propuesto por el laboratorio de fabricación aditiva de ICAI, incorporando además los datos extraídos directamente de los softwares Cura (para FDM) y PreForm (para SLS). A modo de validación, se ha comparado el coste estimado del modelo optimizado con el presupuesto real ofrecido por la plataforma profesional Xometry, a escala 1:1.

En los subapartados siguientes se incluyen las tablas con el cálculo de costes para los dos prototipos a la escala original.

6.1.1 PALANCA ORIGINAL

ANÁLISIS DE COSTES PARA PROTOTIPADO DE PIEZAS EN IMPRESORA 3D -FDM	
DATOS AMORTIZACIÓN MÁQUINA	
Precio máquina (€)	38.750
Coste mantenimiento anual (€)	3.875
Años de amortización	5
Amortización (h/año) - 223 días-año / 12 horas-día	1784
Precio Hora máquina-amortización (€/h)	5,65
Precio Hora venta-público (€/h)	6,21
DATOS COSTE MATERIAL	
Coste material modelo: (€/kg)	16,85
Coste material soporte: (€/kg)	16,85
DATOS COSTE TÉCNICO ANALISTA	
Coste técnico analista del modelo - inc. desmoldeo (€/h)	20

PIEZA Palanca Seccuencial Adrián Guerrero - Orientación HORIZONTAL		
CONCEPTOS PRESUPUESTADOS	Opción Solido	Costes parciales
Material modelo (g)	206,92	3,49 €/ud
Soporte modelo (g)	0,00	0,00 €/ud
Tiempo modelo (h)	14,00	86,97 €/ud
Tiempo técnico-analista (h)	0,25	5 €
Cantidad de piezas	1,00	
Coste unitario (€) en ICAI + IVA	95,46 €/Ud	
Coste total (€) en ICAI + IVA	95,46 €	

Tabla 3: Análisis de costes para la impresión de la palanca original en FDM.

Fuente propia

6.1.2 PALANCA OPTIMIZADA

ANÁLISIS DE COSTES PARA PROTOTIPADO DE PIEZAS EN IMPRESORA 3D -HP 580	
DATOS AMORTIZACIÓN MÁQUINA	
Precio máquina (€)	80.000
Coste mantenimiento anual (€)	2.000
Años de amortización	5
Días impresión/año	48
Impresiones/día	1
Precio impresión (€)	375,00
Precio Impresión venta-público (€)	375,00
DATOS COSTE MATERIAL	
Coste material: (€/kg)	130,00
Coste material: (€/cc)	0,14
Volumen Total (cc)	15634,75
Densidad de Empaquetado	10,00%
DATOS COSTE TÉCNICO ANALISTA	
Coste técnico analista del modelo - inc. limpieza (€/h)	20

PIEZA Palanca Secuencial Adrián Guerrero - Orientación HORIZONTAL		
CONCEPTOS PRESUPUESTADOS	Opción Solido	Costes parciales
Material modelo (cc)	183,95	25,17 €/ud
Impresión	-	44,12 €/ud
Tiempo técnico-analista (h)	0,50	10,00 €/ud
Tiempo Limpieza (h)	0,50	10,00 €/ud
Cantidad de piezas	1,00	
Coste unitario (€) en ICAI + IVA	89,29 €/Ud	
Coste total (€) en ICAI + IVA	89,29 €	

Tabla 4: Análisis de costes para la impresión de la palanca optimizada en MJF.

Fuente propia

6.1.3 PALANCA ORIGINAL EN ALUMINIO

Como la palanca fue simulada para ser fabricada mediante métodos de mecanizado en Aluminio 7075-T6, se ha generado un presupuesto extraído de Protolabs Network (hubs.com) para ese método de fabricación.



PalancaSecuencial_BASE.stp **1** **€394.25**

€394.25 p/part

CNC machining

Aluminum 7075-T6 | 3.4365 | 76528 |

AlZn5,5MgCu

As machined (Ra 3.2µm / Ra 126µin)

No part markings

General tolerance: ISO 2768 Medium

No tighter tolerances

Sharp internal corners rounded to 2 mm

No engineering fits

No threads

[Change specifications](#)

View DFM analysis

50.0 × 50.0 × 385.0 mm

272,336.654 mm³

Figura 79: Presupuesto para fabricación mediante mecanizado en Aluminio.

Fuente: Protolabs [24]

6.2 COMPARACIÓN DE RESULTADOS

Tras obtener todos los resultados de fabricación de los prototipos antes y después de su optimización, se realiza una comparación entre ellos para comprobar la efectividad del proyecto.

Tecnología	Modelo	Material	Coste estimado
FDM (DT 600)	Original	PLA	95,46 €
MJF (HP 580C)	Optimizado final	Nylon 12 (PA12)	89,29 €
Mecanizado CNC	Original	Aluminio 7075-T6	394,25 €

Tabla 5: Comparativa de costes de los resultados obtenidos por distintos métodos.

Fuente propia



Figura 80: Comparativa entre los resultados obtenidos.

Fuente propia

En primer lugar, el modelo optimizado presenta una reducción de masa del 50 % respecto al diseño original, lo que implica una mejora directa en términos de eficiencia estructural y rendimiento, especialmente cuando el peso es un factor crítico.

