



GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

DISEÑO GENERATIVO DE UN BASCULANTE TRASERO DE UN PATINETE ELÉCTRICO Y SU FABRICACIÓN MEDIANTE IMPRESIÓN 3D Y FUNDICIÓN AL MODELO PERDIDO

Autor: Álvaro López Jiménez

Director: Mariano Jiménez Calzado

Madrid

Junio 2026

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título “DISEÑO GENERATIVO DE UN BASCULANTE TRASERO DE UN PATINETE ELÉCTRICO Y SU FABRICACIÓN MEDIANTE IMPRESIÓN 3D Y FUNDICIÓN AL MODELO PERDIDO” en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el

curso académico 2025/26 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.: Álvaro López Jiménez

Fecha: 03/06/ 2026

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO



Fdo.:

Fecha: 04/ 06/ 2026



GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

DISEÑO GENERATIVO DE UN COMPONENTE INDUSTRIAL Y SU FABRICACIÓN MEDIANTE IMPRESIÓN 3D Y FUNDICIÓN AL MODELO PERDIDO

Autor: Álvaro López Jiménez

Director: Mariano Jiménez Calzado

Madrid

Junio 2026

Agradecimientos

En primer lugar, me gustaría mostrar mi agradecimiento a mi tutor, Mariano Jiménez Calzado, y al equipo técnico de los laboratorios de fabricación por guiarme durante el proyecto y por facilitarme el acceso a todos los recursos necesarios para el desarrollo de este.

A mi familia, por creer en mí desde el inicio, por darme la oportunidad de formar parte de esta universidad y por ser mi principal fuente de energía. Asimismo, agradezco a mi pareja y a mis compañeros de grado por sus consejos y apoyo en momentos de dudas o de mayor dificultad.

Finalmente, me gustaría dedicar este logro a mi “yo” del pasado por la perseverancia, trabajo duro y aprender de cada error. Sin el apoyo de todos vosotros, y sin ese esfuerzo constante, este trabajo no habría sido posible. Este éxito es en gran parte, también vuestro.

DISEÑO GENERATIVO DE UN BASCULANTE TRASERO DE UN PATINETE ELÉCTRICO Y SU FABRICACIÓN MEDIANTE IMPRESIÓN 3D Y FUNDICIÓN AL MODELO PERDIDO

Autor: López Jiménez, Álvaro.

Director: Jiménez Calzado, Mariano.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO

Este proyecto rediseña un basculante de patinete eléctrico mediante ingeniería inversa y optimización topológica, fabricándolo con impresión 3D FDM en PLA y fundición al modelo perdido. El componente final en aluminio logra una reducción de peso del 26% frente al comercial, garantizando su integridad estructural y viabilidad económica.

Palabras clave: ingeniería inversa, optimización topológica, diseño generativo, fabricación aditiva, fundición al modelo perdido.

1. Introducción

El auge de la micromovilidad eléctrica urbana exige vehículos más eficientes, ligeros y duraderos. En este contexto, el objetivo principal de este proyecto es rediseñar y fabricar el basculante trasero de un patinete eléctrico comercial para optimizar su peso, estabilidad y vibraciones transmitidas sin comprometer su integridad estructural. Para ello, se plantean objetivos específicos como la digitalización tridimensional del componente original, la aplicación de algoritmos de diseño generativo y la validación de un método de manufactura mediante fundición al modelo perdido, combinando la fabricación aditiva de un modelo calcinable en PLA con la colada tradicional en molde cerámico.

2. Metodología

El desarrollo de este estudio se extendió durante un periodo de cinco meses, iniciándose con la revisión bibliográfica, la estructuración y la planificación del proyecto. Durante esta etapa inicial se diseñó el flujo de trabajo representado en el diagrama inferior, el cual garantiza una secuencia lógica de avance orientada a la ingeniería del componente, integrando múltiples etapas de verificación geométrica y estructural antes de la manufactura final.

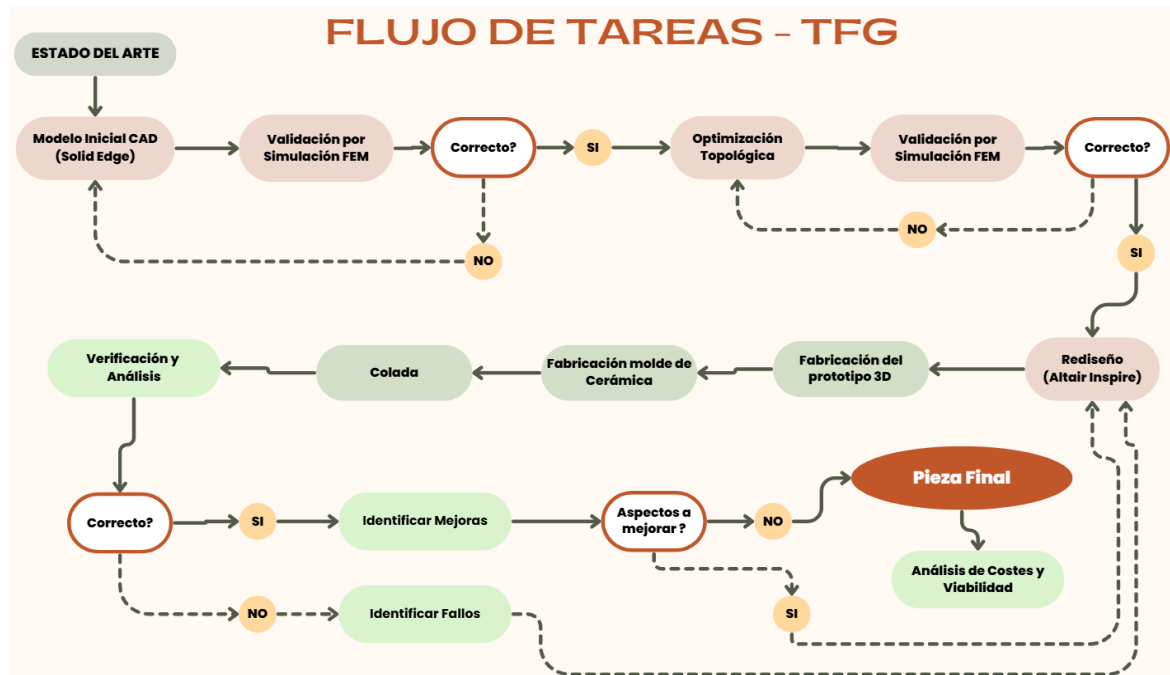


Figura 1. Flujo de trabajo secuencial para el rediseño, optimización y manufactura del componente

3. Definición del trabajo

El desarrollo práctico del proyecto comenzó con la fase de ingeniería inversa, empleando técnicas de digitalización 3D (fotogrametría y escáner láser) para obtener la geometría exacta del basculante comercial en forma de malla poligonal. A partir de este modelo y tras evaluar una situación crítica de sollicitación de esfuerzos frente a una variación brusca del terreno en condiciones de servicio urbano, se definió el estado de cargas. Debido a la elevada complejidad de la malla obtenida y a la limitada capacidad computacional disponible para trabajar con ella de forma directa, se optó por reconstruir manualmente un modelo geométrico equivalente en CAD. Mediante una simulación por elementos finitos (MEF), se obtuvo la distribución de tensiones del componente bajo las condiciones de contorno establecidas.

Posteriormente, se ejecutó el proceso de optimización topológica en Solid Edge para redistribuir el material de forma eficiente, eliminando las zonas de baja sollicitación mecánica. Tras este proceso iterativo, la geometría orgánica resultante fue exportada a Altair Inspire, donde se realizó un modelado manual de suavizado y reconstrucción geométrica para garantizar la continuidad de las superficies y su viabilidad de fabricación. Con el diseño definitivo y optimizado, se procedió a la fase de fabricación mediante fundición al modelo perdido; para ello, se obtuvo el modelo calcinable en ácido poliláctico (PLA) mediante tecnología FDM, el cual se utilizó para generar el molde refractario mediante un revestimiento cerámico para la posterior colada por gravedad de la aleación de aluminio (L-2560).

4. Resultados

El análisis CAD generó una geometría orgánica eficiente que distribuye el material según las líneas de tensión principales. Este estudio se centró exclusivamente en la aleación de aluminio, conservando cierta geometría superficial por razones de seguridad vial urbana. Tras la optimización inicial, se realizaron pequeños ajustes manuales para ensanchar algunos vástagos y nervios, garantizando así el correcto llenado del metal fundido en el molde. Para verificar la validez de este diseño modificado, se ejecutó una simulación estructural posterior bajo el mismo estado de cargas críticas, demostrando que la integridad de la pieza se mantenía intacta. El modelo optimizado virtual definitivo se muestra en la **Figura 2**.

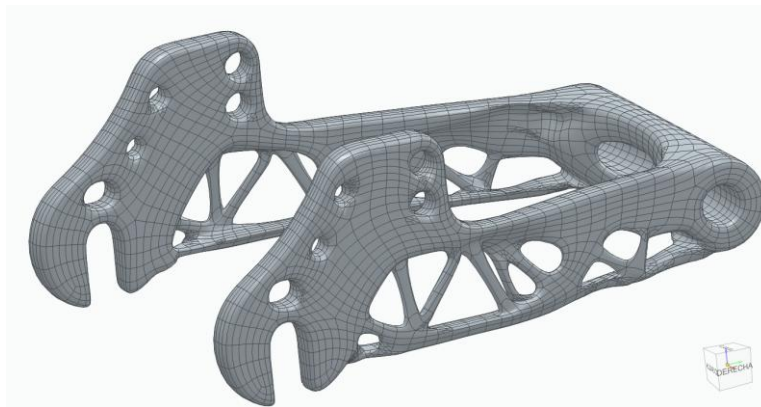


Figura 2. Geometría orgánica del basculante obtenida tras el proceso de OT

En el plano de la manufactura, se evaluó un enfoque experimental fabricando dos modelos para comprobar la capacidad de evacuación del material calcinable en el horno: uno configurado con una inclinación de 20° y otro a 30° . No obstante, debido a las restricciones de tiempo y al desarrollo de los ensayos, finalmente solamente se pudo fundir el modelo con una inclinación de 20° empleando la aleación de aluminio (AlSi10Mg), con el que teóricamente se estimaba alcanzar una **reducción de peso de 113,7 gramos** respecto al componente de serie. Tras la retirada del molde del horno de resistencia, se pudo evidenciar cómo el plástico calcinado se había quedado en su forma calcinada (cenizas) dentro del molde al no fluir hacia el exterior antes de calcinarse. Por lo tanto, los resultados obtenidos fueron los mostrados en la **Figura 3**.



Figura 3. Resultado de la colada de aluminio (L-2560)

5. Conclusiones

Los resultados confirman la absoluta validez del basculante comercial para la aplicación de técnicas de optimización topológica y la idoneidad de la fundición al modelo perdido con patrones calcinables como método de manufactura. Aunque el coste unitario en laboratorio asciende a 85 € —lo que situaría su precio de venta al público en torno a una cifra algo superior a los 100 €, frente a los 40 € del recambio de serie—, el proceso demuestra un amplio margen de mejora. Al ser una ruta de fabricación fácilmente optimizable y escalable, la automatización de sus fases permitiría reducir drásticamente estos costes, consolidando este método no solo para el prototipado rápido o componentes de altas prestaciones, sino también para una futura producción competitiva en masa.

No obstante, el método de fabricación ejecutado demostró no ser el apropiado debido a limitaciones en la fase térmica. Durante el horneado, las altas temperaturas lograron calcinar por completo el patrón de PLA, pero no se consiguió una evacuación efectiva del material desde el interior del molde cerámico. Esta falta de drenaje compromete la colada posterior, evidenciando la necesidad de modificar el proceso de fundición y los materiales empleados para ello.

Frente a la geometría maciza y sobredimensionada del modelo original, donde las regiones laterales trabajaban a niveles tensionales muy inferiores a su límite elástico, el nuevo diseño generativo aporta una notable revalorización técnico-funcional. La eliminación estratégica de material en los flancos no solo reduce el peso global en un **26% sin comprometer la rigidez estructural**, sino que mitiga la inercia en aceleraciones, disminuyendo el par motor demandado y aliviando la tensión de la batería para mejorar la autonomía. Asimismo, la consecuente reducción de la masa no suspendida atenúa las vibraciones en el tren trasero, lo que optimiza la amortiguación y mejora directamente el confort de marcha y la seguridad vial urbana.

6. Referencias

- [1] J. Mesicek, M. Pagac, J. Petru, P. Novak, J. Hajnys y K. Kutiova, “Topological optimization of the Formula Student bell crank,” *MM Science Journal*, vol. 2019, no. October, pp. 2964–2971, Oct. 2019, doi: 10.17973/MMSJ.2019_10_201893
- [2] G. Escudero y M. José, «DISEÑO GENERATIVO DE UN COMPONENTE INDUSTRIAL Y SU FABRICACIÓN MEDIANTE IMPRESIÓN 3D Y FUNDICIÓN AL MODELO PERDIDO», 2025, Accedido: 4 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.comillas.edu/xmlui/handle/11531/94203>
- [3] «Patinete eléctrico smartGyro Speedway Certificado», Smartgyro. Accedido: 23 de mayo de 2026. [En línea]. Disponible en: https://smartgyro.es/single-motor/patinete-electrico-smartgyro-speedway-certificado?srsId=AfmBOoqZVqx56TeXJUq2XHvJqZv_bXMomWoGeQPcj6Zedc9UHXO7C1cr
- [4] R. Vos, I. J. M. Besselink, y H. Nijmeijer, «Influence of in-wheel motors on the ride comfort of electric vehicles», *Proc. 10th Int. Symp. Adv. Veh. Control AVEC10 22-26 August 2010 Loughb. U. K.*, pp. 835-840, 2010.

GENERATIVE DESIGN OF AN INDUSTRIAL COMPONENT AND ITS MANUFACTURING USING 3D PRINTING AND LOST-MODEL CASTING

Author: López Jiménez, Álvaro.

Supervisor: Jiménez Calzado, Mariano.

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

ABSTRACT

This project redesigns an electric scooter swingarm through reverse engineering and topological optimization, manufacturing it using FDM 3D printing in PLA and investment casting. The final aluminum component achieves a 26% weight reduction compared to the commercial one, guaranteeing its structural integrity and economic viability.

Keywords: Reverse engineering, topological optimization, generative design, additive manufacturing, investment casting.

1. Introduction

The boom of urban electric micromobility demands more efficient, lightweight, and durable vehicles. In this context, the main objective of this project is to redesign and manufacture the rear swingarm of a commercial electric scooter to optimize its weight, stability, and transmitted vibrations without compromising its structural integrity. To achieve this, specific objectives are proposed, such as the three-dimensional digitization of the original component, the application of generative design algorithms, and the validation of a manufacturing method using investment casting, combining the additive manufacturing of a sacrificeable PLA model with traditional casting in a ceramic mold.

2. Methodology

The development of this study spanned over a five-month period, beginning with the literature review, structuring, and project planning. During this initial stage, the workflow represented in the diagram below was designed, which guarantees a logical sequence of progress oriented toward the engineering of the component, integrating multiple stages of geometric and structural verification before final manufacturing.

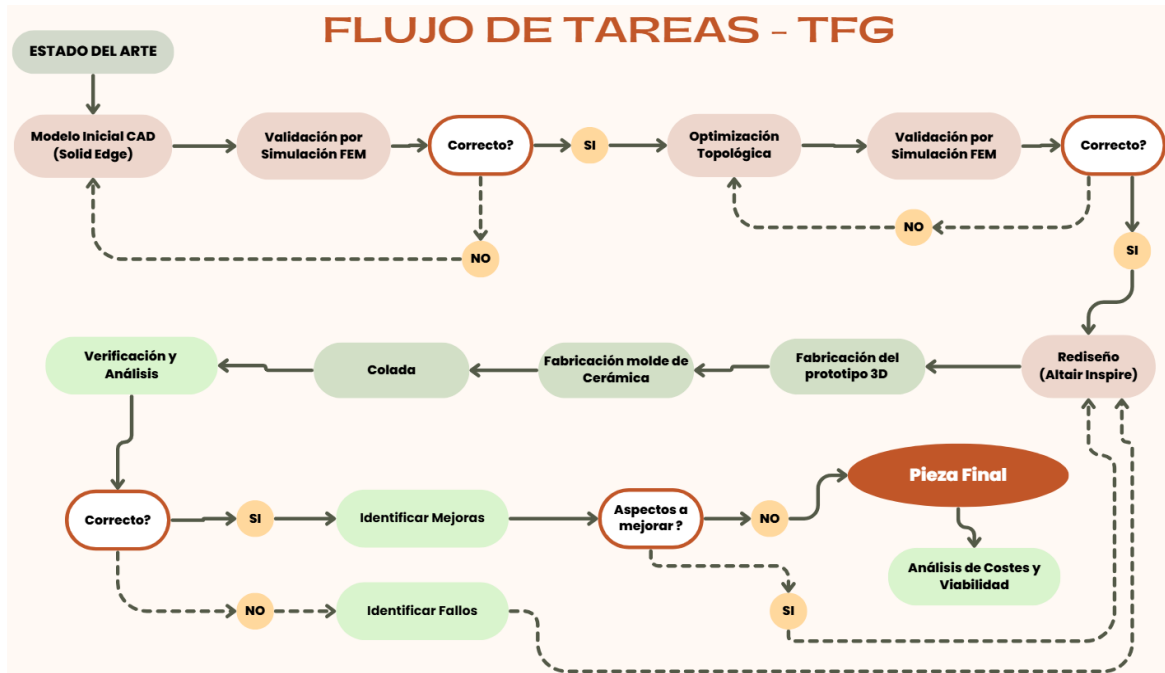


Figure 1. Sequential workflow for the redesign, optimization, and manufacturing of the component

3. Project Definition

The practical development of the project began with the reverse engineering phase, employing 3D digitization techniques (photogrammetry and laser scanning) to obtain the exact geometry of the commercial swingarm in the form of a polygonal mesh. Based on this model and after evaluating a critical stress situation against a sudden variation of the terrain under urban service conditions, the load state was defined. Due to the high complexity of the obtained mesh and the limited computational capacity available to work with it directly, it was decided to manually reconstruct an equivalent geometric model in CAD. Through a finite element analysis (FEA), the stress distribution of the component under the established boundary conditions was obtained.

Subsequently, the topological optimization process was executed in Solid Edge to efficiently redistribute the material, eliminating areas of low mechanical stress. After this iterative process, the resulting organic geometry was exported to Altair Inspire, where a manual smoothing modeling and geometric reconstruction were performed to guarantee surface continuity and manufacturing viability. With the final and optimized design, the manufacturing phase was carried out using investment casting; for this purpose, the sacrificeable polylactic acid (PLA) model was obtained through FDM technology, which was used to generate the refractory mold using a ceramic slurry coating for the subsequent gravity casting of the aluminum alloy (L-2560).

4. Results

The CAD analysis generated an efficient organic geometry that distributes the material according to the principal stress lines. This study focused exclusively on the aluminum alloy,

retaining certain surface geometry for urban road safety reasons. After the initial optimization, minor manual adjustments were made to widen some stems and ribs, thus guaranteeing the correct filling of the molten metal in the mold. To verify the validity of this modified design, a subsequent structural simulation was executed under the same critical load state, demonstrating that the integrity of the piece remained intact. The final definitive virtual optimized model is shown in **Figure 2**.

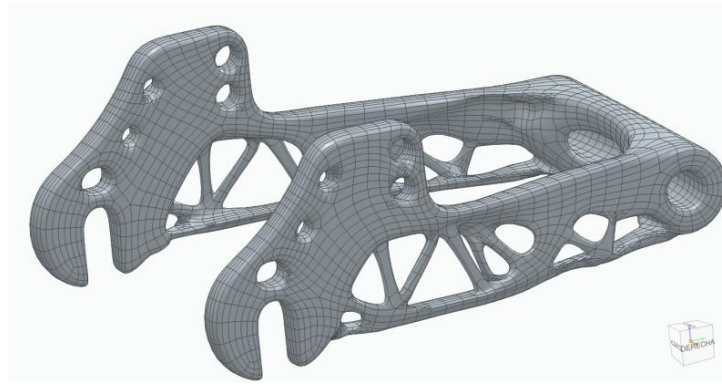


Figure 2. Organic geometry of the swingarm obtained after the topological optimization process

In terms of manufacturing, an experimental approach was evaluated by manufacturing two models to verify the evacuation capacity of the sacrificeable material in the furnace: one configured with an inclination of 20° and another at 30° . However, due to time constraints and the development of the tests, it was ultimately only possible to cast the model with a 20° inclination using the aluminum alloy (AlSi10Mg), with which it was theoretically estimated to achieve a **weight reduction of 113.7 grams** compared to the stock component. After removing the mold from the resistance furnace, it was possible to observe how the calcined plastic had remained in its calcined form (ashes) inside the mold by not flowing outward before calcining. Therefore, the results obtained were those shown in **Figure 3**.