Desde el punto de vista económico, el coste de la fabricación del modelo original mediante mecanizado CNC en Aluminio 7075-T6 asciende a 394,25 €, mientras que la fabricación del modelo optimizado por impresión 3D en MJF (PA12) se reduce a 89,29 €, aunque el material sea distinto y más caro para CNC, representa un ahorro muy significativo frente al coste final de fabricación, cumpliendo con la misma finalidad. Además, el prototipo en FDM impreso tuvo un coste de 95,46 €, sirviendo como referencia de coste para fases iniciales del desarrollo.

Por tanto, el uso de herramientas de simulación FEM, diseño generativo y fabricación aditiva ha permitido alcanzar un diseño más eficiente tanto a nivel mecánico como económico, demostrando que este flujo de trabajo es altamente recomendable para el desarrollo de componentes funcionales en entornos de altas prestaciones.

Capítulo 7. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

A lo largo del proyecto se ha llevado a cabo el rediseño y la optimización topológica de una palanca de cambio secuencial orientada a aplicaciones industriales o deportivas, partiendo de un conjunto mecánico de referencia. Tras el modelado inicial en CAD, se realizaron simulaciones estáticas mediante FEM para validar el diseño original y establecer las condiciones de contorno necesarias para el proceso de optimización.

Se ha utilizado diseño generativo para reducir la masa del componente manteniendo sus propiedades estructurales, obteniendo una reducción total exacta del 47,62 %. A partir de los resultados de optimización, se refinó y suavizó la geometría final mediante Altair Inspire y se llevó a cabo la impresión 3D del prototipo en PA12 utilizando tecnología MJF. El análisis de costes ha confirmado que el modelo optimizado no solo mejora en términos estructurales, sino que reduce considerablemente el coste de fabricación respecto al modelo mecanizado en aluminio.

Se han cumplido los objetivos principales del proyecto: aplicar un flujo de trabajo completo de diseño, optimización y fabricación aditiva sobre un componente funcional, validar su comportamiento estructural, y demostrar la viabilidad del proceso en términos económicos y técnicos.

Como línea de trabajo futuro, se plantea la fabricación del resto de componentes del mecanismo de la palanca secuencial, lo que permitiría su posterior ensamblaje y validación funcional como sistema completo. Esta etapa incluiría la selección de elementos normalizados para uniones y transmisiones, con el objetivo de integrar el mecanismo en un vehículo con transmisión secuencial real.

Capítulo 8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] “Adjustable Sequential Shifter, 2019.” Accessed: Jul. 04, 2025. [Online]. Available: <https://grabcad.com/library/adjustable-sequential-shifter-1>
- [2] E. Puchicabrera *et al.*, “Fatigue behavior of AA7075-T6 aluminum alloy coated with ZrN by PVD,” *Int. J. Fatigue*, vol. 30, no. 7, pp. 1220–1230, Jul. 2008, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2007.09.001.
- [3] “Nylon 12 / PA 12 (SLS, MJF) - Xometry.” Accessed: Jul. 07, 2025. [Online]. Available: <https://xometry.pro/en-eu/materials/nylon-pa-12/>
- [4] “paramatters-upgrades-generative-design-software-with-cognicad-2-1-154608.” Accessed: Jan. 29, 2025. [Online]. Available: <https://3dprintingindustry.com/news/paramatters-upgrades-generative-design-software-with-cognicad-2-1-154608/>
- [5] T. Briard, F. Segonds, and N. Zamariola, “G-DfAM: a methodological proposal of generative design for additive manufacturing in the automotive industry,” *Int. J. Interact. Des. Manuf. IJIDeM*, vol. 14, no. 3, pp. 875–886, Sep. 2020, doi: 10.1007/s12008-020-00669-6.
- [6] “Objetivos y metas de desarrollo sostenible (ONU).” Accessed: Jul. 09, 2025. [Online]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/sustainable-development-goals/>
- [7] “Gearbox Guide: Everything You Need To Know.” Accessed: Jul. 09, 2025. [Online]. Available: <https://www.fastcar.co.uk/tuning-tech-guides/fast-car-gearbox-guide/>
- [8] “world-debut-porsche-911-gt3-r.” Accessed: Jan. 30, 2025. [Online]. Available: <https://www.spare-wheel.com/porsche/world-debut-porsche-911-gt3-r>
- [9] “cambio%2Bsecuencial.” Accessed: Jan. 30, 2025. [Online]. Available: <https://cults3d.com/es/etiquetas/cambio%2Bsecuencial>
- [10] “2015 DSD Pro Sequential Shifter.” Accessed: Jul. 09, 2025. [Online]. Available: <https://derekspearedesigns.com/2015-dsd-pro-sequential.html?m>
- [11] Prof. Mariano Jiménez Calzado, “Temas 7-Fabricación Aditiva-vMJC01-OK-2122.”
- [12] O. Abdulhameed, A. Al-Ahmari, W. Ameen, and S. H. Mian, “Additive manufacturing: Challenges, trends, and applications,” *Adv. Mech. Eng.*, vol. 11, no. 2, Feb. 2019, doi: 10.1177/1687814018822880.
- [13] “La fabricación aditiva en metal en la Industria 4.0.” Accessed: Jul. 14, 2025. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=o4iLxKOp2Rk>
- [14] M. Zahera, “LA FABRICACIÓN ADITIVA, TECNOLOGÍA AVANZADA PARA EL DISEÑO Y DESARROLLO DE PRODUCTOS,” 2012.
- [15] T. Briard, F. Segonds, and N. Zamariola, “G-DfAM: a methodological proposal of generative design for additive manufacturing in the automotive industry,” *Int. J. Interact. Des. Manuf. IJIDeM*, vol. 14, no. 3, pp. 875–886, Sep. 2020, doi: 10.1007/s12008-020-00669-6.
- [16] “Lightbau Bionic Engineering.” Accessed: Jul. 14, 2025. [Online]. Available: <https://lightbau.de/>