Figure 3. Result of the Aluminum (L-2560) casting

5. Conclusions

The results confirm the absolute validity of the commercial swingarm for the application of topological optimization techniques and the suitability of investment casting with sacrificeable patterns as a manufacturing method. Although the unit cost in the laboratory amounts to €85—which would place its retail price around a figure slightly above €100, compared to €40 for the stock spare part—the process demonstrates a wide margin for improvement. Being an easily optimizable and scalable manufacturing route, the automation of its phases would drastically reduce these costs, consolidating this method not only for rapid prototyping or high-performance components, but also for a future competitive mass production.

However, the executed manufacturing method proved to be inappropriate due to limitations in the thermal phase. During the baking, the high temperatures managed to completely calcine the PLA pattern, but an effective evacuation of the material from inside the ceramic mold was not achieved. This lack of drainage compromises the subsequent casting, evidencing the need to modify the casting process and the materials used for it.

Compared to the solid and oversized geometry of the original model, where the lateral regions worked at stress levels far below their yield strength, the new generative design provides a remarkable technical-functional revaluation. The strategic elimination of material on the flanks not only reduces the overall weight by **26% without compromising structural rigidity**, but also mitigates inertia during acceleration, decreasing the demanded motor torque and relieving battery strain to improve range. Likewise, the consequent reduction of the unsprung mass attenuates vibrations in the rear assembly, which optimizes damping and directly improves ride comfort and urban road safety.

6. References

- [1] J. Mesicek, M. Pagac, J. Petru, P. Novak, J. Hajnys y K. Kutiova, “Topological optimization of the Formula Student bell crank,” *MM Science Journal*, vol. 2019, no. October, pp. 2964–2971, Oct. 2019, doi: 10.17973/MMSJ.2019_10_201893
- [2] G. Escudero y M. José, «DISEÑO GENERATIVO DE UN COMPONENTE INDUSTRIAL Y SU FABRICACIÓN MEDIANTE IMPRESIÓN 3D Y FUNDICIÓN AL MODELO PERDIDO», 2025, Accedido: 4 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.comillas.edu/xmlui/handle/11531/94203>
- [3] «Patinete eléctrico smartGyro Speedway Certificado», Smartgyro. Accedido: 23 de mayo de 2026. [En línea]. Disponible en: https://smartgyro.es/single-motor/patinete-electrico-smartgyro-speedway-certificado?srsId=AfmBOoqZVqx56TeXJUq2XHvJqZv_bXMomWoGeQPcj6Zedc9UHXO7C1cr
- [4] R. Vos, I. J. M. Besselink, y H. Nijmeijer, «Influence of in-wheel motors on the ride comfort of electric vehicles», *Proc. 10th Int. Symp. Adv. Veh. Control AVEC10 22-26 August 2010 Loughb. U. K.*, pp. 835-840, 2010.

Índice de la memoria

1. Introducción.....	11
1.1 Contexto de la movilidad urbana	11
1.2 Importancia del diseño estructural en vehículos ligeros	12
1.3 Introducción al diseño generativo	13
1.4 motivación	14
1.5 objetivos	15
1.6 Objetivos de desarrollo sostenible (ODS).....	15
1.7 Metodología del proyecto	17
2. Estado del arte	19
2.1 Ingeniería inversa aplicado al diseño mecánico.....	19
2.1.1 Fotogrametría.....	20
2.1.2 Escaneado láser.....	22
2.1.3 Comparativa fotogrametría vs escáner láser	28
2.2 Diseño generativo	30
2.2.4 Optimización topológica (OT).....	30
2.2.5 Métodos basados en simulación	32
2.2.6 Softwares	35
2.2.7 Ventajas y aplicaciones	36
2.3 Fabricación aditiva (FA).....	38
2.3.8 Materiales empleados.....	38
2.3.9 Principales tecnologías	41
2.3.10 Flujo de trabajo en FA	47
2.3.11 Parámetros de diseño e impresión	48
2.3.12 ventajas de la FA.....	50
2.3.13 Limitaciones de la FA.....	51
2.4 Fundición al modelo perdido	52
2.4.14 aplicaciones en ingeniería.....	54
2.4.15 comparativa de costes	55
2.5 Casos de estudios similares.....	57
3. definición del trabajo.....	58

3.1 Entorno de ingeniería inversa	58
3.1.1 Fotogrametría.....	58
3.1.2 Escaneado láser.....	64
3.1.3 Diseño CAD.....	69
3.2 Entorno de simulación y optimización.....	70
3.2.4 Flujo de trabajo.....	70
3.2.5 Análisis de cargas.....	71
3.2.6 Simulación.....	81
3.2.7 Diseño generativo.....	84
3.2.8 Verificación del comportamiento mecánico de la pieza.....	94
4. Fabricación.....	96
4.1 Preparación y laminado del modelo (Impresión 3D)	96
4.1.1 Configuración de parámetros en Bambu Studio para el modelo	96
4.1.2 Configuración de parámetros en Bambu Studio para la base	99
4.1.3 Resultados del laminado y estimación de recursos	101
4.2 Impresión 3D del modelo mediante tecnología FDM.....	103
4.2.1 Retirada de soportes.....	103
4.2.2 Análisis de calidad superficial y precisión dimensional del patrón obtenido.....	104
4.3 Elaboración del molde de revestimiento cerámico	105
4.3.1 Diseño previo y fabricación del molde y su caja exterior	106
4.3.2 Cálculo de proporciones de la mezcla de sulfato de calcio	108
4.3.3 Procedimiento de preparación y homogeneización de la mezcla	110
4.3.4 Vertido del revestimiento y relleno del molde.....	112
4.4 Calcinación del plástico y precalentamiento.....	114
4.4.1 Ciclos térmicos en horno.....	114
4.4.2 Evaluación de la evacuación del PLA.....	116
4.5 Colada de la aleación de aluminio, desmoldeo y acabado	117
4.5.3 Fusión y vertido de la aleación de aluminio	118
4.5.4 Enfriamiento controlado y rotura del molde cerámico (desmoldeo).	120
5. Análisis de resultados.....	121
5.1 Análisis de resultados del componente fabricado	121
5.1.1 Resultado de la fundición.....	121

5.1.2 Inspección dimensional y desviaciones frente al modelo CAD final.....	123
5.1.3 Caracterización del acabado superficial y defectos de fundición (porosidades/valles).	123
5.1.4 Comparativa de reducción de masa real (Peso inicial vs. Peso optimizado en aluminio).	125
5.2 Análisis de costes del proyecto	125
5.2.1 Costes de diseño y optimización.....	125
5.2.2 Costes de fabricación aditiva	126
5.2.3 Costes del proceso de fabricación mediante fundición	128
5.2.4 Consolidación del coste unitario.....	129
5.3 Comparativa económica y de mercado	130
5.3.1 Limitaciones técnicas y viabilidad económica de los métodos de fabricación convencionales.	131
5.3.2 Análisis comparativo frente a la impresión 3D directa en metal.....	132
5.3.3 Análisis beneficio-coste: Impacto de la ligereza en la autonomía y dinámica del patinete.	134
6. Conclusiones y trabajos futuros.....	136
6.1 Conclusiones del proyecto	136
6.2 Líneas de investigación y trabajos futuros.....	138
7. Bibliografía.....	141

Índice de figuras

Figura 1. Ejemplo de flujo de trabajo propuesto para la OT (Elaboración propia mediante Gemini AI).....	14
<i>Figura 2. ODS 7</i>	16
Figura 3. ODS 11.....	16
Figura 4. ODS 13.....	16
Figura 5. ODS 9.....	16
Figura 6. ODS 12.....	16
Figura 7. Flujo de Tareas.....	17
Figura 8. Cronograma.....	18
Figura 9. Tipos de ingeniería inversa	19
Figura 10. Métodos ópticos de ingeniería inversa.....	20
Figura 11. Targets para escaneado óptico	21
Figura 12. Conjunto de imágenes tomadas para la digitalización de un cráneo animal.....	22
Figura 13. Escáner LiDAR	23
Figura 14. Escáner de mano	23
Figura 15. Esquema sistemas de medida láser.	25
Figura 16. Fundamentos trigonométricos.....	26
Figura 17. Proyección de rejilla láser sobre pieza	27
Figura 18. Comparación de resultados de diseño generativo con distintos procesos de fabricación [16].....	30
Figura 19. Flujo de trabajo OT (Fuente: Departamento de Diseño y Fabricación ICAI)....	31
Figura 20. Mallado de pieza por FEM.....	32
Figura 21. Comparativa de densidad de mallado (Elaboración propia mediante Gemini AI)	33
Figura 22. Comparativa mallado estructurado y no estructurado (Elaboración propia mediante Gemini IA).....	34

Figura 23. Ejemplo OT sector biomédico	37
Figura 24. Ejemplo OT sector automovilístico	37
Figura 25. Ejemplo OT ingeniería civil y construcción	37
Figura 26. Clasificación de procesos de fabricación [22]	38
Figura 27. FA polímeros termoplásticos	39
Figura 28. FA polímeros termoestables (resinas)	39
Figura 29. FA metálica	40
Figura 30. FA cerámica	40
Figura 31. FA de tejidos y células o bio-impresión 3D	41
Figura 32. Técnicas impresión 3D [24]	41
Figura 33. Esquema tecnología FDM [24]	42
Figura 34. Tipos impresoras para FDM [24]	44
Figura 35. Esquema tecnología SLA [24]	45
Figura 36. Esquema tecnología DLP	45
Figura 37. Proceso de tecnología MJF [24]	46
Figura 38. Ajustes de guardado para archivos .stl o .3MF	47
Figura 39. Flujo de trabajo para procesos de FA [28]	48
Figura 40. Comparativa de densidades para la base del modelo en FA	48
Figura 41. Proceso de eliminación de soportes	49
Figura 42. Orientación de modelos para impresión con resina	49
Figura 43. Relleno interior modelos 3D (estructuras lattice)	50
Figura 44. Comparativa impresión con filamento y resina	53
Figura 45. Proceso de fundición al modelo perdido	54
Figura 46. Uso de la fabricación al modelo perdido para joyería	55
Figura 47. Turbina fabricada mediante fundición al modelo perdido	55
Figura 48. Fabricación al modelo perdido para la fabricación de prótesis dentales	55
Figura 49. Coste unitario de fabricación en función del nº de piezas por lote. (Fuente: [35])	56
Figura 50. Configuración 1 del entorno para fotogrametría y malla tridimensional obtenida	61

Figura 51. Configuración 2 del entorno para fotogrametría y malla tridimensional obtenida	62
Figura 52. Configuración 3 del entorno para fotogrametría y malla tridimensional obtenida	63
Figura 53. Resultado de alineación y solapamiento de los diferentes escaneados	65
Figura 54. Creación de entidades geométricas de referencia en VXelements.....	66
Figura 55. Estudio de la desviación dimensión de la malla frente a la superficie CAD ideal	67
Figura 56. Útil y tornillos de medición.....	68
Figura 57. Modelo final CAD tras los ajustes realizados a la malla escaneada	69
Figura 58. Diseño CAD realizado manualmente.....	70
Figura 59. Conjunto de Ensamble en patinete	71
Figura 60. Esquema para funcionalidad de los orificios	72
Figura 61. Ángulo de aplicación de la fuerza de frenado.....	76
Figura 62. Esquema de cargas del sistema de frenado	77
Figura 63. Ángulo de inclinación de la suspensión frente al eje longitudinal.....	79
Figura 64. Sistema de cotas para el cálculo de la fuerza de suspensión.....	80
Figura 65. Caracterización aluminio L-2560 en Solid Edge	82
Figura 66. Aplicación de fuerzas para el estudio de simulación	83
Figura 67. Resultado simulación con Solid Edge.....	84
Figura 68. Zonas preservadas durante la optimización	86
Figura 69. Aplicación de cargas puntuales para la optimización	87
Figura 70. Aplicación de cargas distribuidas para la optimización.....	88
Figura 71. 1ª iteración OT	89
Figura 72. 2ª Iteración OT	89
Figura 73. 3ª Iteración OT	89
Figura 74. Parámetros de optimización	90
Figura 75. Solución del modelo optimizado por Solid Edge.....	90
Figura 76. Resultado de la malla tras el uso de Altair.....	92
Figura 77. Opciones de importación de archivo Parasolid (.x_t)	93

Figura 78. Modelo CAD final pre-fabricación	94
Figura 79. Comprobación de cargas en la geometría optimizada.....	95
Figura 80. Vista previa del laminado del Modelo Optimizado	102
Figura 81. Vista previa del laminado de la Base	102
Figura 82. Eliminación manual de soportes	104
Figura 83. Sellado periférico de la caja troquelada para la contención del revestimiento refractario.....	107
Figura 84. Encofrado temporal del molde durante la fase líquida el fraguado a temperatura ambiente	108
Figura 85. Secuencia operativa para la preparación de revestimiento refractario.....	111
Figura 86. Llenado de las cajas de contención usando el revestimiento cerámico	112
Figura 87. Moldes refractarios en su etapa de fraguado.....	113
Figura 88. Introducción del molde refractario en el horno de mufla para la evacuación del patrón calcinable.....	116
Figura 89. Presencia de cenizas en los canales de alimentación	117
Figura 90. Disposición de la materia prima en el interior del crisol	118
Figura 91. Fusión del metal base en horno de resistencias.....	119
Figura 92. Colada por gravedad de la aleación de aluminio	119
Figura 93. Desmoldeo del revestimiento cerámico mediante agua	120
Figura 94. Modelo en Aluminio obtenido tras la fundición	122
Figura 95. Resultado en detalle de la fundición con inclusiones de ceniza.....	122
Figura 96. Presupuesto comercial de manufactura aditiva directa de metal (DMLS).....	133

Índice de tablas

Tabla 1. Comparativos fotogrametría vs escáner	29
Tabla 2. Costes impresora FDM.....	56
Tabla 3. Costes impresora SLA.....	57
Tabla 4. Historial de optimizaciones	89
Tabla 5. Parámetros de impresión del modelo por FDM	98
Tabla 6. Parámetros de impresión de la Base por FDM.....	100
Tabla 7. Parámetros cuantitativos de fabricación aditiva.....	103
Tabla 8. Costes fijos de diseño y optimización	126
Tabla 9. Datos amortización impresora FDM tamaño medio	127
Tabla 10. Costes de impresión FDM asociados al modelo optimizado	127
Tabla 11. Costes de impresión FDM asociados a la base-soporte	128
Tabla 12. Desglose de costes asociados al proceso de fundición.....	129

Lista de acrónimos

ICAI: Instituto Católico de Artes e Industrias

ETS: Escuela Técnica Superior

TFG: Trabajo Fin de Grado

CAD: Computer-Aided Design / Diseño Asistido por Ordenador

OT: Optimización Topológica

SIMP: Solid Isotropic Material with Penalization

RAMP: Rational Approximation of Material Properties

IA: Inteligencia Artificial

MDT: Modelos Digitales del Terreno

ToF: Time of Flight / Tiempo de Vuelo

ESO: Evolutionary Structural Optimization

BESO: Bi-directional Evolutionary Structural Optimization

FA: Fabricación Aditiva

FDM: Fused Deposition Modeling / Modelado por Deposición Fundida

SLA: Stereolithography / Estereolitografía

DLP: Digital Light Processing / Procesamiento Digital de Luz

MJF: Multi Jet Fusion

STL: Standard Triangle Language / Formato de malla triangular estándar

3MF: 3D Manufacturing Format / Formato de Fabricación 3D

FEM: Finite Element Method / Método de los Elementos Finitos

VMP: Vehículo de Movilidad Personal

DGT: Dirección General de Tráfico

ODS: Objetivos de Desarrollo Sostenible

LiDAR: Light Detection and Ranging / Escaneo por luz y rango

UV: Ultravioleta

FABLAB: Laboratorio de Fabricación Aditiva (ICAI)

PLA: Ácido Poliláctico

SLM: Selective Laser Melting / Fusión Selectiva por Láser

EBM: Electron Beam Melting / Fusión por Haz de Electrones

IGES / .igs: Initial Graphics Exchange Specification / Formato estándar de intercambio de gráficos

CNC: Control Numérico Computarizado

PolyNURBS: Non-Uniform Rational B-Splines polinomiales

DMLS: Direct Metal Laser Sintering

AMS: Sistema Automático de Materiales

1. INTRODUCCIÓN

1.1 CONTEXTO DE LA MOVILIDAD URBANA

El transporte constituye uno de los pilares fundamentales de la sociedad contemporánea, hasta el punto de que las administraciones públicas destinan una parte significativa de sus presupuestos a la optimización de las infraestructuras y al fomento del transporte público, como el metro y el autobús. No obstante, la dependencia diaria de estos medios por parte de la población urbana ha generado nuevas necesidades de movilidad, orientadas a agilizar los desplazamientos de corto y medio recorrido.

En este escenario emergen los Vehículos de Movilidad Personal (VMP), Término empleado por la Dirección General de tráfico (DGT) para definir aquellos vehículos de una única plaza, propulsados exclusivamente por motores eléctricos y cuya velocidad máxima de diseño no sobrepasa los 25 km/h. Dentro de esta categoría, el patinete eléctrico destaca como el exponente principal. Su adopción masiva se inició hacia el año 2017, impulsada por el lanzamiento de modelos comerciales de referencia como el Xiaomi Electric Scooter, Y posteriormente tras la aparición de empresas dedicadas al alquiler temporal de este tipo de VMP.

En la actualidad, Estos vehículos han trascendido su concepción inicial de ocio para consolidarse como un medio de transporte prioritario incluso como una herramienta de trabajo. De forma paralela, el mercado evolucionado hacia segmentos de mayores prestaciones, como modelos diseñados para terrenos no pavimentados (off-road) capaces de alcanzar velocidades que superan ampliamente los límites urbanos convencionales. Esta diversificación evidencia en la industria ya no demanda únicamente soluciones de bajo coste (Low-cost) para uso recreativo, sino componentes de alta fiabilidad. Por consiguiente, se requiere un estudio de ingeniería integral que permita optimizar las capacidades estructurales y funcionales de estos vehículos, garantizando su eficiencia y seguridad en los nuevos escenarios de uso.

1.2 IMPORTANCIA DEL DISEÑO ESTRUCTURAL EN VEHÍCULOS LIGEROS

El sector de la micro movilidad eléctrica es posible diferenciar 3 segmentos principales en función de sus prestaciones y uso: la gama urbana o estándar, la gama media y, finalmente, la gama de altas prestaciones u off-road. Es en estos dos últimos grupos donde componentes como el basculante trasero y el sistema de suspensión adquieren una mayor relevancia, debido a que el vehículo se somete a condiciones de carga y fatiga significativamente más exigentes.

En el ámbito de la ingeniería de diseño, la optimización geométrica persigue un equilibrio preciso entre 3 pilares: ligereza, resistencia mecánica y durabilidad. El avance hacia modelos con una mayor eficiencia dinámica requiere maximizar la relación potencia-peso, lo que no solo mejora la maniobrabilidad y la respuesta del vehículo, sino que reduce el consumo energético.

No obstante, en el paradigma industrial actual, el valor de un proyecto no reside únicamente en las prestaciones del producto final. El diseño debe integrarse en un análisis de ciclo de vida que considere factores críticos como los procesos de producción, la logística de distribución, la eficiencia energética de fabricación y la gestión de proveedores. Bajo este enfoque, las organizaciones se ven Empujadas a cumplir con normativas ambientales cada vez más estrictas que regulan la emisión de gases de efecto invernadero, la generación de residuos industriales y las tasas de reciclabilidad del material.

Por consiguiente, el presente Trabajo de Fin de Grado no se limita exclusivamente al rediseño funcional del componente; también integra una visión de sostenibilidad orientada a la economía circular. Mediante la optimización topológica y la elección del proceso de fabricación, se busca una reducción sustancial en el consumo de materias primas y una minimización del material de desecho, factores que representan un beneficio directo tanto para la viabilidad económica de la empresa como para su impacto medioambiental.

1.3 INTRODUCCIÓN AL DISEÑO GENERATIVO

Uno de los pilares fundamentales de este proyecto es lograr mediante la optimización topológica (OT) una reducción de masa, teniendo en cuenta al mismo tiempo la viabilidad tanto económica como de tiempos de fabricación del proyecto. Asimismo, se ha podido observar en diversos estudios como no solo el cambio de geometría, sino también el cambio a un material adecuado puede reducir el módulo de Young para determinadas aplicaciones donde se pretenda una mayor absorción de la energía tras cargas dinámicas, vibraciones o una mayor tolerancia a la fatiga. [1] Esta técnica se encuentra en expansión y actualmente se emplea en diversos sectores para lograr mejoras en diversos productos donde esta tecnología pueda aplicarse. Como por ejemplo la industria aeroespacial, la automotriz, biomédica o en la construcción [2].