-
- [17] E. Tyflopoulos, D. T. Flem, M. Steinert, and A. Olsen, “State of the art of generative design and topology optimization and potential research needs”.
- [18] “Generative Bike Stem.” Accessed: Jul. 14, 2025. [Online]. Available: https://www.instagram.com/p/Cz7EWRpKbvf/?img_index=1
- [19] L. García Menéndez, “Diseño generativo: el estado del arte,” *Téc. Ind.*, vol. 327, no. 327, pp. 44–49, Nov. 2020, doi: 10.23800/10417.
- [20] “Czinger 21C.” Accessed: Jul. 14, 2025. [Online]. Available: <https://www.carmagazine.co.uk/car-news/first-official-pictures/czinger/21c/>
- [21] O. G. Woge, C. O. G. Morán, and A. L. Chau, “Introducción al método del elemento finito: Solidworks y Matlab,” vol. 1, 2020.
- [22] “Alcoa Global Cold Finished Products.” Accessed: Jul. 10, 2025. [Online]. Available: <https://www.alcoa.com/global/en/home/>
- [23] J. Kim *et al.*, “Simulation of the shift force for a manual transmission,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part J. Automob. Eng.*, vol. 217, no. 7, pp. 573–581, Jul. 2003, doi: 10.1243/095440703322114951.
- [24] “Presupuesto CNC Machining Protolabs.” Accessed: Jul. 14, 2025. [Online]. Available: <https://www.hubs.com/manufacture/order/35b6dedb-d2fd-4d51-9ba3-cd1a5524b5df/quote/76a3bf83-a91f-4b42-933b-5d560b1a26ba>

Capítulo 9. ANEXOS

9.1 ANEXO I

Ficha técnica del Aluminio 7075-T6:

ALLOY 7075

DESCRIPTION

Introduced by Alcoa in 1943, alloy 7075 has been the standard workhorse 7XXX series alloy within the aerospace industry ever since. It was the first successful Al-Zn-Mg-Cu high strength alloy using the beneficial effects of the alloying addition of chromium to develop good stress-corrosion cracking resistance in sheet products. Although other 7XXX alloys have since been developed with improved specific properties, alloy 7075 remains the baseline with a good balance of properties required for aerospace applications.

Alloy 7075 is available in bare and clad sheet and plate product forms in the annealed state as well as several tempers of the T6, T73 and T76 types.

APPLICATIONS

Alloy 7075 sheet and plate products have application throughout aircraft and aerospace structures where a combination of high strength with moderate toughness and corrosion resistance are required.

Typical applications are clad skin sheet, structural plate components up to 4 inches in thickness and general aluminum aerospace applications.

CHEMICAL COMPOSITION LIMITS (WT. %)

Si	0.40	Zn	5.1-6.1
Fe	0.50	Ti	0.20
Cu	1.2-2.0	Others, each	0.5
Mn	0.30	Others, total	0.15
Mg	2.1-2.9	Balance, Aluminum	
Cr	0.18-0.28		

Note: Value maximum if range not shown.

MECHANICAL PROPERTIES

ALLOY 7075 All values are minimum long transverse mechanical properties except where noted.

TEMPER	THICKNESS in. (mm)	TENSILE STRENGTH ksi (MPa)	YIELD STRENGTH ksi (MPa)	ELONGATION %
0 Sheet & plate	0.015-2.00 (0.38-50.80)	40 (max) (276)	21 (max) (145)	9-10
T6 Sheet	0.008-0.249 (0.203-6.32)	74-78 (510-538)	63-69 (434-476)	5-8
T651 Plate	0.250-4.000 (6.35-101.60)	78-67 (538-462)	67-54 (462-372)	9-3
T76 Sheet	0.125-0.249 (3.18-6.32)	73 (503)	62 (427)	8
T7651 Plate	0.250-1.000 (6.35-25.40)	72-71 (496-490)	61-60 (421-414)	8-6
T73 Sheet	0.040-0.249 (1.02-6.32)	67 (462)	56 (386)	8
T7351 Plate	0.250-4.000 (6.35-101.60)	69-61 (476-421)	57-48 (393-331)	7-6

ALCLAD 7075

Two side cladding. Nominal cladding thickness is 4% on gauges under 0.062 in. (1.57 mm); 2.5% on gauges over 0.062 in. (1.57 mm). Property values for one side clad material are similar (not shown). All values are minimum long transverse mechanical properties except where noted.

TEMPER	THICKNESS in. (mm)	TENSILE STRENGTH ksi (MPa)	YIELD STRENGTH ksi (MPa)	ELONGATION %
0 Sheet & plate	0.008-1.000 (0.203-6.32)	36-40 (max) (248-276)	20-21 (max) (138-145)	9-10
T6 Sheet	0.008-0.249 (0.203-6.32)	68-76 (469-524)	58-65 (400-448)	5-9
T651 Plate	0.250-4.000 (6.35-101.60)	75-67 (517-462)	65-54 (448-372)	9-3
T76 Sheet	0.125-0.249 (3.18-6.32)	68-70 (469-482)	57-59 (393-407)	8
T7651 Plate	0.250-1.000 (6.35-25.40)	69-71 (476-490)	58-60 (400-414)	8-6
T73 Sheet	0.040-0.249 (1.02-6.32)	63-66 (434-455)	51-54 (352-372)	8
T7351 Plate	0.250-1.000 (6.35-25.40)	66-69 (455-476)	54-57 (372-393)	8-7

FRACTURE TOUGHNESS

Alloy 7075 sheet and plate products offer moderately good strength/toughness relationships and are the standard of comparison for more recent 7XXX series alloy developments. Alloy 7075 sheet and plate products are not offered with guaranteed minimum fracture toughness values.

TYPICAL FRACTURE TOUGHNESS VALUES Alloy 7075 Plate

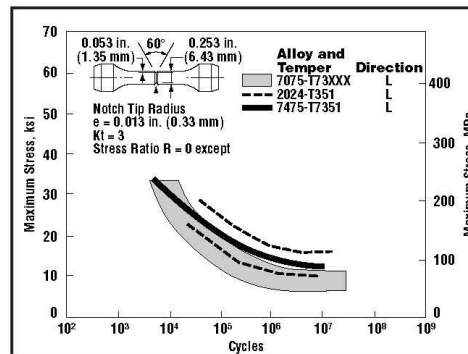
ALLOY	TEMPER	K_{IC} : ksi $\sqrt{\text{in.}}$ (MPa $\sqrt{\text{m}}$) *	
		L-T	T-L
7075	T651	26 (28.6)	22 (24.2)
	T7351	30 (32.0)	26 (28.6)

* Compact specimen (ASTM E399)

FATIGUE PROPERTIES

COMPARISON OF AXIAL-STRESS NOTCH-FATIGUE DATA FOR ALLOYS 7075-T73XXX 2024-T351 AND 7475- T7351 PRODUCTS

The fatigue behavior of alloy 7075 plate products is shown in the accompanying figure comparing axial-stress notch-fatigue data of 2XXX and 7XXX series alloys.

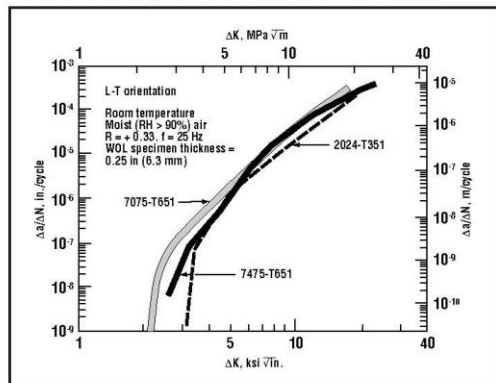


ALLOY 7075

FATIGUE CRACK GROWTH

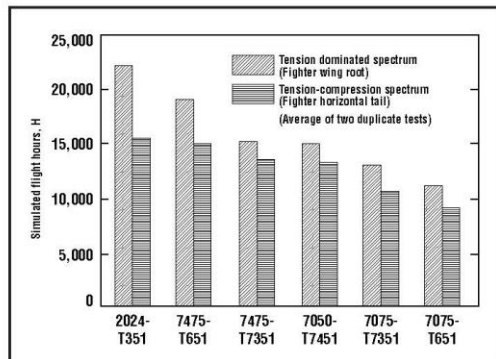
Fatigue crack growth rates for plate products of 7075-T6 in constant amplitude tests are compared with products of alloys 2024, 7050, and 7475.

COMPARISON OF FATIGUE CRACK GROWTH RATE DATA FOR ALLOY 7075-T651, 2024-T351 AND 7475-T651 PLATE



Fatigue crack growth behavior under spectrum loading is becoming increasingly important in the selection of alloys for fatigue critical aircraft structures. Various high strength aerospace alloys are compared for life prediction in flight hours using two types of fatigue spectrums; a wing root application (tension dominated), and a horizontal tail application (tension-compression).

SPECTRUM FATIGUE RANKING



Source: U.S. Navy Contract N00019-81-C-0550/Northrop Corp.

CORROSION RESISTANCE

Alloy 7075 has been thoroughly evaluated for corrosion resistance of atmospheric weathering, stress-corrosion cracking and exfoliation in all currently available tempers. These values have been used as a standard for comparison in the development of more recent high strength aerospace alloys. Within the 7XXX series of alloys, resistance to general corrosion attack, SCC and exfoliation improves significantly in the overage tempers (T7 type) compared with peak strength tempers (T6).

Generally, the T76 type temper is considered the exfoliation resistant temper, while the T73 type temper is considered the SCC resistant temper. It should be noted that T73 is as resistant to exfoliation as T76, but at lower strength levels.

For applications where good surface appearance is required or in corrosive environments, alclad 7075 sheet and plate products are recommended.

THERMAL TREATMENT

Many heat treatments and heat treating practices are available to develop optimum strength, toughness and other desirable characteristics for proper application of alloy 7075 sheet and plate products. Refer to MIL-H-6088, *Heat Treatment of Aluminum Alloys* for additional information.

PROCUREMENT SPECIFICATIONS

PLATE

Temper	T651	T7651
Specification	QQ-A-250/13	QQ-A-250/24
MIL-HDBK-5	Approved	

BARE SHEET

Specification	QQ-A-250/12,24	QQ-A-250/13,25,26
MIL-HDBK-5	Approved	Approved

ALCLAD SHEET

OTHER PRODUCT FORMS

Other product forms of alloy 7075 are extrusions, forgings, wire rod and bar, and rivets.