La optimización topológica constituye un estudio complejo de cargas, restricciones y la distribución de material para obtener estructuras eficientes. Dicho estudio puede llevarse a cabo mediante diferentes métodos. En este proyecto se empleará la herramienta solidEdge que utiliza los métodos SIMP (Solid Isotropic Material with Penalization) y RAMP (Rational Approximation of Material Properties) ambos basados en el método de optimización de densidades, haciendo uso del método de los elementos finitos como técnica de análisis para la optimización topológica de las piezas. [3]

Para poder entender cómo se podría aplicar esta herramienta en el proyecto y entender al tipo de soluciones a las que se podría llegar, se ha pedido a la inteligencia artificial (IA) Gemini, que a partir de una imagen del modelo inicial del que se parte, genere cómo podría verse la pieza una vez ya optimizada. Su respuesta ha sido la siguiente: [4]

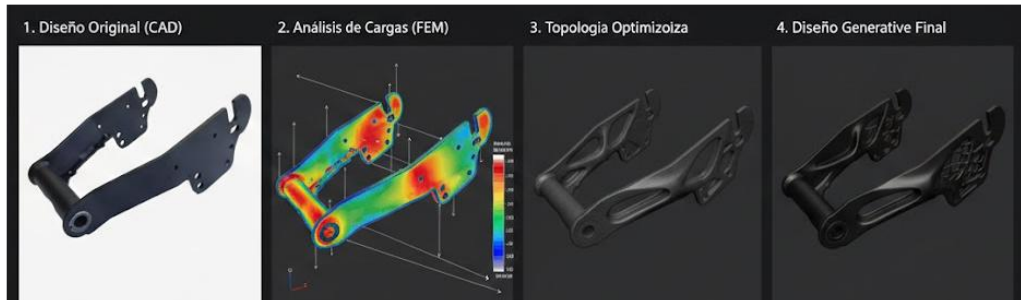


Figura 1. Ejemplo de flujo de trabajo propuesto para la OT (Elaboración propia mediante Gemini AI)

1.4 MOTIVACIÓN

En un mundo en transición ecológica donde el ahorro de energía y materias primas es cada vez más relevante, la aplicación de técnicas avanzadas resulta algo imprescindible para seguir avanzando.

Además, nos encontramos en unos tiempos donde cada vez se ven más coches y automóviles eléctricos o híbridos que nos conducen a estos tiempos de transición hacia la movilidad sostenible. Este proyecto pretende seguir esta misma corriente optimizando la geometría reduciendo así el peso y la materia prima necesaria, además de que como consecuencia se disminuirá el consumo energético en su transporte.

En el caso específico del patinete eléctrico, estas mejoras se traducen en un incremento de la autonomía de las baterías y en una optimización de la respuesta dinámica del vehículo. La reducción de masas no suspendidas mejora la maniobrabilidad y el comportamiento estructural frente a aceleraciones, pendientes y vibraciones, elevando los estándares de confort y seguridad.

Por todo ello, considero que es un proyecto con expectativas altas que busca mejorar un elemento importante del vehículo. A pesar de que los efectos globales en el patinete no serán tan notables, en el campo de la ingeniería incluso una mínima mejora, necesita mucho tiempo, inversión y esfuerzo.

1.5 OBJETIVOS

El objetivo principal de este Trabajo de Fin de Grado consiste en analizar los estados de carga y las tensiones estructurales que soporta el basculante trasero de un patinete eléctrico. Este estudio tiene como finalidad la optimización de su geometría, de modo que se garantice su integridad estructural al tiempo que se aportan diversos beneficios funcionales.

De manera complementaria, el proyecto implementa el proceso de fundición a la cera perdida para la fabricación del componente. El desarrollo del trabajo permite comparar costes y tiempos de producción entre los métodos convencionales y el proceso propuesto en este trabajo.

A pesar de que este proceso es claramente más costoso que los que se emplean actualmente debido a el método utilizado, al número de prototipos que se piensa fabricar y a la geometría que se obtendrá, será importante evaluar las mejoras de peso, resistencia y el efecto secundario en la autonomía del vehículo. De esta manera, se tienen criterios para poder determinar si la pieza producida cumple el objetivo principal de mejorar el rendimiento frente a las actuales.

1.6 OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE (ODS)

En 2015, los 193 Estados Miembros de las Naciones Unidas aprobaron el plan de la Agenda 2030 para el desarrollo sostenible. En ella se establecen los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODA) que buscan erradicar la pobreza, proteger el planeta y equilibrar tanto la sociedad como el medio ambiente. Este proyecto busca comprometerse con algunos de estos objetivos contribuyendo a transformar el mundo y lograr un futuro más sostenible.

Dado que el principal objetivo es mejorar las características de un vehículo eléctrico, se contribuye directamente a varios ODS relacionados con la energía limpia y sostenible como los son los objetivos: 7, energía asequible y no contaminante; 11, ciudades y comunidades

sostenibles; y el 13, acción por el clima.



Figura 2. ODS 7



Figura 3. ODS 11



Figura 4. ODS 13

Asimismo, dado que se trata de un proyecto que pretende aportar mejoras y beneficios mediante nuevas técnicas de diseño e innovación, también se relaciona con el objetivo 9, industria, innovación e infraestructuras.



Figura 5. ODS 9

Por último, dado que la optimización por elementos finitos permite poder eliminar precisamente aquel material no necesario durante el estudio de cargas, reduciendo la cantidad de materia prima utilizada para la fabricación de dichas piezas. Por dicho motivo, el proyecto también contribuye al ODS 12, producción y consumo responsable.



Figura 6. ODS 12

1.7 METODOLOGÍA DEL PROYECTO

La ejecución del presente proyecto se ha estimado en una duración aproximada de 5 meses y medio, lo que comprende un total de 22 semanas de actividad. Durante la fase inicial, se puso especial énfasis en establecer una sólida base teórica, así como en la adquisición de competencias técnicas en el manejo de las diversas aplicaciones y entornos de software empleados durante el desarrollo del trabajo. Una vez definidos los objetivos y el marco metodológico, se procedió a implementar un flujo de trabajo sistemático (ver diagrama de flujo de tareas).

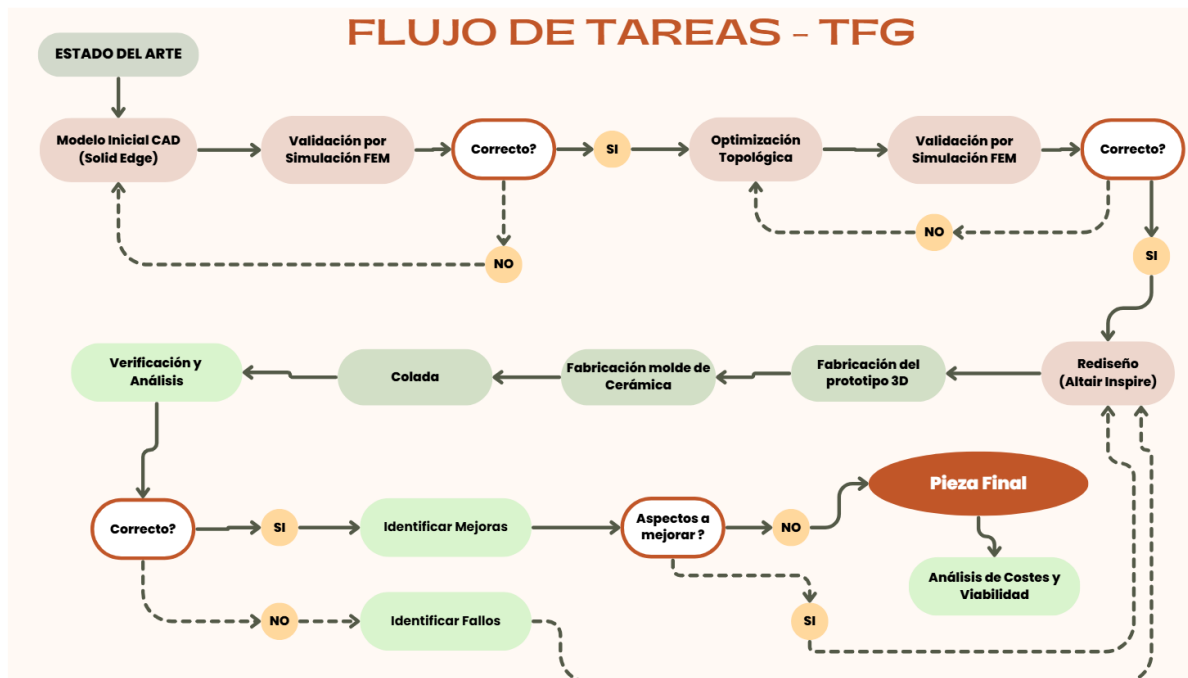


Figura 7. Flujo de Tareas

En las primeras etapas, el avance se caracterizó por un enfoque cauteloso y detallado; se priorizó la precisión en el modelo inicial para evitar la propagación de errores estructurales que pudieran comprometer la viabilidad de las fases posteriores. Bajo esta premisa, el mes de marzo se dedicó íntegramente al proceso de digitalización y diseño CAD del modelo. Tras alcanzar el Ecuador del cronograma, se inició la fase de optimización topológica

mediante cálculo computacional. Dada la complejidad de las superficies y la necesidad de un análisis riguroso del Estado de cargas, esta etapa requirió una inversión significativa de tiempo y una supervisión exhaustiva para garantizar la convergencia de los resultados. Finalmente, las fases de fabricación y análisis de resultados se desarrollaron de manera solapada, permitiendo así una transición fluida hacia la etapa de revisión final y cierre de la memoria del proyecto.

PLANIFICACIÓN SEMANA	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO
ANEXO B						
ESTADO DEL ARTE						
DIGITALIZACIÓN Y DISEÑO CAD						
ESTADO DE CARGAS						
OPTIMIZACIÓN DEL MODELO						
FABRICACIÓN						
ANÁLISIS DEL PROYECTO						
MEMORIA						

Figura 8. Cronograma

2. ESTADO DEL ARTE

Antes de comenzar con el desarrollo práctico del proyecto, es necesario establecer el marco teórico y las tecnologías que se van a utilizar. En este capítulo se detalla la investigación realizada antes de empezar el trabajo, así como los puntos clave extraídos de estudios y artículos anteriores. El objetivo es aprovechar los conocimientos ya existentes para evitar fallos previos y poder aportar mejoras dentro del campo de los vehículos de movilidad personal.

2.1 INGENIERÍA INVERSA APLICADO AL DISEÑO MECÁNICO

En el ámbito del diseño mecánico, el flujo de trabajo suele seguir una estructura constante. Sin embargo, la gran variedad de piezas y geometrías existentes exige que tanto el diseño como la fabricación se adapten a las características específicas del resultado final. En las etapas iniciales de estos proyectos, la ingeniería inversa desempeña un papel fundamental; es el proceso que permite estudiar un producto ya fabricado para comprender su diseño y comportamiento, facilitando así su adaptación a nuevas necesidades.

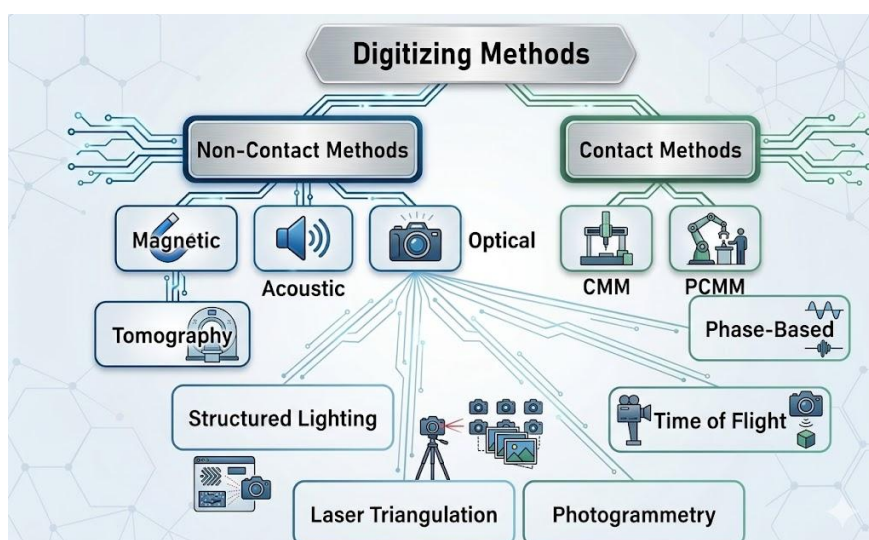


Figura 9. Tipos de ingeniería inversa

Cuando trabajamos con modelos de geometría compleja, el primer paso consiste en la digitalización de la pieza. Para ello, existen diversas técnicas que varían en función de la precisión, la rapidez y los costes que el proyecto pueda asumir. En este caso, aunque el laboratorio dispone de recursos para realizar ingeniería inversa mediante métodos por contacto, se ha optado por el uso de métodos ópticos, priorizando las ventajas que estos ofrecen para el tipo de componentes analizados.



Figura 10. Métodos ópticos de ingeniería inversa

2.1.1 FOTOGRAMETRÍA

La fotogrametría es una de las técnicas más extendidas en la ingeniería inversa para la obtención de modelos 3D a partir de fotografías bidimensionales. Su principal ventaja competitiva es el bajo coste, ya que solo requiere una cámara, un software de digitalización y una herramienta de tratamiento de mallas.

Para garantizar un resultado óptimo, la fase de preparación es crítica y se divide en 3 pilares fundamentales:

- **Preparación de la pieza y soportes:** el objeto debe situarse de forma que los puntos de apoyo sean mínimos, facilitando así la captura de toda su geometría con los menos cambios de posición posibles.
- **Tratamiento de superficies:** dado que la fotogrametría presenta sus puntos débiles con detalles muy pequeños o superficies brillantes, es común simplificar geometrías complejas manualmente para corregirlas después en el diseño. En el caso de materiales metálicos o reflectantes, es necesario aplicar sprays antirreflejo para obtener un acabado mate, permitiendo que el software identifique correctamente los puntos de control.
- **Control del entorno:** se debe trabajar en un espacio con iluminación moderada y constante, evitando fondos con excesivo 'ruido visual' que puedan confundir a los algoritmos de reconocimiento. En este punto, resulta indispensable aportar puntos de referencia al sistema, conocidos como 'targets'. Estos elementos sirven como marcadores que el software utiliza para localizar con precisión la dirección y la distancia desde la cual se ha tomado cada fotografía, facilitando enormemente su integración en la nube de puntos global.

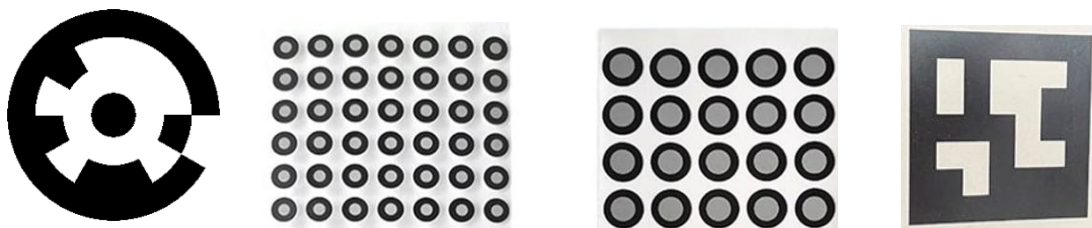


Figura 11. Targets para escaneado óptico

Una vez preparado el escenario, el proceso de captura se puede realizar mediante: drones Para superficies o terrenos grandes, cámaras profesionales o simplemente con dispositivos móviles. [5] El éxito del escaneado reside la cantidad y calidad de las tomas; se recomienda realizar al menos 80 fotografías con una superposición mínima del 60% entre ellas. Este solapamiento permite al software detectar puntos comunes o de interés y reconstruir la profundidad de la pieza con precisión. [6]

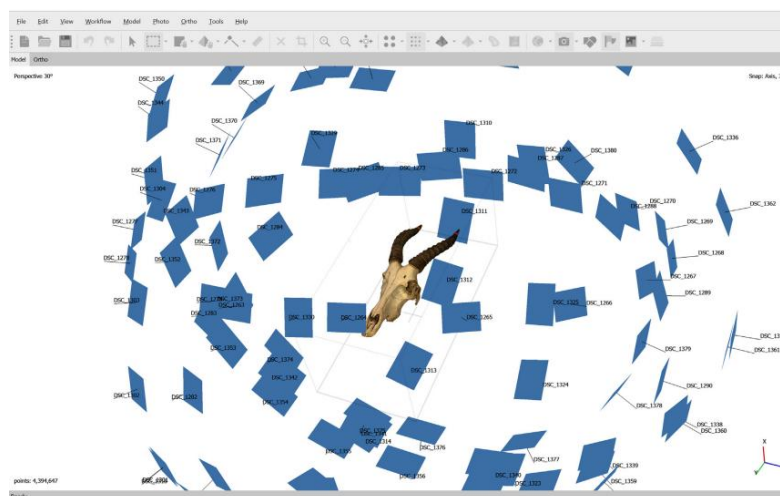


Figura 12. Conjunto de imágenes tomadas para la digitalización de un cráneo animal

Finalmente, el proceso concluye con el postprocesado de la malla. En esta etapa se utilizan aplicaciones específicas para cerrar huecos, pulir imperfecciones y corregir zonas donde la captura no ha perfecta, obteniendo así un modelo digital sólido y utilizable.

2.1.2 ESCANEADO LÁSER

El láser, acrónimo en inglés de “*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*”, Constituye una técnica de medición no destructiva y sin contacto que emplea un haz de luz estrecho y de longitud de onda determinada para capturar la geometría de objetos físicos. Al igual que otros métodos de digitalización óptica, su objetivo principal es representar una nube de puntos tridimensional a partir de la interacción de múltiples escaneos bidimensionales.

A diferencia de los métodos pasivos, este sistema se fundamenta en un sensor activo, lo que permite que el propio escáner emita su fuente de energía para iluminar el objeto. [7] Este método es ampliamente utilizado en la industria debido a su celeridad y su capacidad de abarcar un extenso rango de geometrías y profundidades. Por este motivo se emplea tanto en aplicaciones de gran escala para la digitalización de infraestructuras o la creación de

Modelos Digitales del Terreno (MDT) en ámbitos como la cartografía, topografía (escáneres LiDAR) [8], ingeniería civil y arquitectura entre otros. Así mismo dadas sus características, resulta idóneo para una amplia variedad de aplicaciones industriales y médicas que requieren una elevada precisión.



Figura 14. Escáner de mano



Figura 13. Escáner LiDAR

Los proyectos de ingeniería requieren el conocimiento de ciertos parámetros y características que permitan la comparabilidad entre distintos métodos, técnicas o ensayos. Para realizar un análisis riguroso en este estudio, es importante atender a factores como la precisión, resolución, rango, tiempo, costes y manufacturabilidad. A continuación, se detallan los tres conceptos que se consideran más críticos y novedosos en esta: [9]

- **Precisión:** Se define como el grado de similitud entre el modelo digital desarrollado y el objeto físico medido. Este término está intrínsecamente ligado al concepto de incertidumbre, ya que establece el intervalo de confianza en el que se encuentra una medida tras considerar los posibles errores sistemáticos y aleatorios del sistema.

- **Resolución:** Es la distancia o separación mínima entre los puntos capturados por el digitalizador. Este parámetro mantiene una relación directa con la fidelidad del detalle obtenido, pero presenta una relación inversa con el tiempo de procesado y el coste del equipo.
- **Rango:** Se refiere a la distancia operativa (mínima y máxima) a la que puede situarse el escáner respecto a la pieza para garantizar una lectura de datos óptima [10].