REFERENCES:

1. The Aluminum Association, *Standards and Data*.
2. The Aluminum Association, *Position on Fracture Toughness Requirements and Quality Control Testing T-5*.
3. MIL-H-6088, *Heat Treatment of Aluminum Alloys*.



PRODUCT SPECIFICATIONS ARE SUBJECT TO CHANGE WITHOUT NOTICE

ALCOA MILL PRODUCTS

P.O. BOX 8025 • BETTENDORF, IOWA 52722 • (800) 523-9596 • www.millproducts-alcoa.com

SPD-10-037



Alcoa Global Cold Finished Products

ALLOY 7075

Understanding Cold Finished Aluminum Alloys

Alloy 7075, a cold finished aluminum wrought product, has the highest strength of all aluminum screw machine alloys. The -T6 and -T651 tempers have a typical tensile strength of 83 ksi, which is higher than many mild steels.

Due to its very high strength, alloy 7075 is used for highly stressed structural parts. Applications include aircraft fittings, gears and shafts, fuse parts, meter shafts and gears, missile parts, regulating valve parts, worm gears, keys, and various other commercial aircraft, aerospace and defense equipment. Rod and bar product forms can be machined on multi-spindle and CNC machining equipment.

Machining

Alloy 7075 offers good machinability when machined using single-point or multi-spindle carbide tools on screw machines. The use of a chip breaker is recommended. The alloy is rated "B" on the Aluminum Association machinability rating system, giving curled or easily broken chips with good to excellent surface finish.

Corrosion

Alloy 7075 has moderate corrosion resistance. The overaged -T73 and -T7351 tempers offers good stress-corrosion cracking resistance as compared to the -T6 and -T651 tempers. (Caution: direct contact by dissimilar metals can cause galvanic corrosion.)

Anodizing

The anodizing response rating for 7075 alloy is good using commercially available methods. The alloy can be both hard and clear-coat anodized.

The properties listed in this Alloy Data Sheet represent the best current information for this alloy. In each specific application, the user is expected to evaluate and test the alloy, temper and finishing method. Consult the Material Safety Data Sheet (MSDS) for proper safety and handling precautions when using alloy 7075.

7075 Temper Designations and Definitions

Standard Tempers	Standard Temper Definitions*
T6, T651	Solution heat-treated and then artificially aged. Applies to products that are not cold worked after solution heat-treatment, or in which the effect of cold work in flattening or straightening may not be recognized in mechanical properties. Temper -T651 applies to products that are stress-relieved by stretching.
T73, T7351	Solution heat-treated and overaged/stabilized. Applies to wrought products that are artificially aged after solution heat-treatment to carry them beyond a point of maximum strength to provide control of some significant characteristic other than mechanical properties. Applies to cast products that are artificially aged after solution heat-treatment to provide dimensional and strength stability.

*For further details of definitions, see Aluminum Association's [Aluminum Standards and Data](#) manual and [Tempers for Aluminum and Aluminum Alloy Products](#).

Alloy 7075 Chemical Analysis				Liquidus Temperature: 1175°F				Solidus Temperature: 890°F				Density: 0.101 lb./in. ³	
Percent Weight		Elements								Others		Others	
		Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Each	Total	Aluminum	
Minimum		—	—	1.2	—	2.1	.18	5.1	—	—	—		
Maximum		.40	.50	2.0	.30	2.9	.28	6.1	.20	.05	.15	Remainder	

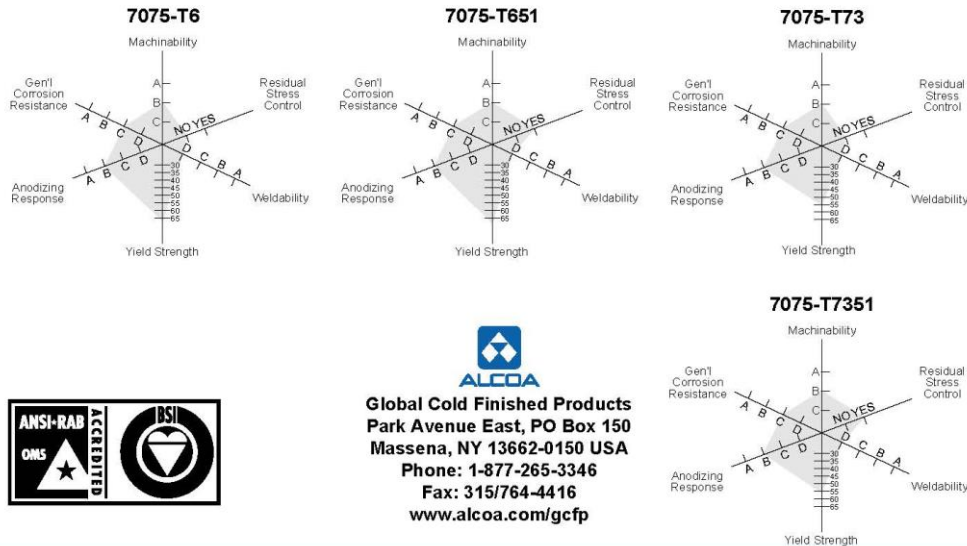
Average Coefficient of Thermal Expansion (68° to 212°F) = 13.1×10^{-6} (inch per inch per °F)

Alloy 7075 Global Cold Finished Products Capabilities and Mechanical Property Limits									
Temper	Specified Section or Wall Thickness ² (inches)	Tensile Strength (ksi)				Elongation ³	Typical Brinell Hardness (500 kg load/ 10 mm ball)	Typical Ultimate Shearing Strength (ksi)	Typical Electrical Conductivity (%IACS)
		Ultimate		Yield (0.2% offset)		Percent Min. in 2 inch or 4D ⁴			
		Min.	Max.	Min.	Max.				
Standard Tempers ¹									
T6	Up thru 4.000 ⁵	77.0	—	66.0	—	7	150	48	33
T651	Up thru 4.000 ⁵	77.0	—	66.0	—	7	150	48	33
	4.001 - 6.000	75.0	—	64.0	—	7	150	48	33
	6.001 - 7.000	73.0	—	62.0	—	7	150	48	33
T73, T7351	Up thru 4.000	68.0	—	56.0	—	10	130	—	40 ⁶
	4.001 - 5.000	66.0	—	55.0	—	8	130	—	40 ⁶
	5.001 - 6.000	64.0	—	52.0	—	8	130	—	40 ⁶

① The mechanical property limits for standard tempers are listed in the "standards section" of the Aluminum Association's Aluminum Standards and Data manual and Tempers for Aluminum and Aluminum Alloy Products. ② The thickness of the cross section from which the tension test specimen is taken determines the applicable mechanical properties. ③ For material of such dimensions that a standard test specimen cannot be obtained, or for shapes thinner than 0.062", the test for elongation is not required. ④ D = Specimen diameter. ⑤ Mechanical properties applicable to rod for thickness shown. For square, hexagonal and octagonal bar, the maximum thickness is 3.5" and for rectangular bar the maximum thickness is 3". ⑥ Minimum value when lot acceptance required for stress corrosion and exfoliation corrosion; 38.0-39.9 per standard requirements and yield strength does not exceed minimum by more than 11.9 ksi.

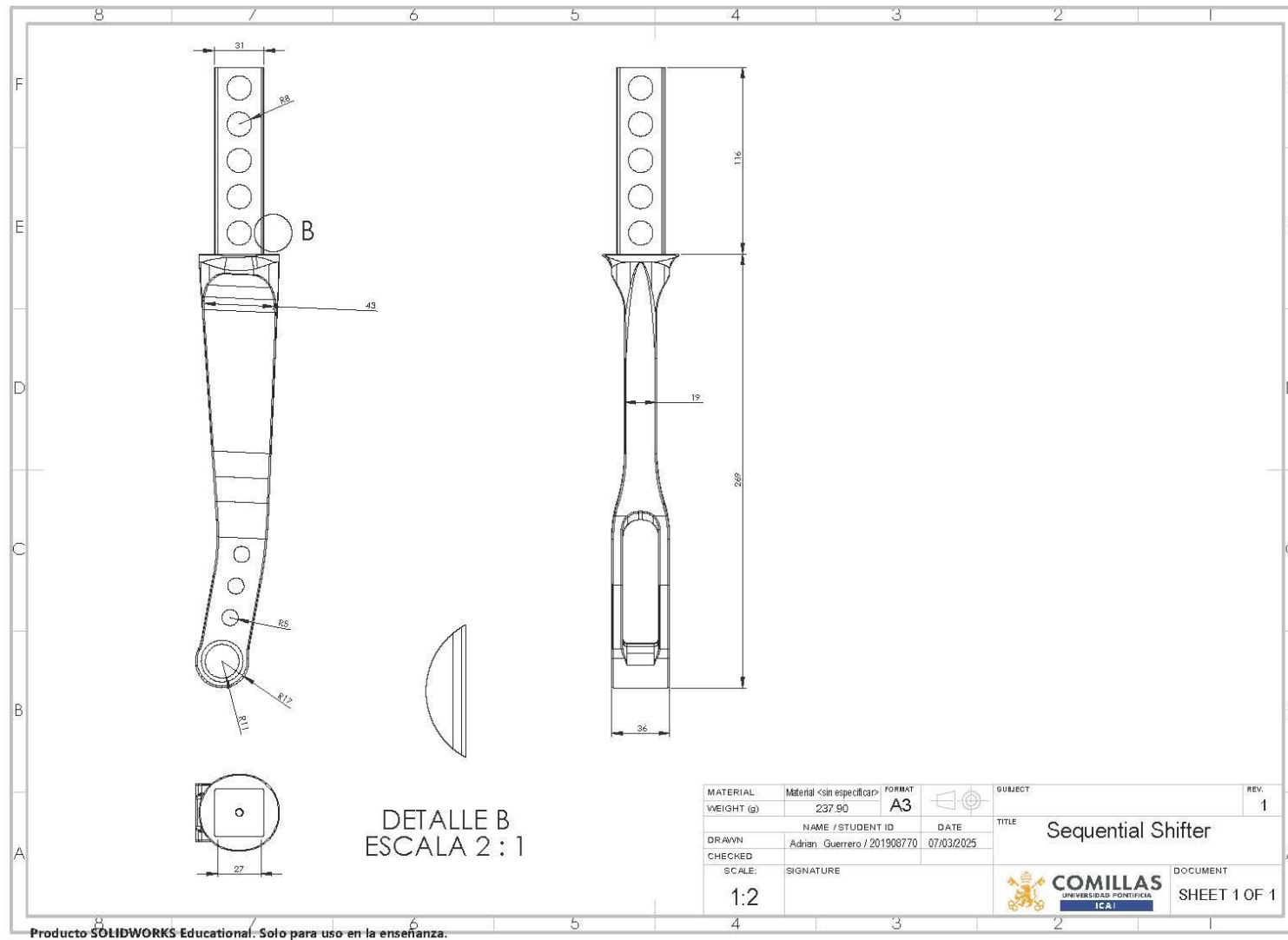
Comparative Characteristics of Related Alloys/Tempers ¹																													
		Formability		Machinability				General Corrosion Resistance				Weldability (Arc with Inert Gas)				Brazability				Anodizing Response				Stress Corrosion Cracking ²					
Alloy	Temper	Low	High	D	C	B	A	D	C	B	A	D	C	B	A	D	C	B	A	D	C	B	A	D	C	B	A		
7075	-T6, -T651																												
	-T73, -T7351																												
2024	-T351, -T4																												
	-T6																												
	-T851																												
6061	-T6, -T651																												