En este contexto, intervienen los distintos sistemas de medida que definen las ecuaciones físico-matemáticas necesarias para que el sensor determine la posición de un punto en el espacio. La distinción principal radica en que los sistemas basados en el tiempo utilizan la velocidad de la luz como parámetro fundamental, siendo óptimos para medidas o distancias largas, permitiendo así alcances de hasta 1000m con una precisión inferior a los 2cm. Mientras que los sistemas de triangulación se fundamentan en principios trigonométricos y son capaces de medir con una precisión superior ($<1\text{mm}$). Por el contrario, este instrumento debe encontrarse a una separación nunca mayor de 5 metros de distancia con respecto al objeto de estudio, lo que limita su utilización a objetos pequeños y muy enfocado a aplicaciones industriales. A continuación, se describen detalladamente estas técnicas:

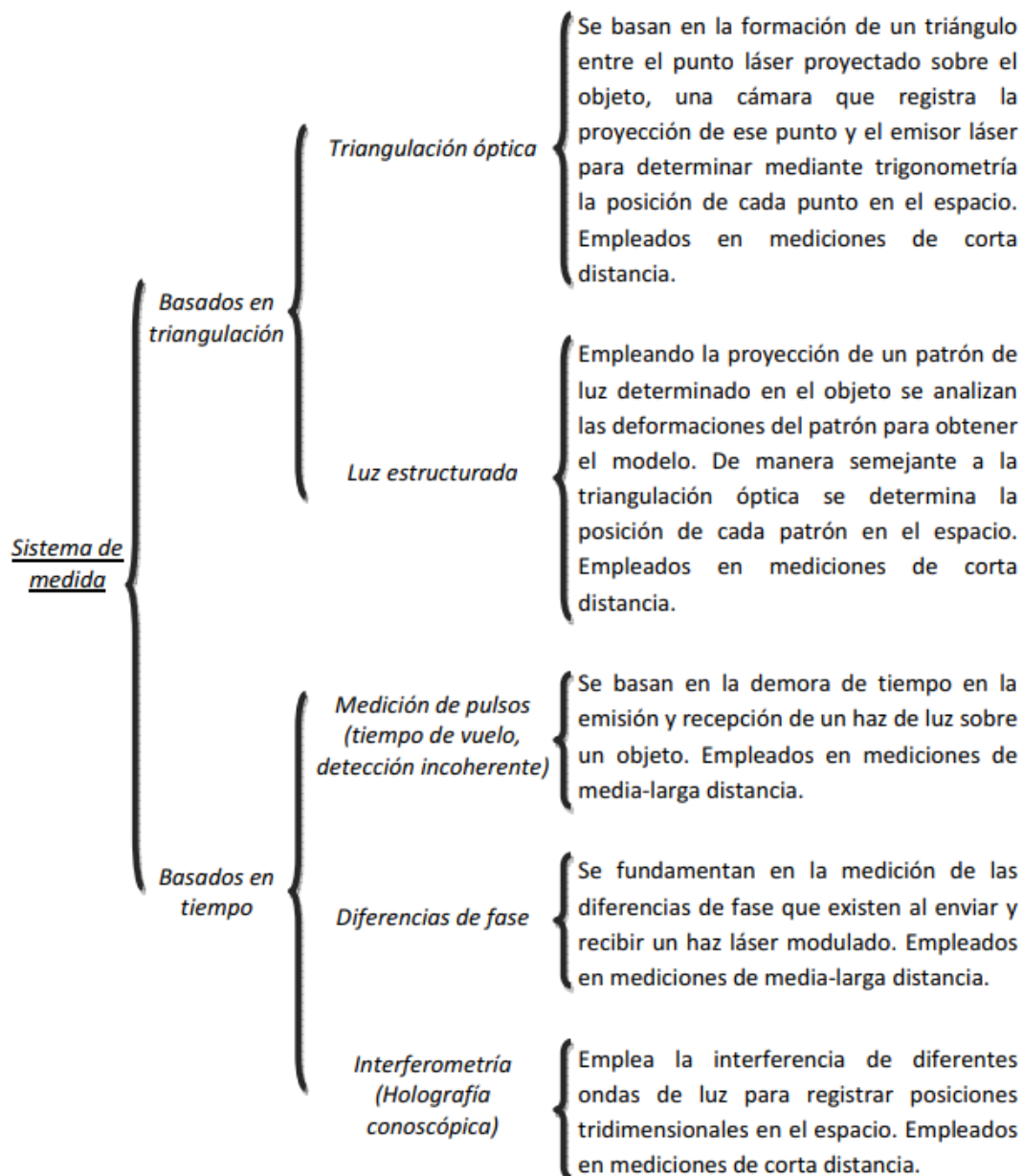
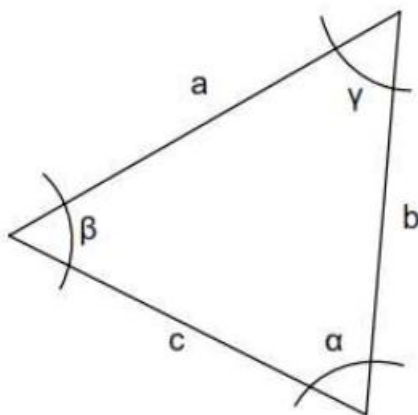


Figura 15. Esquema sistemas de medida láser.
(TFM Adrián Martínez Fernández, UPM, 2015)

Entre los diversos modelos de escáneres disponibles, es posible distinguir tres categorías principales en función de su sistema de barrido; factor determinante para establecer la estrategia de captura de datos: [11]

- **Sistema de cámara:** Se caracteriza por un barrido limitado a un campo de visión específico, con un ángulo de captura máximo que suele situarse en los 60°x60°.
- **Sistema panorámico:** Permite la deflexión del haz láser en los ejes X y Z, facilitando un barrido casi integral del entorno. Este método es capaz de cubrir 360° en el plano horizontal y hasta 310° en el vertical.
- **Sistema híbrido:** Constituye una solución intermedia entre los dos anteriores, en la cual el haz de luz se desplaza de forma controlada en el eje vertical mientras que el cuerpo del sistema realiza pequeños giros en el eje horizontal.

Dadas las dimensiones de la pieza de estudio (200x150 mm), se ha optado por un sistema de digitalización cuya lógica de medición se basa en la triangulación óptica. Para comprender el funcionamiento de estos instrumentos, lo principal, es recordar ciertas ecuaciones de la trigonometría plana que fundamenta el método como lo son los teoremas del seno y del coseno.



$$\frac{a}{\sin(\alpha)} = \frac{b}{\sin(\beta)} = \frac{c}{\sin(\gamma)}$$

$$a^2 = b^2 + c^2 - 2b.c.\cos(\alpha)$$

$$c = a.\cos(\beta) + b.\cos(\alpha)$$

Figura 16. Fundamentos trigonométricos

El sistema construye un triángulo físico cuyos vértices son: la fuente emisora (láser), el punto de incidencia sobre la superficie de la pieza y el centro óptico del receptor (Cámara CCD/CMOS). La distancia fija entre el emisor y el receptor se denomina distancia base ‘D’. Matemáticamente, se puede demostrar que la precisión del sistema está ligada a la geometría de este triángulo: una mayor distancia base ‘D’ reduce el error de estimación de la profundidad, mientras que un aumento en la distancia operativa (separación entre el escáner y la pieza) penaliza la exactitud de la medida. Todos estos cálculos son realizados internamente por el software del sistema para cada uno de los puntos que forman la línea o rejilla láser proyectada sobre la pieza, permitiendo la generación de la nube de puntos en tiempo real.



Figura 17. Proyección de rejilla láser sobre pieza

Más allá de las limitaciones ópticas ante superficies especulares o brillantes —subsanables mediante el uso de sprays matizadores—, el principal desafío técnico son las oclusiones o zonas de sombra. Estas se producen cuando la geometría de la pieza impide que el receptor tenga línea de visión sobre el punto iluminado por el láser (o viceversa). Por ello, el control del entorno, la iluminación ambiental y la planificación de las trayectorias de barrido son críticos para minimizar el ruido visual y garantizar la integridad de la nube de puntos.

2.1.3 COMPARATIVA FOTOGRAMETRÍA VS ESCÁNER LÁSER

Como se ha mencionado anteriormente, tanto el escaneado láser como la fotogrametría (también denominada soluciones multi-imagen) están orientados a resolver problemas similares ofreciendo resultados comparables. No obstante, surge la cuestión de qué método es más adecuado elegir.

Se han realizado múltiples comparativas en diversos entornos para digitalizar objetos y espacios de todo tipo de tamaños, texturas y geometrías. En este sentido, cabe destacar la importancia de la fase de preparación previa y la calidad del equipo utilizado en el método multi-imagen; por ejemplo, una cámara de dispositivo móvil puede generar imágenes poco nítidas que dificulten el procesamiento del software, mientras que con una cámara profesional este inconveniente es mucho menos frecuente.

A continuación, se presenta una tabla comparativa que detalla las características básicas y las aplicaciones recomendadas para cada método, facilitando la toma de decisiones en función de los recursos disponibles y los resultados esperados. Cabe señalar que en esta comparativa se distingue entre los modelos láser basados en triangulación y aquellos basados en tiempo de vuelo (ToF). [12]

	Escáner triangulación <i>Triangulating Scanner</i>	Escáner (tiempo de vuelo) <i>Laser Scanner (time of flight)</i>	Fotogrametría automatizada <i>Automated photogrammetry</i>
Coste económico <i>Economic cost</i>	Medio <i>Medium</i>	Alto <i>High</i>	Bajo <i>Low</i>
Tiempo elaboración <i>Implementation time</i>	Muy alto <i>Very long</i>	Alto <i>Long</i>	Bajo <i>Short</i>
Dificultad <i>Level of difficulty</i>	Alta <i>High</i>	Alta <i>High</i>	Baja <i>Low</i>
Tiempo postproducción <i>Post-production time</i>	Muy alto <i>Very long</i>	Muy alto <i>Very long</i>	Bajo <i>Short</i>
Precisión <i>Level of accuracy</i>	Muy alta <i>Very high</i>	Alta <i>High</i>	Alta <i>High</i>
Resultado <i>Results</i>	Óptimo <i>Optimum</i>	Óptimo <i>Optimum</i>	Óptimo <i>Optimum</i>
Mejor aplicación <i>Best application</i>	Proximidad <i>Close up</i>	Media y larga distancia <i>Medium-long distance</i>	Complementario <i>Complementary</i>
Peor aplicación <i>Worst application</i>	Grandes objetos o de difícil acceso <i>Large objects or ones that are difficult to access</i>	Objetos pequeños y con detalle <i>Small, detailed objects</i>	Objetos sin cambio tonal <i>Objects without tonal variation</i>

Tabla 1. Comparativos fotogrametría vs escáner
(Pablo Rodríguez Navarro, revista científica UPV, 2013)

Las **conclusiones** son determinantes: aunque la fotogrametría no alcanza el nivel de precisión milimétrica del escáner láser, ofrece otros beneficios significativos. Resulta un sistema más competitivo en términos de inversión económica, amortización de equipos y eficiencia, tanto en la toma de datos como en los tiempos de postproducción. [13]

2.2 DISEÑO GENERATIVO

El diseño generativo representa una nueva forma de abordar la creación y construcción de objetos desde diversas perspectivas. Se trata de una metodología de diseño asistido por ordenador que permite explorar automáticamente múltiples alternativas a partir de objetivos, restricciones y parámetros definidos por el diseñador; entre ellos, requisitos geométricos, materiales y métodos de fabricación. [14]

A través de esta herramienta, es posible generar numerosas variantes e identificar aquellas opciones que satisfagan requisitos específicos, como puede ser la optimización o reducción del peso. Con frecuencia, este proceso da como resultado formas orgánicas similares a las estructuras presentes en la naturaleza. [15]



Figura 18. Comparación de resultados de diseño generativo con distintos procesos de fabricación [16]

2.2.4 OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA (OT)

Un estudio topológico emplea un algoritmo iterativo para ejecutar un bucle de optimización que genera la mejor forma posible en función de la información especificada, como las cargas, restricciones y condiciones de contorno.

Por tanto, aunque suele confundirse con el diseño generativo, la optimización topológica es una técnica incluida dentro de este, siendo el diseño generativo un campo más amplio que engloba diferentes métodos de optimización. [17]

A continuación, se muestra un posible diagrama de trabajo (incompleto a falta de procesos posteriores a la optimización), similar al que se empleará durante el desarrollo de este proyecto. En este punto, resulta fundamental centrarse en todas las especificaciones incluidas dentro del recuadro que señala hacia el cuadro de texto de optimización topológica.

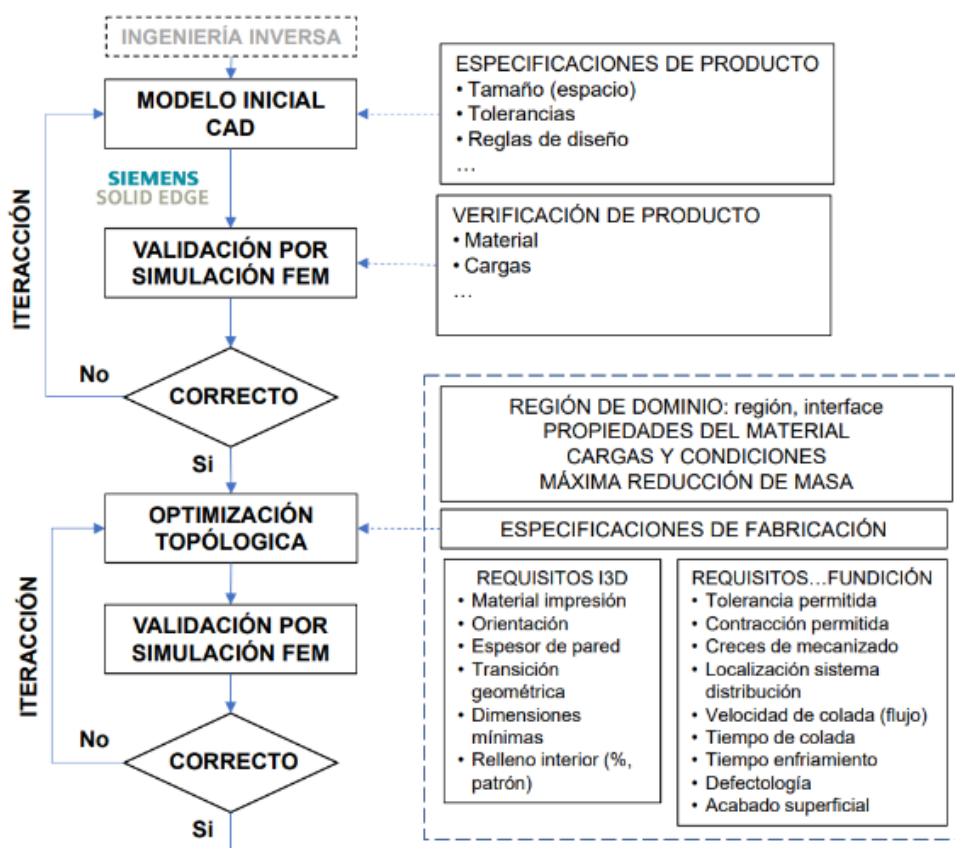


Figura 19. Flujo de trabajo OT (Fuente: Departamento de Diseño y Fabricación ICAI)

2.2.5 MÉTODOS BASADOS EN SIMULACIÓN

Habitualmente, tras introducir las condiciones sobre el modelo, el método de fabricación, los esfuerzos a los que se somete y el resto de los parámetros necesarios, el propio sistema se encarga del procesamiento de los datos y de la superficie. Para ello, en la mayoría de los casos, los softwares y aplicaciones dedicadas a este tipo de trabajos emplean el Método de los Elementos Finitos (FEM) para descomponer la superficie en puntos y, de este modo, trabajar de forma independiente con cada uno de ellos. [18]

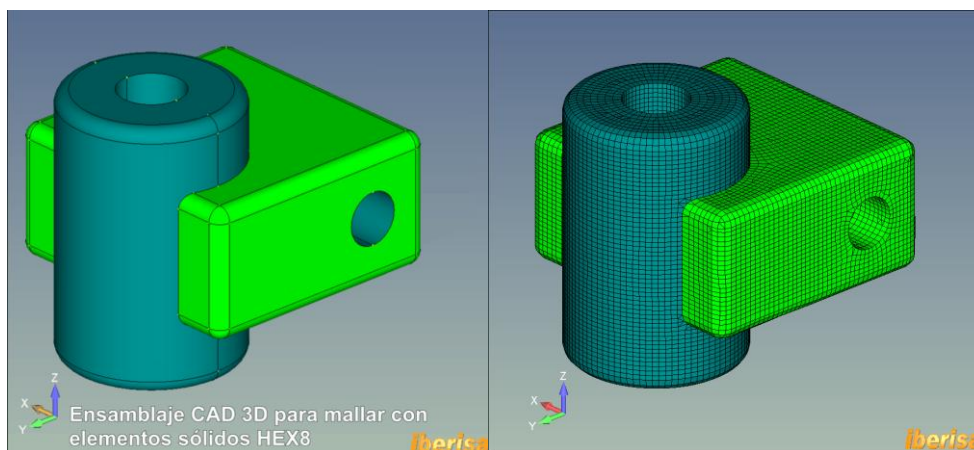


Figura 20. Mallado de pieza por FEM

El método FEM es una herramienta computacional muy utilizada en ingeniería para predecir el comportamiento estructural ante la presencia de cargas; su funcionamiento se basa en dividir la totalidad de la geometría en pequeñas partes llamadas elementos, que en su conjunto forman una malla (Mesh, en inglés). Dado que en el presente proyecto el estudio también se llevará a cabo mediante este método, resulta primordial considerar tanto el tamaño del mallado como su geometría, con el fin de representar fielmente la pieza digitalizada por ingeniería inversa.

- **El tamaño del mallado:** Es sumamente importante, pues define el tiempo de procesamiento de los datos. Un mallado demasiado fino replicaría de forma excelente la pieza, pero multiplicaría el número de elementos a estudiar, lo que ralentizaría la

optimización y exigiría un gran rendimiento gráfico. Por el contrario, un mallado demasiado grueso o sencillo no lograría ajustarse a las zonas con curvatura, obteniendo resultados poco realistas. Por ello, es necesario ajustar la densidad de la malla con herramientas como VxElements, que permiten modificarla manualmente en zonas concretas según convenga.

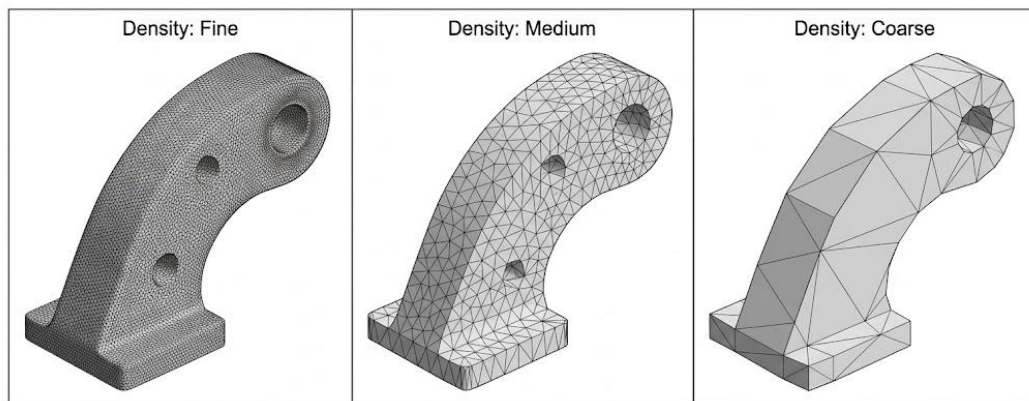


Figura 21. Comparativa de densidad de mallado (Elaboración propia mediante Gemini AI)

- **Geometría del mallado:** Esta es otra característica clave, puesto que una selección inadecuada puede derivar en un mal ajuste en zonas delicadas como agujeros o esquinas. Existen dos tipos principales: el mallado estructurado, caracterizado por una disposición geométrica regular; y el no estructurado, más utilizado para geometrías complejas difíciles de adaptar. Las ventajas de un mallado estructurado radican en una mayor eficiencia computacional y una mayor facilidad en la derivación de ecuaciones. [19]

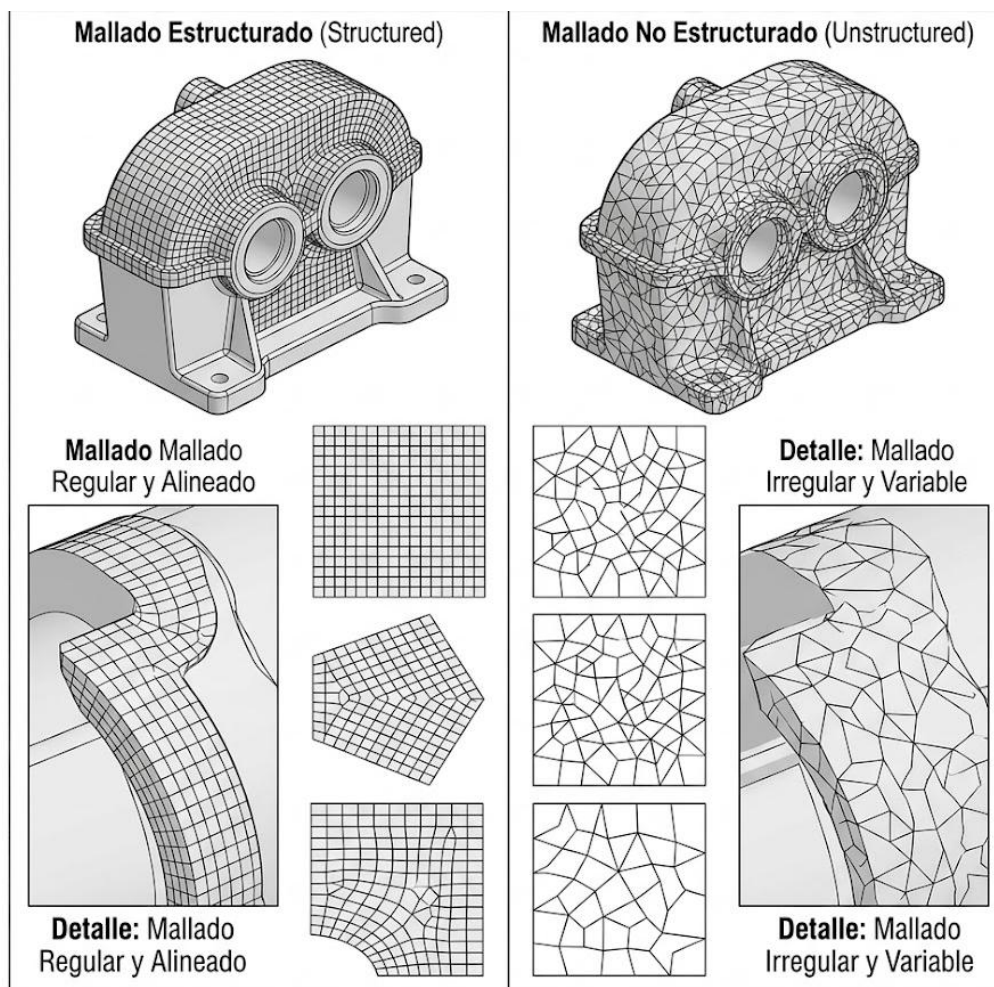


Figura 22. Comparativa mallado estructurado y no estructurado (Elaboración propia mediante Gemini IA)

A partir de este punto, cobran especial importancia los distintos métodos de simulación, dado que son los cálculos matemáticos y procesos algorítmicos que definen las acciones siguiendo una lógica determinada (basada en referencias, reglas matemáticas o en la experiencia). De esta manera, estos algoritmos de optimización redistribuyen el material dentro del dominio de diseño para obtener una estructura más eficiente. [20]

Existen diferentes métodos de optimización topológica, los cuales podemos clasificarlos en dos grupos principales:

- **Métodos basados en criterios de optimidad:** Se enfocan en buscar la mejor solución posible maximizando o minimizando la función objetivo. Entre ellos, el más utilizado es el SIMP (*Solid Isotropic Material with Penalization*), también llamado método de densidades artificiales. Este se basa en asignar a cada elemento una densidad ficticia que varía entre 0 (vacío) y 1 (material sólido). En sus ecuaciones, tanto la rigidez del elemento como su módulo de Young se relacionan mediante un factor de penalización (ρ^p), el cual penaliza las densidades intermedias para forzar una distribución de material binaria (0 o 1). Debido a las limitaciones que presenta este método al generar geometrías suavizadas, surgió la técnica Level-Set. Este enfoque se fundamenta en el mismo principio operativo, con la particularidad de que divide el espacio de diseño en pequeñas regiones cúbicas denominadas «vóxeles». [21]
- **Métodos heurísticos o evolutivos:** son técnicas de resolución de problemas de diseño para encontrar soluciones satisfactorias (aunque no necesariamente óptimas) en un tiempo razonable. A diferencia del anterior criterio, estos solo aplican densidades binarias, es decir 0 o 1 empleando métodos iterativos en los que la estructura evoluciona paso a paso eliminando o añadiendo material en cada iteración.
 - Por un lado, se encuentra el método **ESO** (*Evolutionary Structural Optimization*), propuesto en 1993 por Xie y Steven, el cual retira gradualmente los elementos que soportan un menor esfuerzo estructural.
 - Posteriormente surge el método **BESO** (*Bi-directional Evolutionary Structural Optimization*), que permite tanto eliminar zonas con valores bajos de energía de deformación como añadir elementos en aquellas áreas donde dicha energía es elevada. [22]

2.2.6 SOFTWARES

Según este artículo científico realizado por la Universidad de Trondheim en Noruega (2022) [23], la mayoría de los softwares comerciales más utilizados actualmente para la

optimización topológica se basan, por un lado, en el estudio mediante elementos finitos y, por otro lado, emplean algoritmos de optimización matemática.

Principalmente, el más común es el método SIMP, ya que, según este estudio, aproximadamente el 80-83% de los programas de OT actuales lo emplean. Dentro de este numeroso grupo se encuentran programas como SolidWorks, ABAQUS, SIEMENS NX y Altair OptiStruct. Por otro lado, hay otro grupo de programas más minoritarios que combinan el método SIMP con el Level-Set, como ANSYS.

Por último, nos encontramos con algún software basado en métodos evolutivos como el ESO o el BESO, siendo estos los más comunes dentro de este grupo. Aquí se sitúan aplicaciones como AMEBA que, si bien se emplea de igual manera para trabajos con OT, estas son algo más específicas y están enfocadas más en la investigación.

2.2.7 VENTAJAS Y APLICACIONES

La optimización topológica aporta diversos beneficios frente a otros procesos convencionales. Algunas de las ventajas más notables son las siguientes:

- **Ahorro económico:** este método de diseño favorece una mayor eficiencia en el consumo de combustible y reduce los costes de transporte debido a la disminución de peso. Asimismo, implica una menor inversión en maquinaria pesada en la cadena de montaje.
- **Resolución de desafíos de diseño:** las geometrías orgánicas resultantes son difíciles de obtener mediante otros métodos. Estas permiten, además, optimizar el modelo frente a vibraciones, lo que beneficia la durabilidad ante esfuerzos de fatiga. Por otro lado, también se encuentran beneficios frente a esfuerzos térmicos (por fricción u otros factores), ya que se ha logrado desarrollar materiales con un coeficiente de dilatación térmica nulo o negativo. [24]

- **Ahorro de tiempo:** el diseño CAD, al ser asistido por ordenador, reduce en gran medida el trabajo manual. En la fase de producción, al realizarse principalmente mediante métodos de fabricación aditiva, no requiere el uso de utillajes.
- **Reducción del impacto ecológico:** dado que se emplea menos materia prima y aumenta la eficiencia de los equipos, se logra reducir la huella de carbono de cada producto.
- **Eliminación de errores:** los sistemas consideran una amplia gama de variables y evitan la realización de suposiciones arriesgadas. [25]

Los métodos de OT se pueden encontrar en diversos sectores como, por ejemplo: aeroespacial, automoción, ingeniería civil, construcción y biomedicina. En todos estos casos, además de obtenerse un ahorro en peso y una mejora de la rigidez, existen otras características determinantes. Por ejemplo, en el caso de la ingeniería biomédica, resulta imprescindible la elección de materiales biocompatibles que faciliten el desarrollo celular alrededor de los mismos.



Figura 24. Ejemplo OT sector automovilístico

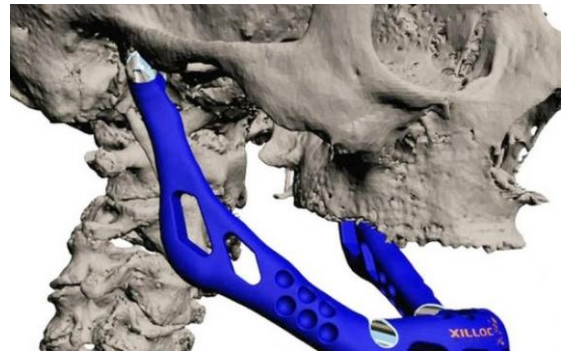


Figura 23. Ejemplo OT sector biomédico



Figura 25. Ejemplo OT ingeniería civil y construcción

2.3 FABRICACIÓN ADITIVA (FA)

La fabricación aditiva (FA) o en inglés llamado ‘Additive manufacturing’ o ‘3D printing’, es una evolución de los sistemas de creación de prototipos rápidos. Consiste en fabricar piezas añadiendo material a partir de programas de diseño por ordenador. En este proceso, se aplica una fuente de energía sobre el material para darle forma. Siguiendo esta idea, la norma UNE-EN ISO/ASTM 52900:2017 define la FA como el: «proceso de unión de materiales para fabricar piezas u objetos usando datos de modelos 3D, normalmente capa a capa, a diferencia de los métodos de fabricación mediante eliminación de material y conformado». [26]

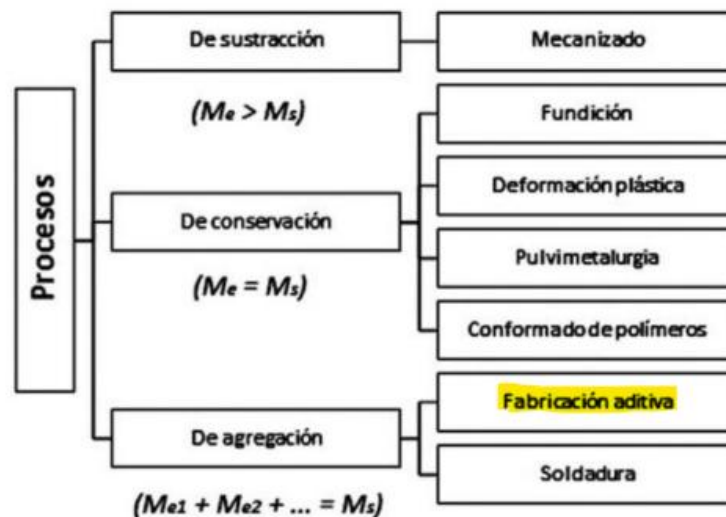


Figura 26. Clasificación de procesos de fabricación [22]

2.3.8 MATERIALES EMPLEADOS

Al ser un método consolidado en multitud de sectores, el estudio de los materiales compatibles es uno de los principales objetos de investigación en esta área. Actualmente, es posible procesar mediante técnicas de FA diversos grupos de materiales: [27] [28]

2.3.8.1 Polímeros termoplásticos

Denominados habitualmente como "plásticos", esta familia incluye tipos como PLA, ABS, PETG o Nylon. Generalmente se emplean en forma de filamento sólido enrollado en bobinas, aunque dependiendo de la tecnología de impresión, también pueden utilizarse en formato de polvo o granulado (pellets).



Figura 27. FA polímeros termoplásticos

2.3.8.2 Polímeros termoestables (resinas)

Este grupo comprende resinas epoxi, acrílicas, de uretano o híbridas. Se emplean en formato líquido mediante cubas o depósitos. Una vez finalizada la impresión, requieren un post-tratamiento de curado o fotopolimerización; este proceso consiste en exponer los modelos a luz ultravioleta (UV) o a ciclos térmicos en horno (entre 80°C y 180°C) para optimizar sus propiedades mecánicas.

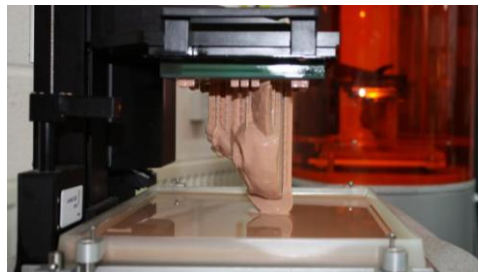


Figura 28. FA polímeros termoestables (resinas)

2.3.8.3 Metales

Esta categoría abarca tanto metales puros como aleaciones metálicas. Es una de las líneas de investigación con mayor proyección debido a sus altas capacidades mecánicas. Actualmente, la FA metálica se centra en el uso de aluminio, acero inoxidable, Inconel, aleaciones de níquel, titanio, cobre y wolframio. Estos materiales se procesan principalmente en formato de polvo en suspensión o, en ciertos métodos, como hilo metálico.



Figura 29. FA metálica

2.3.8.4 Cerámicos

Materiales como la alúmina o el circonio son recurrentes gracias a su excelente comportamiento a compresión y su resistencia a altas temperaturas. Se pueden emplear tanto en formato de polvo como en pastas cerámicas. [29]



Figura 30. FA cerámica

2.3.8.5 Células

Se aplican los principios de la FA para la fabricación de tejidos orgánicos. Este proceso, conocido como bio-impresión, permite depositar capa a capa una estructura cargada de células para generar bio-estructuras o tejidos funcionales.



Figura 31. FA de tejidos y células o bio-impresión 3D

2.3.9 PRINCIPALES TECNOLOGÍAS

De acuerdo con la norma UNE-EN ISO 17296 emitida en 2017, podemos distinguir entre 7 principios básicos de la FA los cuales engloban todo el conjunto de las técnicas de fabricación con impresoras 3D: [28]



Figura 32. Técnicas impresión 3D [24]

A continuación, se presentan tres de las técnicas más empleadas y cuyo conocimiento se considera fundamental para la preparación y realización del proyecto. Estas son: la extrusión de material (FDM), la fotopolimerización en tanque o cuba (SLA y DLP) y, por último, la fusión de lecho de polvo (MJF), debido a que se dispone de la impresora «HP Multi Jet Fusion» en los laboratorios de fabricación aditiva (FABLAB) de ICAI.

2.3.9.1 Extrusión de material

En concreto FDM (*Fused deposition modeling*), tal y como dice su nombre, el material que viene de una o varias bobinas de filamento y pasa a través de un cabezal a un boquilla a elevada temperatura que lo funde y lo deposita sobre la base capa a capa formando el modelo. Este tipo de técnicas de impresión es tanto la más usada como la más extendida a nivel mundial debido a que te permite imprimir en una gran variedad de materiales y colores, además de ser también una de las técnicas más económicas y accesibles para gente que se quiere iniciar en el mundo de la FA.

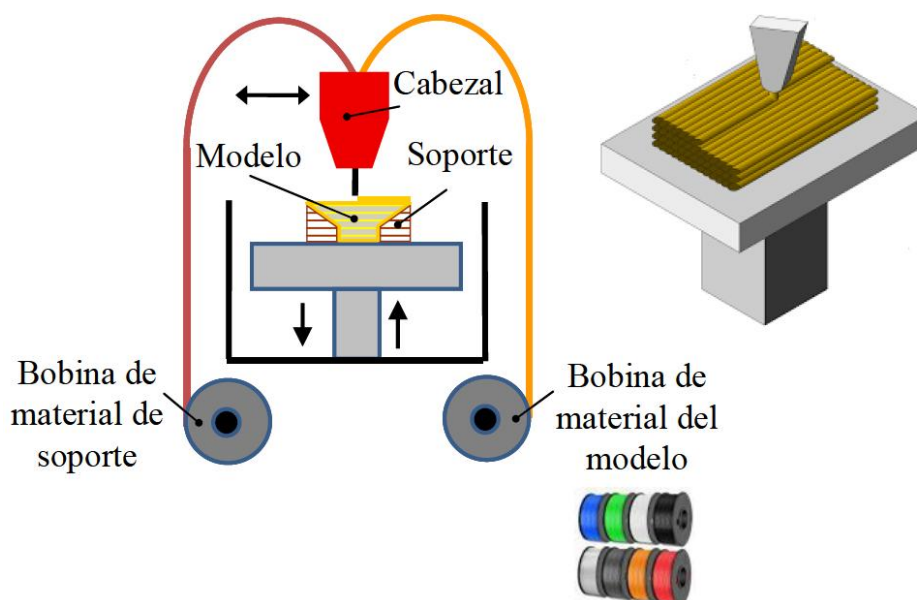


Figura 33. Esquema tecnología FDM [24]

Dentro de esta tecnología, se han desarrollado varios tipos de impresoras que, aunque comparten el mismo principio de funcionamiento, difieren en su sistema de movimiento y localización mediante coordenadas. Los cuatro tipos principales son:

- **Basadas en coordenadas cartesianas (X, Y, Z):** son las más comunes. En ellas, el cabezal se desplaza en una dirección horizontal (generalmente el eje X) y en la dirección vertical (Z), mientras que la base de impresión controla el movimiento en el eje horizontal restante (Y).
- **Core XY:** también emplean coordenadas cartesianas, pero el cabezal se desplaza en los ejes X e Y mediante un sistema de correas sincronizadas, mientras que la base asume el movimiento vertical (Z). Estas impresoras suelen ser más rápidas y estables que las cartesianas convencionales.
- **Impresoras Delta:** utilizan tres brazos articulados anclados a guías verticales en una disposición triangular. Aunque su calibración es más compleja, ofrecen una alta calidad de impresión a velocidades elevadas.
- **Impresoras polares:** su funcionamiento se basa en coordenadas polares, controlando la altura, el radio y el ángulo de rotación de la base. Este sistema permite

alcanzar una alta precisión y mejorar la generación de ciertas geometrías en comparación con las arquitecturas cartesianas.

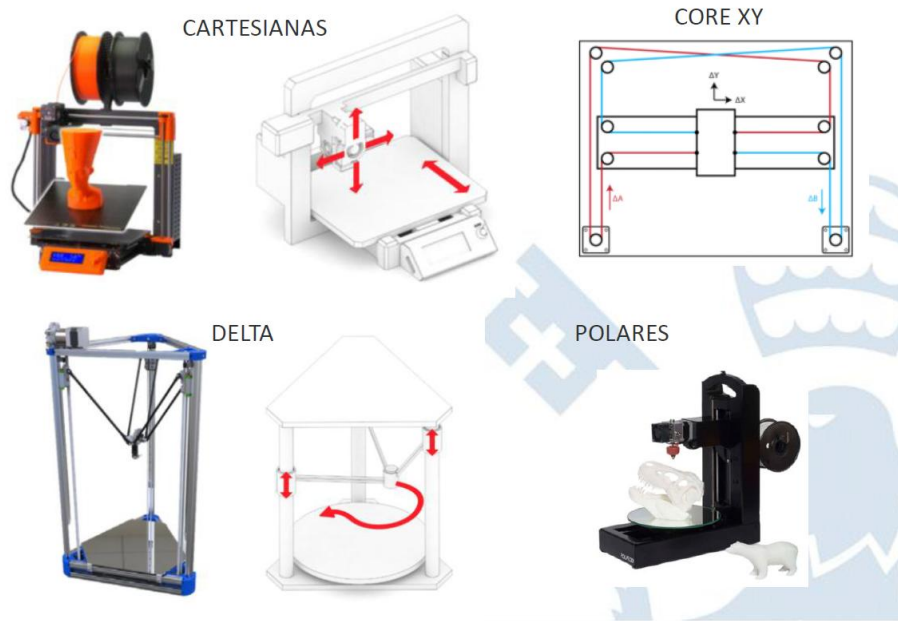


Figura 34. Tipos impresoras para FDM [24]

2.3.9.2 Fotopolimerización en tanque o cuba

Esta incluye dos técnicas parecidas pero con ciertas diferencias; ambas trabajan con resinas en formato líquido y recogidas en tanques. Estas dos técnicas son: SLA (Stereolithography) y DLP (Digital Light Processing). Una particularidad de estos métodos es la manera de impresión, ya que la base se acerca al tanque de material hasta llegar justamente a la superficie y, mediante láser, endurece solamente las zonas del modelo que nos interesan para ir formando la geometría necesaria. Además, en ambos métodos suele imprimirse de manera que el modelo quede boca abajo para así poder ayudarse de la gravedad y evitar potenciales errores.

La principal diferencia entre ambos métodos es la siguiente:

- **SLA:** Utiliza un láser UV y espejos galvanométricos que traza punto por punto el contorno de cada capa de resina. Por este mismo motivo es una técnica bastante lenta, aunque puede aportar una mayor precisión y suavidad en superficies curvas y detalles muy finos.

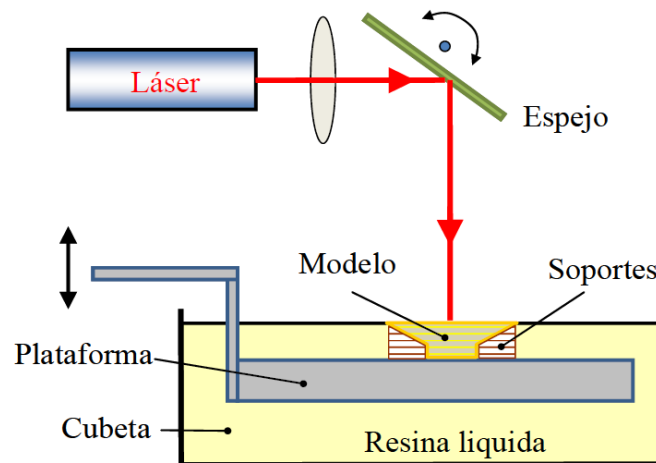


Figura 35. Esquema tecnología SLA [24]

- **DLP:** Utiliza un proyector digital que ilumina toda la capa de una sola vez, también mediante luz UV. Es una técnica mucho más rápida, pero su calidad está limitada por los píxeles y la resolución de la luz.

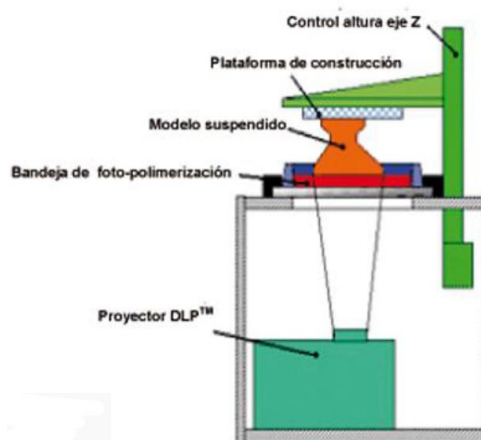


Figura 36. Esquema tecnología DLP

2.3.9.3 Fusión de lecho de polvo

Dentro de este grupo se encuentra la tecnología SLS (*Selective Laser Sintering*), que es la más común dentro de la FA con polvo como materia prima. Esta sección se centrará en la tecnología **MJF** (*Multi Jet Fusion*), ya que, además de ser una evolución avanzada basada en SLS, está disponible en los laboratorios de la Universidad Pontificia de Comillas (ICAI).

MJF es una tecnología de impresión desarrollada por HP que, a diferencia de la SLS, no solo funde el polvo utilizando calor como fuente de energía, sino que añade agentes líquidos para controlar con precisión las zonas que deben ser fusionadas y las que no.

El **proceso de fabricación se realiza capa a capa**, siguiendo una serie de **pasos** específicos para la ejecución de cada una de ellas:

- 1- Extensión de la capa: se extiende una capa fina de polvo sobre la plataforma, de manera similar al método SLS.
- 2- Precalentamiento: se aplica un calor uniforme sin alcanzar la temperatura de fusión del material. Esto prepara el polvo para reducir el choque térmico al aplicar los agentes y mejora la adhesión entre capas.
- 3- Aplicación de agentes: un cabezal de impresión deposita sobre el polvo dos tipos de agentes. El agente de fusión (*fusing agent*) se aplica donde se requiere que el polvo se funda y se adhiera para formar el modelo; el agente de detalle (*detailing agent*) se aplica en las zonas perimetrales y de detalle que no pertenecen a la pieza final.
- 4- Fusión: se aplica una fuente de calor que provoca la fusión localizada, principalmente en las zonas donde se impregnó el agente de fusión.