① Rating: A=Excellent B=Good C=Fair D=Poor For further details of explanation of ratings, see Aluminum Association's Aluminum Standards and Data manual. ② Ratings A, B and C are relative ratings based on stress applied transversely with respect to the direction of fabrication after controlled exposure to sodium chloride solution by alternate immersion: A - No known instances of failure in service or laboratory tests. B - No known instances of failure in service, laboratory failures only. C - Service and laboratory failures under special conditions.

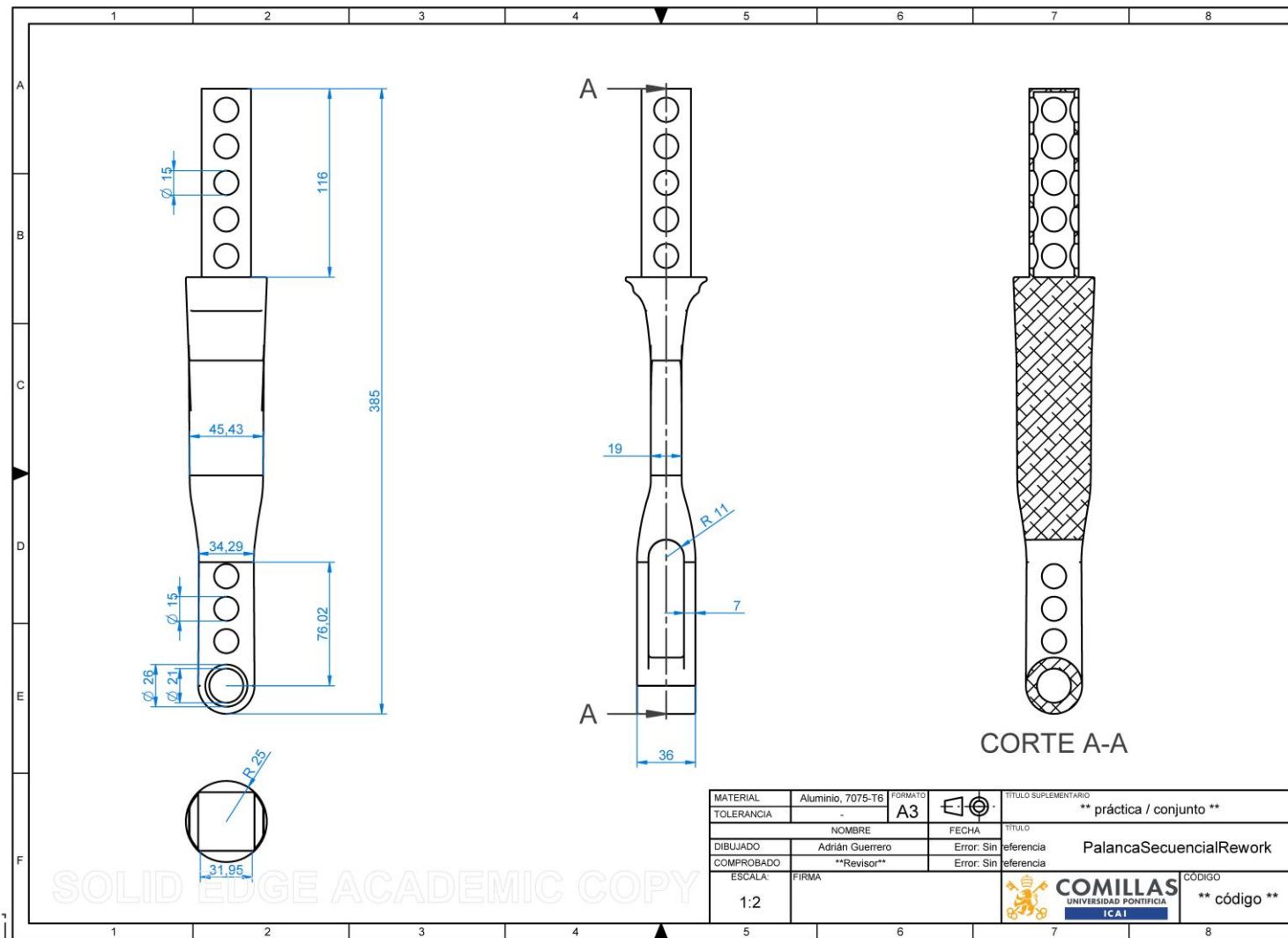


9.2 ANEXO II

Planos de la palanca de cambio usada como referencia y de la palanca de cambio rediseñada:



ANÁLISIS, DISEÑO GENERATIVO Y FABRICACIÓN DE UNA PALANCA DE CAMBIO SECUENCIAL MEDIANTE IMPRESIÓN 3D PARA APLICACIÓN INDUSTRIAL



9.3 ANEXO III

Ficha técnica de PA12:

PA12 Smooth

Material's Technical Data Sheet

A cost effective nylon 12 powder with excellent surface resolution. Perfect for detailed objects and general prototypes.