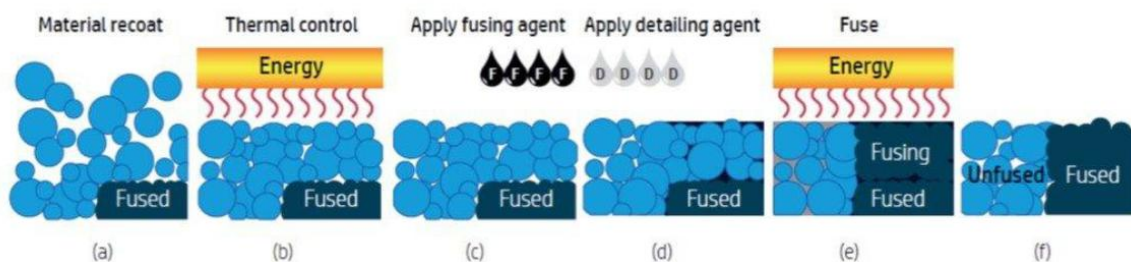


Figura 37. Proceso de tecnología MJF [24]

2.3.10 FLUJO DE TRABAJO EN FA

El proceso de preparación para la fabricación de componentes mediante impresión 3D se inicia con la exportación del modelo CAD (en formato nativo, como .par) a un formato de intercambio de malla poligonal, generalmente .stl o .3MF. La diferencia entre estas es que el formato .3MF guarda también información sobre el color y la textura de la malla. Además en este paso debemos garantizar la concordancia de las unidades de medida correspondientes (milímetros o pulgadas) y ajustar las opciones de tolerancia a valores de alta precisión evitando así la triangulación visible de nuestras piezas en superficies curvas (0,001 para tolerancia de conversión y 1,00° para el ángulo plano de superficie).

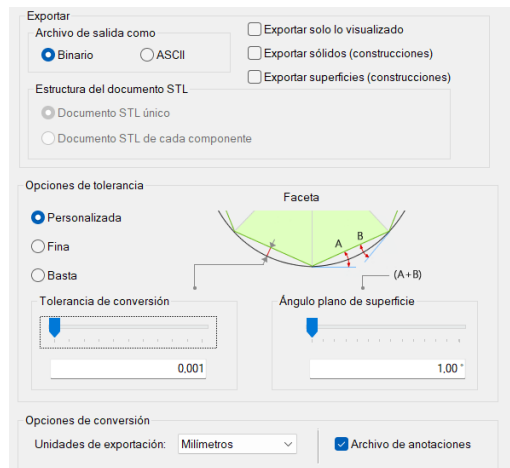


Figura 38. Ajustes de guardado para archivos .stl o .3MF

Posteriormente, este archivo se importa en un software de laminado o slicer (como Bambu Studio para tecnología FDM o PreForm para SLA y MJF). En esta etapa, se configuran los parámetros técnicos de procesamiento, tales como la altura de capa, la densidad de relleno y las estructuras de soporte.

Finalmente, el software procesa la geometría y genera un archivo con extensión .gcode. Este formato contiene las instrucciones numéricas no editables que dirigen los movimientos de los actuadores y los sistemas de extrusión de la impresora, permitiendo la materialización física de la pieza. [28]

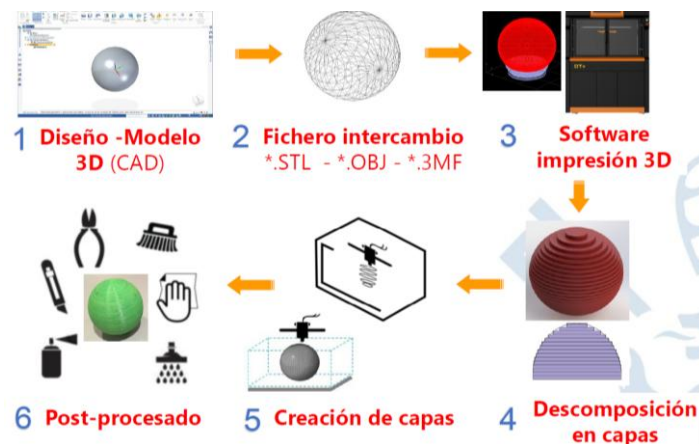


Figura 39. Flujo de trabajo para procesos de FA [28]

2.3.11 PARÁMETROS DE DISEÑO E IMPRESIÓN

Dentro de estos softwares de laminado (slicers), además de seleccionar la impresora, la textura, el color del material (si el método de impresión lo permite) y ajustes avanzados como la velocidad o el acabado del modelo, podemos modificar parámetros imprescindibles para la correcta ejecución del proceso: [28]

- **Base y capas inferiores:** Ayudan a la adhesión del modelo a la plataforma desde el inicio del proceso. Su uso es muy recomendado para todo tipo de piezas y resulta fundamental en modelos con poca superficie de contacto. Además, esta base facilita la retirada de la pieza tras la impresión de forma sencilla.

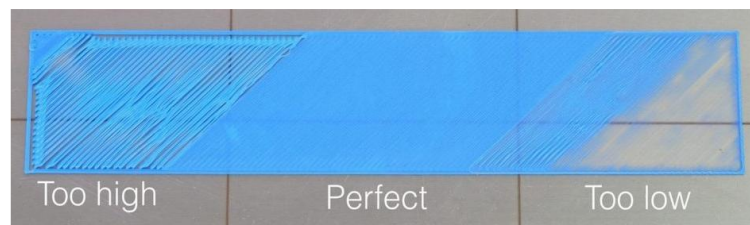


Figura 40. Comparativa de densidades para la base del modelo en FA

- **Soportes:** Dado que el proceso se construye en el aire sobre una plataforma, los modelos requieren una superficie de apoyo para la correcta deposición del material. En los casos en los que la inclinación de la superficie supere los 45°, se requieren soportes de apoyo (posteriormente extraíbles). Estos pueden ser tanto internos como externos; es importante diseñar las piezas considerando esta "regla de los 45°" para evitar trabajos adicionales de post-procesado.

ELIMINACIÓN MANUAL O POR DISOLUCIÓN DEL MATERIAL DE SOPORTE



Figura 41. Proceso de eliminación de soportes

- **Orientación de las superficies:** Se basa en la correcta colocación e inclinación de los modelos sobre la base de impresión, lo cual depende de la tecnología empleada. Por ejemplo, en tecnología FDM, las capas expuestas hacia arriba presentan un mejor acabado superficial. Por otro lado, en tecnologías de resina como SLA o DLP, el modelo debe situarse de forma oblicua para mejorar la adhesión y evitar desprendimientos hacia el tanque de resina, ya que, en la mayoría de los casos, se imprime de manera inversa (boca abajo) para aprovechar la gravedad.

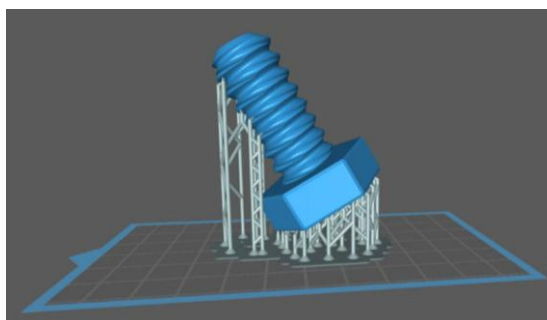


Figura 42. Orientación de modelos para impresión con resina

- **Relleno interior:** Conocida también como estructura lattice, se presenta en forma de una estructura concreta diseñada para aportar resistencia con el mínimo volumen de material. Junto a la elección del patrón, se define su densidad. Generalmente se emplean porcentajes bajos, ya que suelen ser suficientes para soportar las cargas; por ejemplo, en FDM se define por defecto entre un 18% y 20%.

Una pieza con un 50% de relleno es, comparativamente, un 25% más resistente que una con el 25%, mientras que pasar del 50% al 75% solo aumenta la resistencia en un 10%.



Figura 43. Relleno interior modelos 3D (estructuras lattice)

2.3.12 VENTAJAS DE LA FA

Si bien la fabricación aditiva tiene como principal característica y ventaja frente a otros métodos la posibilidad de poder fabricar piezas con una gran reducción de peso debido a las distintas estructuras que se usan de relleno en su interior, este sistema tiene otros muchos beneficios que lo convierten en uno de los más utilizados a nivel global. [30] [31]

- Complejidad geométrica: permite fabricar una gran variedad de diseños con alta complejidad, como es el caso de las geometrías orgánicas.
- Velocidad de prototipado: posibilita la obtención de modelos en pocas horas o días. Además, gracias a la amplia comunidad de usuarios que comparten sus diseños, es posible replicar modelos existentes de forma inmediata.
- Alta personalización: ofrece una gran libertad en la elección de colores, estructuras internas y acabados superficiales.

- Versatilidad de materiales: amplia gama de opciones para diferentes aplicaciones técnicas.
- Agilidad en el rediseño: el tiempo de cambio entre diseños es mínimo, ya que no requiere el uso de utillajes específicos.
- Eficiencia de material: el desperdicio de materia prima durante el proceso es mínimo.
- Coste unitario optimizado: resulta muy económico para series cortas o la fabricación de piezas únicas.
- Bajas barreras de entrada: el coste de adquisición es relativamente bajo si no se trata de equipos de gama industrial.
- Aplicaciones biomédicas: es una herramienta fundamental para crear modelos personalizados y prótesis a medida para cada paciente.

2.3.13 LIMITACIONES DE LA FA

A pesar de todas las ventajas que puede ofrecernos las FA, no es un método sin fallos y tiene muchas limitaciones que debemos tener en cuenta si estamos pensando en emplear este método de fabricación. A continuación se muestra una visión general de muchas de las limitaciones de este proceso generales a todos las tecnologías de fabricación y materiales. Toda esta información ha sido obtenida de artículos como [32] y documentos del CSIC [33].

En cuanto a los materiales, actualmente existe una menor variedad en comparación con la fabricación tradicional y sus formatos suelen tener un coste superior. Debido al proceso de deposición, es frecuente encontrar defectos internos como porosidad o grietas, además de una microestructura no homogénea. Al tratarse de materiales anisotrópicos, sus propiedades mecánicas varían según la dirección de fabricación. Por ello, en la dirección perpendicular a las capas (eje Z), la resistencia suele ser menor.

Asimismo, el proceso de fabricación presenta limitaciones que afectan directamente a la calidad de los componentes. El trabajo con gradientes térmicos elevados genera tensiones residuales en los modelos, lo que exige un control riguroso de la temperatura para evitar deformaciones superficiales (*warping*).

Como ocurre en todos los métodos de fabricación, tampoco se pueden fabricar todo tipo de piezas, en este caso existen principalmente una gran limitación de tamaño debido al espacio limitado de las impresoras. Además, la geometría del modelo está condicionada por parámetros críticos como los espesores mínimos de pared, la rugosidad superficial y el diámetro mínimo de los orificios.

Finalmente, las limitaciones de producción representan el mayor obstáculo para la expansión de esta tecnología a nivel industrial. La baja velocidad de fabricación, la necesidad de postprocesados, el elevado coste de la maquinaria industrial y consumo energético, hacen que estos métodos de FA tengan una menor productividad comparada con métodos de fabricación tradicionales y no sean rentables para una producción en masa.

2.4 FUNDICIÓN AL MODELO PERDIDO

El proceso de fabricación del producto final optimizado será el de fundición al modelo perdido, comúnmente también llamado fundición a la cera perdida o ‘investment casting’ en inglés. Este proceso de fundición se diferencia de otros debido a que tanto el modelo como el molde que se emplean son desechables. Esto nos beneficia puesto que de esta manera no tenemos que fabricar costosos moldes ni machos para piezas de prueba o de baja producción.

El molde que se suele emplear es de cera (resina), el cual además de ser un material ideal y especializado en este tipo de fundición, nos ofrece una elevada precisión dimensional y un buen acabado superficial. En anteriores investigaciones y proyectos, se ha intentado realizar este mismo método con tecnología FDM a través de la impresión de materiales como el PLA (*Ácido poliláctico*) debido a que tiene un coste tanto de material como de operación menor, es una impresión más rápida, no requiere tanta eliminación de soportes y ni tampoco necesita un tratamiento de curado. Por el contrario, esta técnica nos aporta peores acabados y menor precisión. Debido a que ambos métodos tienen tanto ventajas como desventajas, en este

proyecto se intentará realizar la impresión mediante ambas técnicas para poder comparar los resultados. [34]



Figura 44. Comparativa impresión con filamento y resina

El flujo de trabajo para esta técnica de fundición es análogo para ambos materiales (PLA y resina), presentando mínimas variaciones operativas. En la *Figura 44* se ilustra el proceso para un modelo de tipo "árbol", configuración estándar para piezas de pequeña escala, a diferencia del enfoque de este proyecto. Las fases del proceso se detallan a continuación: [35]

1. **Obtención del modelo patrón:** Fabricación del modelo en cera, filamento (PLA) o resina calcinable mediante la tecnología de impresión 3D correspondiente. Estos modelos deben integrar, además de la geometría final, los sistemas de alimentación necesarios: bebederos, mazarotas y respiraderos para facilitar la colada y la evacuación de gases.
2. **Elaboración del molde cerámico o cáscara:** Recubrimiento del modelo con materiales refractarios. En este proyecto se empleará yeso (sulfato de calcio), el cual, aunque difiere de las cerámicas tradicionales como la porcelana, se clasifica como una cerámica de fraguado altamente eficaz para estas aplicaciones de fundición.
3. **Calcinación y precalentamiento del molde:** El molde se introduce en un horno donde se eleva la temperatura de forma progresiva hasta alcanzar aproximadamente los 800°C en ciclos de 2 horas. El objetivo de esta fase es doble: por un lado, la evacuación completa del material impreso (eliminando cualquier resto de cenizas) y,

por otro, el precalentamiento del molde para minimizar el choque térmico y prevenir defectos durante la colada.

4. **Colada y solidificación:** Vertido de la aleación metálica fundida en la cavidad del molde. Para este proyecto, seguramente se empleará una aleación de aluminio (L-2560 T6), procediendo posteriormente a su enfriamiento y solidificación controlada.
5. **Desmoldeo y acabado:** Extracción de la pieza final mediante la rotura del molde cerámico. En esta etapa se eliminan los elementos del sistema de alimentación (bebederos y respiraderos) y se procede al post-procesado mediante herramientas de desbaste y pulido para corregir imperfecciones y lograr el acabado superficial requerido.

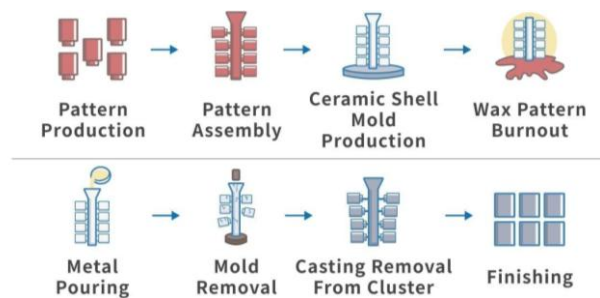


Figura 45. Proceso de fundición al modelo perdido

2.4.14 APLICACIONES EN INGENIERÍA

Debido a la elevada precisión dimensional, al óptimo acabado superficial que permite este método y a la capacidad de los moldes cerámicos para soportar altas temperaturas, esta técnica resulta idónea para la obtención de componentes críticos. Además, la integración de la FA permite la producción de geometrías de alta complejidad que serían imposibles de obtener mediante métodos de moldeo convencionales.

Por estas razones, este flujo de trabajo es un estándar en sectores estratégicos como la ingeniería aeroespacial [36], la joyería de alta precisión y la ingeniería biomédica, donde la personalización geométrica y la integridad del material son requisitos indispensables.



Figura 47. Turbina fabricada mediante fundición al modelo perdido



Figura 46. Uso de la fabricación al modelo perdido para joyería



Figura 48. Fabricación al modelo perdido para la fabricación de prótesis dentales

2.4.15 COMPARATIVA DE COSTES

Debido a que el presente proyecto integra técnicas de optimización topológica, se generan geometrías orgánicas cuya complejidad técnica hace inviable su fabricación mediante métodos convencionales distintos a la Fabricación Aditiva (FA). En este contexto, resulta razonable plantear tanto el método de fundición a la cera perdida asistido por FA como la impresión directa en metal (SLM/EBM).

No obstante, considerando los requisitos de calidad superficial, la reducción de rugosidad y, la optimización de costes; la fundición a la cera perdida se posiciona como la alternativa más eficiente. Una vez validados los prototipos, la escalabilidad del proceso permitiría la creación de modelos en "árbol" (agrupando varias unidades por colada), lo que reduciría drásticamente el coste unitario.

A continuación se muestra la comparativa de precios unitarios obtenida de un trabajo fin de grado similar realizado el año pasado (2025): [35]

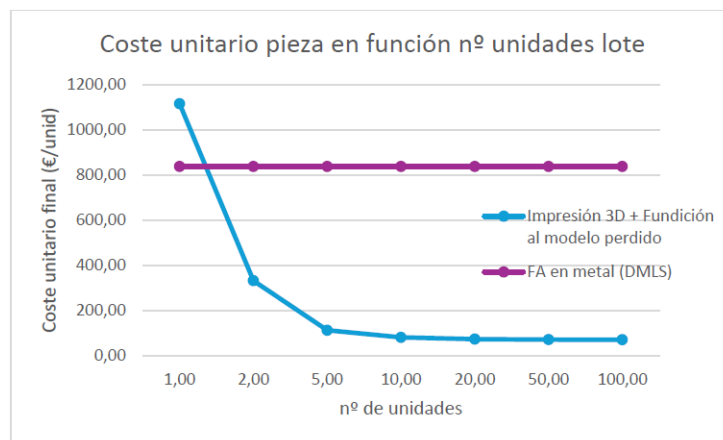


Figura 49. Coste unitario de fabricación en función del nº de piezas por lote. (Fuente: [35])

Adicionalmente, se presenta un análisis comparativo de los costes de fabricación de los modelos patrón empleando tanto filamento (FDM) como resinas de fotopolimerización (SLA). Esta comparativa permite cuantificar el ahorro económico derivado del uso de la tecnología FDM; no obstante, dicha elección queda condicionada a la validación experimental de su comportamiento térmico durante la calcinación (presencia de residuos o cenizas) y a la calidad del acabado superficial transferido finalmente al modelo metálico. [37]

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

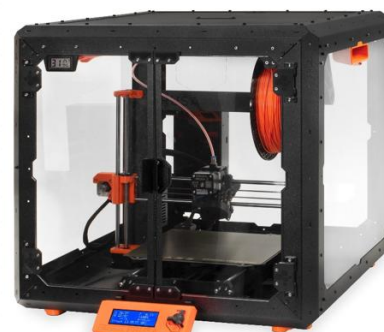


Tabla 2. Costes impresora FDM

ANÁLISIS DE COSTES PARA PROTOTIPADO DE PIEZAS EN IMPRESORA 3D -SLA	
DATOS AMORTIZACIÓN MÁQUINA	
Precio máquina (€)	20.000
Coste mantenimiento anual (€)	2.000
Años de amortización	5
Amortización (h/año) - 223 días-año / 12 horas-día	1784
Precio Hora máquina-amortización (€/h)	2,91
Precio Hora venta-público (€/h)	4,37
DATOS COSTE MATERIAL	
Coste material modelo: filamento abs (€/cc) (150€-950 cc)	0,21
DATOS COSTE TÉCNICO ANALISTA	
Coste técnico analista del modelo - inc. desmoldeo (€/h)	20



Tabla 3. Costes impresora SLA

2.5 CASOS DE ESTUDIOS SIMILARES

Debido a que este mismo flujo de trabajo se ha implementado anteriormente en esta universidad para el desarrollo de componentes con requerimientos mecánicos distintos: biela bicicleta y una mangueta de automóvil ([31] y [33] respectivamente). El presente proyecto ha podido fundamentarse en unos antecedentes técnicos consolidados. Esto ha permitido no solo la validación del flujo de trabajo existente, sino también la transferencia de conocimientos y la optimización en la búsqueda de cierta información crítica.

Finalmente, ambos trabajos previos coinciden en la relevancia crítica de diseñar un sistema de alimentación optimizado. Una configuración deficiente de dichos canales incrementa el riesgo de defectos en la fundición, tales como la aparición de rechupes, grietas o fallos de llenado.

3. DEFINICIÓN DEL TRABAJO

3.1 ENTORNO DE INGENIERÍA INVERSA

El presente proyecto se inicia con la adquisición del componente mecánico objeto de estudio y optimización. El propósito de dicha adquisición es aplicar técnicas de ingeniería inversa que permitan su representación precisa en un software de modelado 3D como SolidEdge, facilitando así la continuidad del flujo de trabajo establecido.

En primera instancia, se optó por un método de bajo coste denominado fotogrametría, con el fin de evaluar preliminarmente los resultados que se podrían obtener mediante esta técnica. No obstante, este procedimiento se concibió únicamente como una fase de pruebas, dado que el escaneo definitivo, de mayor precisión y carácter profesional, se llevaría a cabo mediante tecnología láser.

A continuación, se detalla el proceso seguido para la obtención de la geometría requerida por medio de estas técnicas:

3.1.1 FOTOGRAMETRÍA

Para esta técnica se emplearon diversos softwares con licencia de estudiante, con el objetivo de realizar el escaneo a partir de múltiples fotografías capturadas directamente con un dispositivo móvil, en este caso el Iphone 13.

Dentro del conjunto de herramientas informáticas utilizadas, en primer lugar, es necesario disponer de **ReCap Pro** y **ReCap Photo**. Ambas aplicaciones trabajan de forma conjunta y se descargan desde la plataforma principal de Autodesk. Debido que interactúan entre sí, para la transferencia de datos es imprescindible contar también con la herramienta **Autodesk Desktop Connector**.

En lo relativo al proceso de escaneo, estas aplicaciones permiten generar modelos tridimensionales a partir de un mínimo de 20 fotografías. No obstante, dado que las imágenes deben superponerse entre sí para que el sistema no pierda la referencia espacial, y puesto que es necesario capturar el objeto desde distintos ángulos de inclinación para evitar defectos durante el procesamiento, se determinó de manera experimental que las pruebas se realizarán con un mínimo de 60 fotografías cada una, pudiendo alcanzar hasta las 120 imágenes para la obtención de resultados más precisos.

Durante la fase de ensayos y pruebas se identificaron las condiciones óptimas que permiten una correcta lectura e interpretación de los datos por parte del software:

- **Sombras y brillos:** dado que la pieza original objeto de estudio está fabricada en una aleación de aluminio y presenta un acabado de pintura brillante, el escaneo se ve dificultado. Para un correcto procesamiento, las superficies deben ser de un tono mate, carecer de reflejos captados por la Cámara y contar con una iluminación uniforme. Por este motivo, en este tipo de escenarios se emplean sprays específicos de diversos colores (en este caso, de color blanco) para suprimir dichos reflejos.
- **Posicionamiento y orientación del modelo:** este constituye el factor más crítico, ya que el ruido visual del entorno, la base de apoyo y los puntos de referencia aportados influyen directamente en la calidad de la solución obtenida. En el desarrollo de este proyecto se optó tanto por la práctica habitual de escanear la geometría sobre un fondo uniforme que genere contraste como el escaneo en un espacio abierto, utilizando además bases fijas o giratorias con marcas de referencia predefinidas o impresas en papel, Tal como se describió en el estado del arte. Por otra parte, se determinó experimentalmente que la metodología más eficiente consistía en emplear una sujeción sencilla y única de la pieza en una zona de geometría simple que pudiera ser reconstruida con posterioridad. Este enfoque ofreció resultados considerablemente superiores a los obtenidos mediante cambios de posición de los agarres; aunque no permite capturar la totalidad de la geometría de una sola vez, asegura que las referencias espaciales se mantengan invariables a lo largo de todo el proceso fotográfico.

- **Defectos en geometrías complejas:** debido a que el componente seleccionado presenta múltiples zonas roscadas y alojamientos para ejes, se determinó que la mejor opción consiste en cubrir dichas regiones para prevenir errores en su lectura. Al tratarse de geometrías regulares y sencillas, su posterior modelado e integración una vez finalizado el escaneo lo presenta mayor dificultad. Para este propósito, se empleó una cartulina del mismo color que el recubrimiento aplicado a la pieza.

A continuación, se presentan los resultados más significativos obtenidos durante esta fase, acompañados de su correspondiente análisis y contexto:

3.1.1.1 Primer escaneo

Tras resolver diversos errores en el análisis de las imágenes durante los ensayos previos, se obtuvo la primera solución tridimensional. Este modelo inicial se generó a partir de 100 fotografías en una plataforma giratoria que incorporaba una plantilla de referencia impresa en papel. Para este procedimiento, la cámara se fijó en un trípode, de modo que el proceso consiste en rotar la base en intervalos de 15° , complementando la captura con imágenes desde diferentes perspectivas (vistas en picado y contrapicado). Asimismo, el ensayo se llevó a cabo en un entorno cerrado de color blanco dotado de una iluminación adecuada.

A pesar de la preparación y de la metodología descrita, el resultado proporcionado por el sistema mostró un amplio margen de mejora. Tras un análisis detallado del resultado obtenido, se constató que el entorno y el fondo seleccionados no favorecieron al proceso de reconstrucción, dado que el software integró estos elementos como parte de la geometría del componente, a pesar del elevado contraste entre ambos.

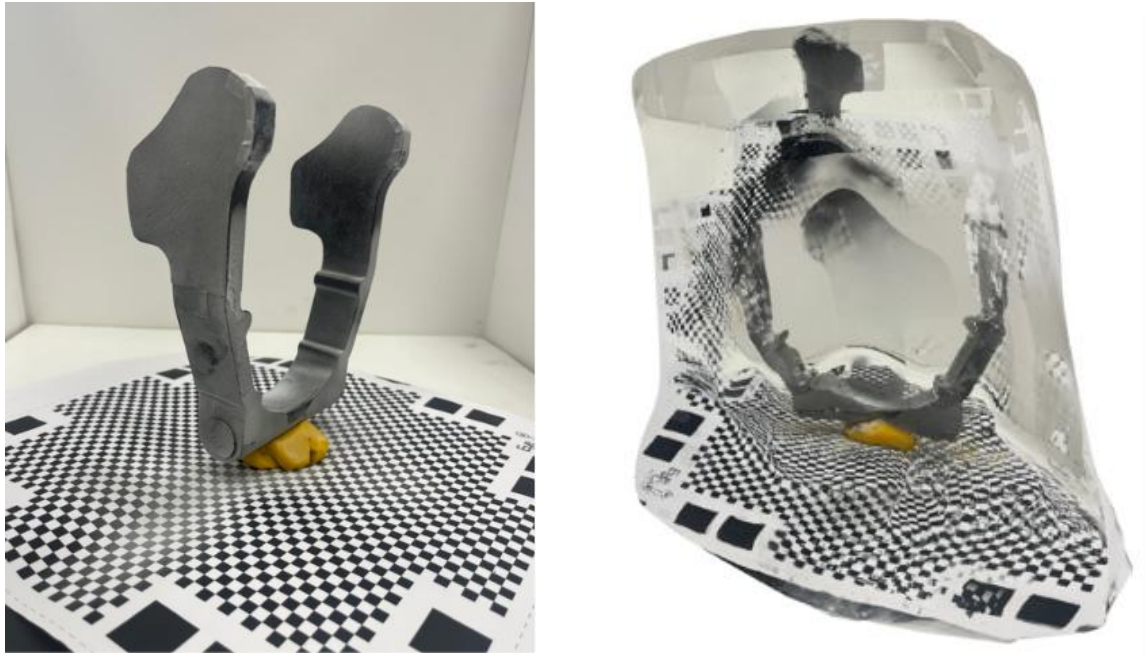


Figura 50. Configuración 1 del entorno para fotogrametría y malla tridimensional obtenida

3.1.1.2 Segundo escaneo

Ante los resultados de la solución anterior, en esta etapa se optó por capturar las fotografías en un entorno diferente, Caracterizado por una mayor irregularidad, pero pensado para no aportar un ruido visual excesivo en las imágenes. Asimismo, con el propósito de optimizar el procedimiento previo, Se modificó la superficie de apoyo, empleando una base giratoria sobre la cual se adhirieron diversos objetos o ‘targets’ de referencia de 3 mm y 6 mm para facilitar la alineación espacial.

El resultado obtenido supuso una mejora significativa dentro de los ensayos realizados hasta el momento, lográndose una geometría que reproducía fielmente la morfología real del componente y que presentaba un acabado superficial adecuado para las expectativas de esta técnica. No obstante, el principal defecto identificado fue la generación de una superficie sin espesor. Este error se atribuye, probablemente, a una discrepancia del algoritmo de reconstrucción al procesar una pieza simétrica dado que el resto de la geometría se

aproximaba de manera fidedigna al modelo real, exceptuando ligeras desviaciones en zonas curvas o de elevada complejidad geométrica.



Figura 51. Configuración 2 del entorno para fotogrametría y malla tridimensional obtenida

3.1.1.3 Tercer escaneo

El tercer y último ensayo se desarrolló conforme a lo previsto, obteniéndose un modelo tridimensional altamente completo, con una definición precisa en las aristas del componente y una malla estructural notablemente limpia. Para este procedimiento se utilizó una base fija de color blanco que, de igual manera que en el intento anterior, incorporaba puntos de referencia predefinidos.

El aspecto más destacable de este ensayo fue que, contrariamente a las recomendaciones metodológicas habituales para la ejecución de este tipo de reconstrucciones, el proceso se llevó a cabo en un entorno no acondicionado. Dicho espacio presentaba una elevada irregularidad, una amplia variedad cromática y una considerable cantidad de elementos

adyacentes que potencialmente habrían podido inducir a errores de interpretación o confusión en el algoritmo del software.

A modo de aprendizaje, se analizó el motivo de este comportamiento, llegándose a la conclusión de que, al emplear una base fija y realizar el desplazamiento directamente con la cámara, la presencia de un elevado número de objetos y el ruido visual del entorno no supusieron un inconveniente. Por el contrario, estos elementos constituyeron una característica Fundamental que facilitó el sistema de alineación eficiente de la totalidad de las fotografías.



Figura 52. Configuración 3 del entorno para fotogrametría y malla tridimensional obtenida

3.1.1.4 Conclusiones

A pesar del notable resultado obtenido, se ha decidido continuar según el flujo de trabajo previsto y descartar esta técnica para avanzar hacia una metodología más profesional, que ofrece mayor sensibilidad y calidad en sus resultados. A lo largo de estos ensayos, se han podido extraer diversas conclusiones respecto a la entrada de la fotogrametría:

- **Incertidumbre geométrica y dimensional:** a pesar de haber obtenido una malla limpia en el último ensayo, ha sido necesaria la realización de múltiples intentos variando los parámetros para alcanzar el resultado deseado. Esta Nevada dependencia de los factores de captura generan una falta de estandarización en el proceso, lo que incrementa los tiempos de desarrollo y dificulta su aplicación a escala industrial.
- **Eficiencia en el flujo de trabajo (Coste-Tiempo):** El procesamiento de digital de las imágenes no resultó excesivamente prolongado ni requirió una alta capacidad computacional. Sin embargo, las etapas de captura fotográfica y su correspondiente transferencia al software demandaron una inversión de tiempo excesiva.

3.1.2 ESCANEADO LÁSER

Una vez analizadas las limitaciones de la fotogrametría en términos de repetibilidad y precisión dimensional, el flujo de trabajo se orienta hacia el uso de un escáner láser portátil como metodología definitiva de ingeniería inversa. Esta tecnología se basa en la emisión de un patrón de luz láser para, consecuentemente, medir la distancia mediante sensores ópticos, capturando así la geometría del componente de una forma considerablemente más técnica y precisa. Además, esta tecnología ofrece la ventaja de visualizar en tiempo real la geometría captada por la herramienta, permitiendo a su vez realizar múltiples escaneos para efectuar posteriormente un solapamiento y alineación entre otros.

Si bien esta tecnología presenta un carácter significativamente más profesional, su accesibilidad económica es notablemente más restrictiva. El escáner empleado en este proyecto es el ‘**HandySCAN 3D**’ el cual, en combinación con el software de **VXelements**, permite una ágil digitalización del proceso y la obtención de resultados de alta fidelidad geométrica.

3.1.2.1 Digitalización del modelo

En este caso, la digitalización del modelo resulta un procedimiento estructurado y directo. Es importante asegurar una correcta captura de los puntos de referencia y mantener el sensor a la distancia óptima recomendada respecto a la pieza objeto de estudio. Este proceso destaca por su eficiencia temporal, con una duración estimada de entre 15 y 20 minutos. Para el desarrollo de este proyecto, Se llevaron a cabo 3 lecturas independientes con el propósito de registrar con máximo detalle posible la totalidad de la geometría del componente.

Tras la finalización del proceso de escaneo, se generan mallas de tipo mesh en formato .stl, las cuales deben ser superpuestas y alineadas entre sí mediante el software. Este procedimiento se ilustra detalladamente en la siguiente figura, En la cual, solo faltaría para empezar a trabajar con ella, la eliminación de errores de lectura del escáner visibles a simple vista:

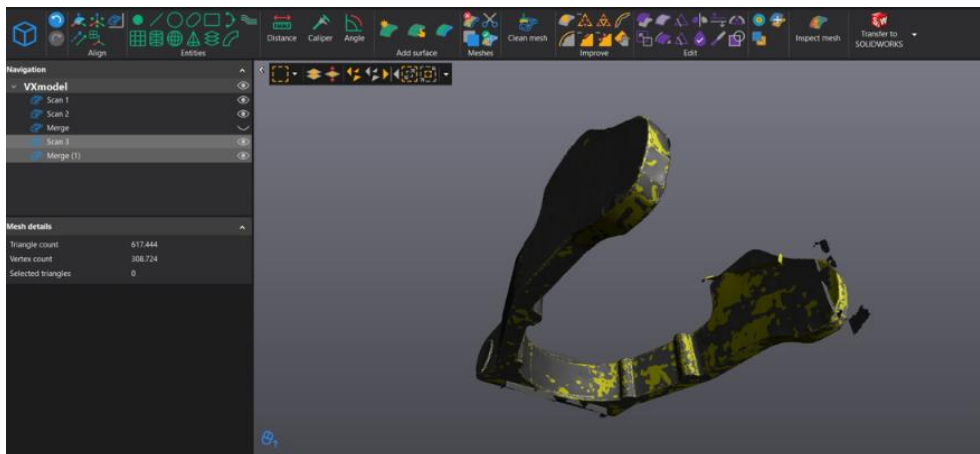


Figura 53. Resultado de alineación y solapamiento de los diferentes escaneados

3.1.2.2 Procesado de mallas

Una vez obtenida la malla escaneada, el siguiente paso consiste en suavizar y simplificar su geometría, eliminando posibles defectos morfológicos y regiones de excesiva complejidad de mallado. Este procedimiento se lleva a cabo mediante el módulo *Model* de VElements,

donde, A través de herramientas como *Sandpaper*, *Spikes*, *Defeature* o *Add Auto-Surface*, Se corrigen las imperfecciones introducidas durante la etapa de digitalización.

Durante esta fase del desarrollo, se considera de vital importancia simplificar la geometría de la malla de trabajo. Por este motivo, mediante la funcionalidad de remallado, se aplica una estructura discreta más simple y con un tamaño de elemento mayor, con el objetivo de optimizar el coste computacional en los procesos posteriores y prevenir errores de cálculo y problemas debido a una excesiva complejidad.

Otro de los aspectos fundamentales en el flujo de trabajo con este tipo de aplicaciones es la definición de un sistema de coordenadas coherente con la geometría y la orientación del componente objeto de estudio. En este proyecto se optó por situar el origen de coordenadas en el centro de la pieza, para así facilitar su trabajo en las siguientes partes del proyecto.

Puesto que En etapas posteriores es necesario incorporar taladros y extruir en el modelo el alojamiento destinado al eje de la rueda, resulta imprescindible establecer planos de referencia ajustados a la malla obtenida. Esta configuración es necesaria para que, desde el software Solid Edge, sea posible referenciar los bocetos destinados a las operaciones de corte. A continuación, se presentan los planos de referencia seleccionados para este componente en particular:

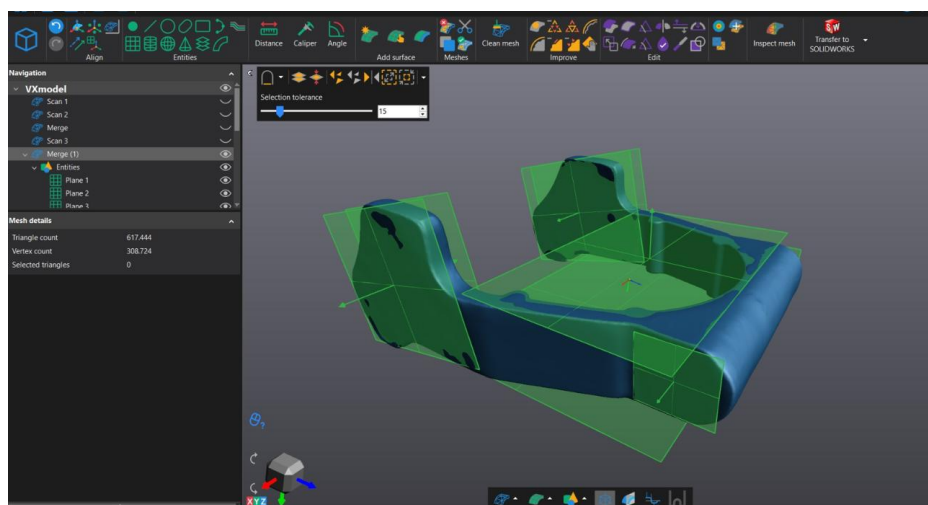


Figura 54. Creación de entidades geométricas de referencia en VXelements

Para concluir con los ajustes de la malla y verificar su correcta convergencia con la geometría escaneada, se procede a analizar la desviación superficial y el error cometido durante el proceso de adaptación entre el modelo CAD teórico y la malla generada. Para ello, se emplea una herramienta específica del software que **cuantifica la desviación dimensional**.

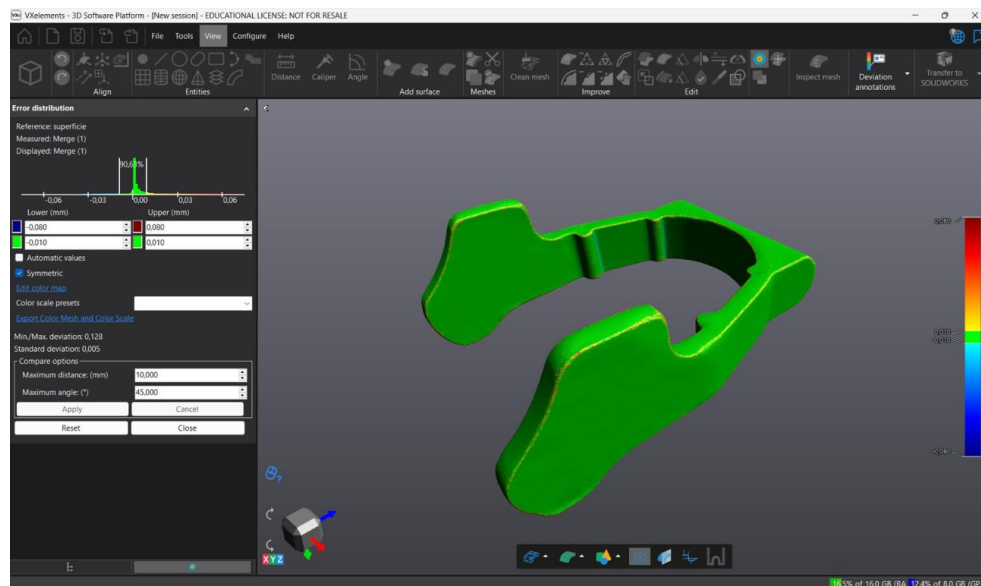


Figura 55. Estudio de la desviación dimensional de la malla frente a la superficie CAD ideal

Cómo se ilustra en la imagen, la mayor parte de la superficie (90.6%) se encuentra dentro de un intervalo de tolerancia de ± 0.01 mm, registrándose un error máximo de ± 0.08 mm. Este rango se considera plenamente aceptable, **validando el modelo** para proceder a la siguiente fase del flujo de trabajo

3.1.2.3 Modelado de la geometría

Para finalizar, se exportaron todas las entidades del modelo en formato .igs (IGES) con el propósito de conservar tanto la malla como elecciones generales para su posterior tratamiento en el software de Solid Edge. Una vez realizado este paso, resulta necesario tomar medidas dimensionales de la pieza original para proceder con las operaciones de corte

requeridas en el modelo digital. A priori, este procedimiento puede parecer directo; sin embargo, la curvatura del componente y la complejidad para establecer referencias estables entre las distintas cuotas dificulta el proceso.

Cómo soluciona este inconveniente, se decidió diseñar y fabricar un **útil** específico que serviría para tomar referencias espaciales desde el eje de unión con la tabla central del patinete. Para ello, se procedió a retirar el casquillo de deslizamiento de la pieza, y colocar en su lugar una barra de aluminio de 12 mm con una longitud adecuada, cortada mediante la sierra continua vertical disponible en los laboratorios, que permitiera realizar las mediciones de manera ortogonal. Como apoyo a este proceso y para la toma de medidas dimensionales, se emplearon dos tornillos M6 y M8 roscados directamente en la pieza; de este modo, se dispuso de puntos físicos de referencia que facilitaron el uso del calibre y garantizaron la precisión en la medición de distancias entre ejes.