Compatible with:

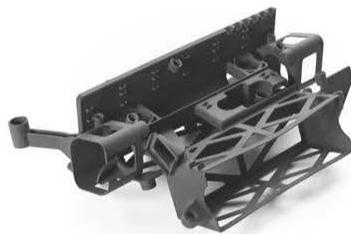


FEATURES

- good quality-to-price ratio
- excellent quality print surface and details
- high chemical resistance

APPLICATIONS

- detailed printouts
- complex spatial shapes
- structural or mechanical elements
- functional prototypes or final parts
- chemically resistant objects



General information		Test method	
Material type	Nylon 12		
Software	Sinterit Studio Basic		
Nitrogen needed	No		
Refresh ratio ¹	22	%	
Colour	navy grey		
Particle size	18-90	µm	ISO 13320
Mean particle size	38	µm	ISO 13320
Printout density	0.92	g/cm³	PN-EN ISO 845:2010
Printout water absorption	8.7	%	PN-EN ISO 62:2008

¹. Refresh ratio is the amount of refreshing powder that is required to be mixed after the printing with unsintered material.

Information provided with in this document are average values for reference and comparison only. All tests were performed with print samples from Lisa/Lisa Pro printers. Parameters presented in this specification are subject to change without notice. Final part properties may vary based on printed part design, print orientation and material handling.

Mechanical properties			Test method
Tensile Strength	32	MPa	PN-EN ISO 527- 2:2012
Elongation at Break	10	MPa	PN-EN ISO 527- 2:2012
Tensile Modulus	1470	MPa	PN-EN ISO 527- 2:2012
Flexural Strength	47	MPa	PN-EN ISO 178:2019
Flexural Modulus	1160	MPa	PN-EN ISO 178:2019
Shore hardness in type D scale	74		PN-EN ISO 868:2005
Impact strength (Charpy method - unnotched)	16	kJ/m ²	PN-EN ISO 179- 1/1eU:2010

Thermal properties			Test method
Melting point	185	°C	PN-EN ISO 11357-3:2018
Heat Deflection Temperature A at 1.8 MPa	68	°C	PN-EN ISO 75-2:2013-06 / PN-EN ISO 75-2:1998

Surface roughness		
Roughness parameter	Side surface	Top surface
Ra	9.680 [µm]	6.470 [µm]
Ra	54.184 [µm]	31.633 [µm]

Roughness of test specimens surfaces printed with layer thickness of 100 [µm].

Information provided within this document are average values for reference and comparison only. All tests were performed with print samples from Lisa/Lisa Pro printers. Parameters presented in this specification are subject to change without notice. Final part properties may vary based on printed part design, print orientation and material handling.

Rev: 13-04-2022

9.4 ANEXO IV

Ficha técnica de PLA:



TECHNICAL DATA SHEET

VERSION 1.2
REVISION: 18/10/2022



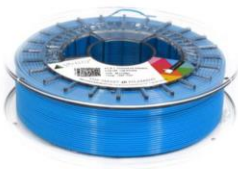
PLA

It is a biodegradable filament and for all printers, with which we can print easily, since it has no contractions allowing, in this way, to manufacture large pieces. With our PLA filament you can get a great finish and bright colors in our pieces.






Biodegradable Compostable Allow for all printers Food Approved



	VALUES	UNIT OF MEASUREMENT	STANDARD		
PHYSICAL PROPERTIES					
Chemical name	Polylactic acid				
Density	1,24	g/cm ³	ASTM D792		
MECHANICAL PROPERTIES¹					
	XY PLANE	ZX PLANE			
Tensile strength	55,5	43,8	MPa		
Traction module	4635,7	3129,8	MPa		
Flexion strength	107	18	MPa		
Flexion module	3189,7	2467,1	MPa		
Elongation at maximum effort	1	1,4	%		
Tensile elongation (until breakage)	1,1	1,4	%		
Elongation by flexion at break	5,2	1,8	%		
Charpy Impact Force (non-notched)	17,5	7	kJ/m2		
Hardness	85		Shore D		
THERMAL PROPERTIES					
Glass transition temperature (Tg)	60	°C	ISO 11357		
VICAT B (50 N 50°C/h)	59	°C	ISO 306		
HDT B (0,45 MPa)	60	°C	ISO 75		
PRINTING PROPERTIES					
Printing temperature	205 - 220	°C			
Bed temperature	40 - 60	°C			
Layer fan	100	%			
Material flow	100	%			
Layer height	≥ 0,1	mm			
Nozzle recommendations	≥ 0,2	mm			
Print speed	30 - 50	mm/s			
SIZE NET WEIGHT GROSS WEIGHT DIAMETER COLOR PACKAGING					
S	330 g	465 g	1,75 mm	Several	SmartBag, security seal,
M	750 g	975 g	1,75 mm/2,85 mm	Several	desiccant bag.
L	1000 g	1130 g	1,75 mm/2,85 mm	Several	

¹ Values obtained on printed specimens, nozzle 0,4 mm, rectilinear infill 100%, layer height 0,2 mm. For more information please contact us by email at info@smartmaterials3d.com or visit our website www.smartmaterials3d.com

NOTICE: The information provided in the data sheets is intended for reference only. It should not be used as design or quality control values. Actual values may differ significantly depending on printing conditions. The final performance of printed components not only depends on materials, design and printing conditions are also important.