Figura 56. Útil y tornillos de medición

Posteriormente, se efectuó la toma de cuotas mediante un calibre digital de resolución 0.01 mm, plasmando los datos en un croquis para la posterior generación de dichas geometrías en el entorno CAD. En la siguiente imagen se presentan, por un lado, la totalidad de los bocetos y vaciados ejecutados, junto con el modelo geométrico final obtenido:

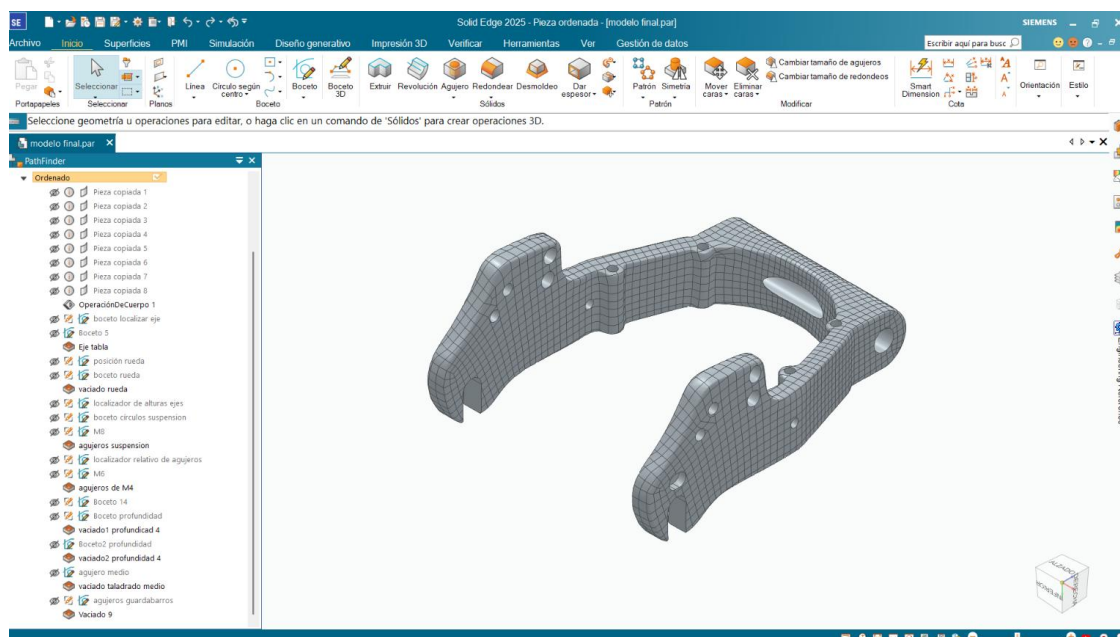


Figura 57. Modelo final CAD tras los ajustes realizados a la malla escaneada

3.1.3 DISEÑO CAD

Ante la posibilidad de que el proceso de optimización genere errores derivados de la complejidad de la malla escaneada, se ha optado por desarrollar la geometría mediante un diseño manual en el software Solid Edge. Puesto que se dispone de las dimensiones de posicionamiento, el procedimiento se limita a la toma de medidas de las caras y superficies exteriores.

Tras ejecutar las operaciones de extrusión y vaciado de los bocetos que se observan en el Pathfinder, se obtuvo la geometría final algo simplificada. Los resultados obtenidos son equiparables a la pieza original; por tanto, el proceso de optimización y procesamiento de malla se empleará únicamente si surgen dificultades computacionales significativas.

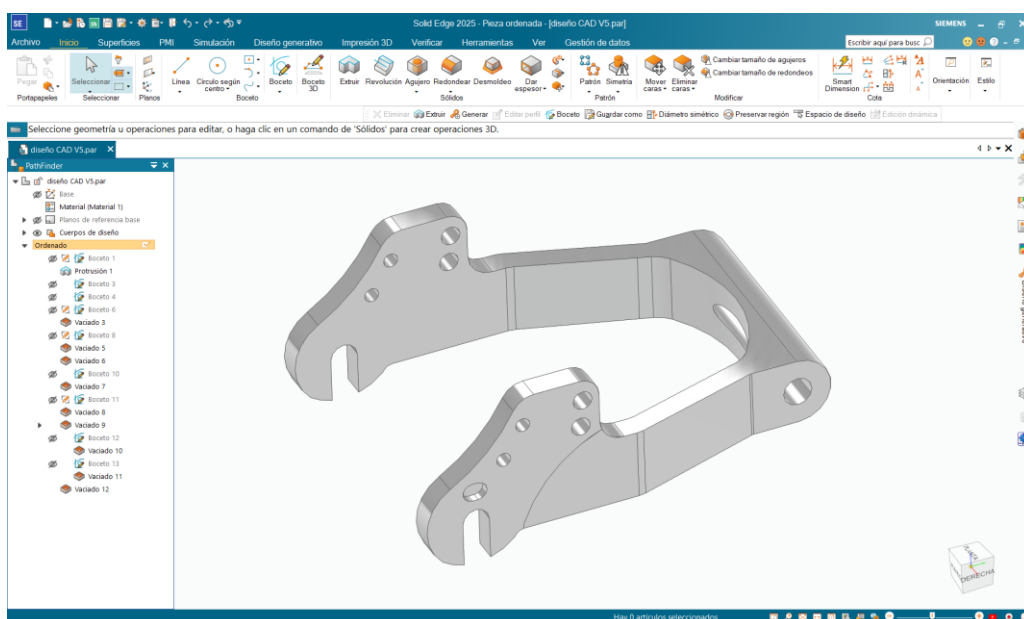


Figura 58. Diseño CAD realizado manualmente

3.2 ENTORNO DE SIMULACIÓN Y OPTIMIZACIÓN

En este capítulo se delimita el marco metodológico y computacional empleado para el desarrollo del análisis estructural y la posterior optimización del componente. Para ello, en primer lugar, se establece el flujo de trabajo secuencial, el cual determina las directrices operativas hasta la obtención de la geometría final, así como el correspondiente estudio de cargas y esfuerzos.

3.2.4 FLUJO DE TRABAJO

En primer lugar, se llevará a cabo el análisis de cargas partiendo del peso estático del conjunto y teniendo en cuenta la acción de la suspensión, la pinza de freno anclada al basculante y los dos puntos de apoyo principales: el eje de la rueda y el eje de acoplamiento con el chasis central del patinete.

Se proseguirá utilizando el software Solid Edge, realizando simulaciones estructurales sobre el componente mediante la selección del aluminio L-2560 como material, aplicando las

cargas calculadas anteriormente, así como las restricciones y condiciones de contorno pertinentes. A partir de este análisis, se obtendrán las tensiones máximas, los desplazamientos y la capacidad de optimización del diseño.

Por otra parte, mediante el módulo de diseño generativo de este mismo entorno computacional, se estudiará la geometría más adecuada bajo las condiciones impuestas, evaluando de forma exhaustiva el potencial de reducción de masa porcentual.

Finalmente, se empleará el software Altair Inspire para la simplificación de la malla obtenida y la modificación de esta, con el propósito de lograr un aspecto más orgánico y limpio que optimice su viabilidad de fabricación.

3.2.5 ANÁLISIS DE CARGAS

Para comenzar el análisis de cargas, es fundamental comprender el funcionamiento del sistema e identificar la ubicación espacial de este componente dentro del conjunto global del patinete. Para ello, se introducen a continuación las ilustraciones pertinentes que ayudan a su contextualización y localización en el ensamblaje.



Figura 59. Conjunto de Ensamble en patinete



Figura 60. Esquema para funcionalidad de los orificios

Posteriormente, se determinarán los esfuerzos a los que está sometido el componente mediante el planteamiento de hipótesis, simplificaciones y cálculos analíticos, con el propósito de determinar las cargas críticas de diseño.

3.2.5.1 Cálculo de esfuerzos en el eje de apoyo de la rueda trasera

Para la realización de este análisis mecánico, se deben considerar principalmente tres factores de diseño.

En primer lugar, el basculante no presenta una disposición completamente horizontal; por motivos funcionales, su geometría se posiciona en un ángulo comprendido entre los 15° y los 30° respecto a la horizontal. Esta inclinación condiciona analíticamente todo el sistema, estableciendo dos estados límite de carga. El escenario más crítico se localiza en la posición de 15° , debido a que en esta configuración el amortiguador debe ejercer la máxima fuerza para contrarrestar la reacción transmitida desde el firme a través del conjunto de la rueda y su eje.

En segundo lugar, se establece una masa total de diseño de 125 kg, la cual se distribuye con un reparto del 60% sobre el eje trasero debido a la posición del conductor (ε).

Finalmente, con el propósito de evaluar el componente ante solicitaciones extremas, se aplica un factor de carga dinámica de 3g que simula el impacto de la rueda al transitar por una irregularidad o bache en la calzada. [38] [39]

A partir de estas consideraciones fundamentales, se procede en primer término a la determinación de las fuerzas transmitidas desde la rueda hacia sus correspondientes apoyos en el eje.

Cálculo de reacción vertical:

$$F_{vert} = m * 3g * \varepsilon = 125 * 3 * 9.81 * 0.6 = \mathbf{2207.25\ N}$$

Cálculo de fuerza frente aceleración brusca:

Dado que el radio efectivo de la rueda en este tipo de vehículos ligeros es de 5 pulgadas (equivalente a 127 mm), y considerando que el patinete eléctrico tomado como objeto de estudio (SmartGyro Speedway en su variante bimotor) integra sistemas de propulsión independientes por eje, con un motor de potencia nominal $P_N = 500\ W$ a cada rueda. Aunque la capacidad térmica y magnética de estos motores síncronos permitiría alcanzar picos de potencia de entre dos y tres veces su valor nominal, el sistema se encuentra acotado por restricciones de electrónica de potencia.

En concreto, esta unidad impone una limitación de intensidad máxima de 23 A para garantizar la integridad de los componentes. Asimismo, el sistema de almacenamiento de energía presenta una tensión nominal de $V_N = 48\ V$, aunque al terminar el proceso de carga es capaz de aportar una tensión máxima real de $V_{max} = 54.6\ V$. [40]

Teniendo en cuenta estos condicionantes eléctricos, así como una velocidad máxima de operación sin limitación electrónica estimada en el rango de los 30 a 35 km/h, se procede con el cálculo de los esfuerzos transmitidos al eje de apoyo trasero:

$$v = 33 \frac{km}{h} * \frac{1 h}{3600 s} * \frac{1000 m}{1 km} = 9.1667 \frac{m}{s}$$

$$P_{max} = V_{max} * I = 54.6 V * 23 A \approx 1250 W$$

$$T = \frac{P}{w} = \frac{P * r}{v} = \frac{1250 * 0.127}{9.1667} = 17.32 Nm$$

A diferencia de los motores de combustión interna, que requieren alcanzar un régimen de revoluciones elevado para desarrollar su par máximo, los motores síncronos de imanes permanentes exhiben su par máximo desde el estado de reposo (*0 rpm*). Este comportamiento se debe a que el par motor es directamente proporcional a la intensidad de corriente inyectada por el inversor, cuya respuesta dinámica es prácticamente instantánea. Esta característica operacional explica la elevada aceleración inicial inherente a los vehículos eléctricos.

Por consiguiente, dado que el valor máximo de par se localiza en la fase de arranque inicial, se procede a contrastar dicho escenario crítico con los cálculos analíticos previos. Tomando como referencia ensayos de caracterización de máquinas eléctricas de prestaciones homólogas a la del vehículo de estudio, se establece un par máximo de arranque de:

$$T_{max} = 60 Nm$$

Por lo que, aplicado a esta rueda en concreto, se transformaría en una fuerza equivalente:

$$F_{acc} = \frac{T}{r} = \frac{60 Nm}{0.127 m} \approx 500 N$$

Esta fuerza se aplicará de forma horizontal con un ángulo de desvío equivalente a la inclinación del basculante, además, dado que se trata de una aceleración, la fuerza irá en la dirección de avance.

Cálculo para frenada brusca:

En este escenario, se considera la carga estática correspondiente al conjunto conductor-vehículo junto con la aproximación metodológica previa, la cual asigna una contribución del

60% de la masa sobre el eje trasero. Adicionalmente, ante una solicitud de frenado de emergencia o brusco, el neumático alcanzará su límite de adherencia y tenderá al deslizamiento. Por este motivo, se introduce el coeficiente de fricción entre el asfalto y el compuesto de caucho del neumático, cuyos valores de diseño se establecen en 0,6 para régimen dinámico y 0,7 para régimen estático. Con el propósito de evaluar la condición crítica de máxima transferencia de esfuerzo, el análisis analítico se desarrollará empleando este último coeficiente de adherencia máximo.

$$F_{roz-fren} = \varepsilon * m * 3g * \eta = F_{vert} * 0.7 = 1545 \text{ N}$$

Pese a ser una fuerza en la misma línea de acción que el escenario anterior, esta induce solo el basculante una fuerza en sentido opuesto. Además, de cara a posteriores análisis estructurales del sistema en conjunto, se deben considerar qué estas fuerzas no podrán actuar de forma simultánea.

Cálculo de fuerza transversal:

Al presentar un comportamiento análogo de pérdida de adherencia en el neumático, el módulo de la fuerza longitudinal resultante coincide con el valor de la fuerza de frenado calculado en el escenario precedente: $F_{transversal} = 1545 \text{ N}$

3.2.5.2 Cálculo de reacciones en el soporte de la pinza de freno

La pinza de freno genera una fuerza tangencial y opuesta al sentido de giro del disco para desacelerar el movimiento del vehículo. Por el principio de acción-reacción, este componente experimenta una fuerza reactiva que se orienta con una inclinación de 55° respecto a la horizontal. Dicho esfuerzo se transmite a través de la estructura de la pinza hasta localizarse en los: de anclaje solidarios al basculante trasero.

Para el desarrollo de este análisis estático, se asume un ángulo constante de posicionamiento de la pinza de freno de 25° respecto al eje longitudinal del componente objeto de estudio.



Figura 61. Ángulo de aplicación de la fuerza de frenado

A continuación, se determina la fuerza máxima ejercida por la pinza de freno, para posteriormente, calcular las fuerzas equivalentes y los puntos de anclaje de interés.

Los discos de freno integrados en este tipo de vehículos ligeros presentan habitualmente diámetros nominales de 140 mm o 160 mm. Para el presente análisis se selecciona el diámetro menor (140 mm), ya que esta configuración constituye el escenario más desfavorable desde el punto de vista mecánico además de ser la opción más común.

Por su parte, el ancho de pista de frenado, está condicionado por la geometría del disco y oscila habitualmente entre los 10 mm y los 15 mm. En esta aproximación analítica, se adoptará un valor intermedio de 12,5 mm.

Con estos parámetros geométricos y la fuerza de frenado se dispone de las variables necesarias para calcular la fuerza resultante que actúa sobre la pastilla de freno:

$$R_{pastilla} = R_{disco} - \frac{\text{ancho de pista}}{2} = \frac{140 + 12.5}{2} = 63.75 \text{ mm}$$

$$M_{frenado} = R_{rueda} * F_{roz} = R_{pastilla} * F_{freno}$$

$$F_{freno} = \frac{120 \text{ mm} * 515 \text{ N}}{63.75 \text{ mm}} = 969.41 \text{ N}$$

Dado que el disco de freno simplemente se sitúa en el lado izquierdo de la rueda si este se mira desde atrás, esta fuerza no se va a descomponer entre los dos brazos del basculante y habrá que tenerlo en cuenta durante las simulaciones y optimización topológica.

Por otra parte, todavía falta descomponer y trasladar esta fuerza a los: de interés. Para ello se seguirá el siguiente esquema, a través del cual se ha llegado al siguiente sistema de ecuaciones:

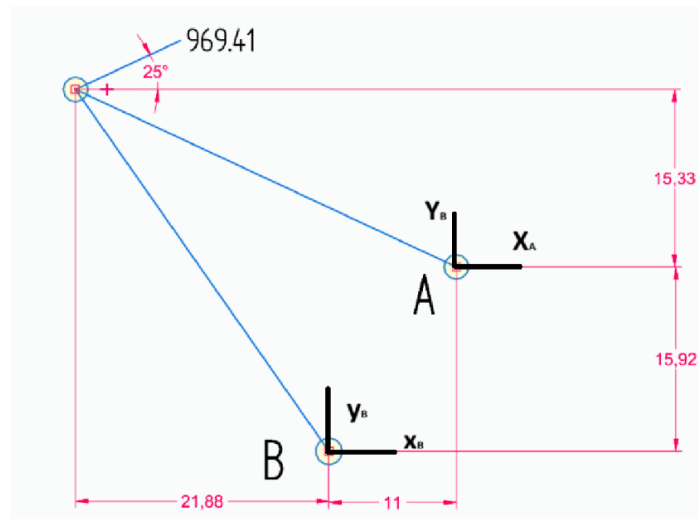


Figura 62. Esquema de cargas del sistema de frenado

Dónde:

$$969.41 * \cos(25^\circ) = 878.58$$

$$969.41 * \text{sen}(25^\circ) = 409.69$$

Y las ecuaciones formuladas son:

$$\Sigma F_x \rightarrow X_A + X_B = -878.58$$

$$\Sigma F_y \rightarrow Y_A + Y_B = -409.69$$

$$\Sigma M_A \rightarrow 15.92 * X_B - 11 * Y_B = 878.58 * 15.33 + 409.69 * 32.88$$

En este punto del análisis, hoy es posible plantear la ecuación del sumatorio de momentos respecto al punto B; sin embargo, dicha ecuación resultaría linealmente dependiente de las anteriores, lo que conduciría a un sistema hiperestático. Ante esta condición, y examinando la distribución geométrica de las cargas, se introduce la hipótesis de que la fuerza horizontal en el punto A duplica en magnitud a la del punto B. Esta aproximación se fundamenta en que el punto A se localiza, aproximadamente a la mitad de la distancia respecto al punto de aplicación de la carga, actuando bajo el principio de proporcionalidad.

$$X_A = 2 * X_B$$

La introducción de esta condición de contorno aporta la relación adicional necesaria entre ambas variables, transformando el problema en un sistema determinado de cuatro ecuaciones con cuatro incógnitas. Finalmente, la resolución numérica del sistema se lleva a cabo mediante herramientas de cálculo computacional (Matlab).

(Las soluciones que se muestran tienen el signo cambiado debido a que nosotros buscamos la reacción que sufre nuestro elemento mecánico)

$$X_A = 585.72 \text{ N} \quad ; \quad Y_A = -2463.18 \text{ N}$$

$$X_B = 292.86 \text{ N} \quad ; \quad Y_B = 2872.87 \text{ N}$$

3.2.5.3 Cálculo de esfuerzos en el anclaje de la suspensión

En este escenario, es necesario advertir que, si bien el componente dispone de 2 orificios diferenciados para la fijación del amortiguador, sus estados de carga resultan mutuamente excluyentes, por lo que únicamente operará uno de ellos de forma efectiva. Este diseño se implementa con el propósito de maximizar la versatilidad del elemento, permitiendo su adaptación a diferentes configuraciones de vehículos y sistemas de suspensión.

De cara al presente análisis estructural, se determinará la condición de contorno más restrictiva mediante el estudio comparativo de ambas posiciones, seleccionando de forma justificada aquella configuración que introduzca el estado tensional de mayores esfuerzos.

En ambos escenarios, considerando que la fuerza de frenado induce una reacción opuesta a la carga vertical en el eje de la rueda, los análisis subsiguientes se desarrollarán omitiendo las cargas de frenado. Adicionalmente, dado que la fuerza tangencial derivada de la aceleración del vehículo se aplica en la misma línea de acción que el centro de rotación, el brazo de palanca asociado es nulo, anulando cualquier contribución al sumatorio de momentos en dicho punto.



Figura 63. Ángulo de inclinación de la suspensión frente al eje longitudinal

La siguiente figura proporciona un esquema donde se ilustra la divergencia geométrica entre ambos escenarios de posicionamiento. En ella se identifica un punto de referencia (marcado con color amarillos) que representa es la articulación del inicio del brazo de suspensión. Esta disposición implica que, en la configuración superior, la línea de acción de la fuerza se alinea de forma coaxial con el eje longitudinal. Por el contrario, en el segundo escenario, la desalineación induce un ángulo de inclinación α .

$$\alpha = \text{atan}\left(\frac{37.46 - 25.62}{98.68}\right) = 6.5^\circ$$



Figura 64. Sistema de cotas para el cálculo de la fuerza de suspensión

A partir de estas condiciones, geometría, y aplicando las ecuaciones de equilibrio de momentos respecto al origen de coordenadas establecido en la figura, se determina analíticamente la fuerza que debe soportar el componente. Este sistema de fuerzas es el encargado de contrarrestar la reacción ejercida por el conjunto de la rueda sobre su eje de apoyo, cuyo valor fue previamente calculado en el apartado 3.2.2.1.

La magnitud de esta fuerza se encuentra condicionada por el ángulo de inclinación del basculante, el cual, como se justificó previamente, oscila en el rango entre 15° y 30°. Para el desarrollo, se adoptará el límite inferior por ser el más crítico y desfavorable para el dimensionamiento estructural.

Agujero inferior:

$$2207.25 * \cos(15^\circ) * 144.25 = F * \sin(6.5^\circ) * 98.68 + F * \cos(6.5^\circ) * 25.62$$

$$F_{susp-inf} = 8396.9 \text{ N}$$

Agujero superior:

$$2207.25 * \cos(15^\circ) * 144.25 = F * 37.46$$

$$F_{susp-sup} = 8210 \text{ N}$$

3.2.6 SIMULACIÓN

3.2.6.1 *Objetivo*

Dentro del entorno de Solid Edge, se ubica el módulo de simulación en la interfaz superior. Este apartado constituye un Pilar fundamental del proyecto ya que, a pesar de haber modelado con fidelidad tanto la geometría como el esquema de cargas, es imperativo verificar que el componente no sufra fallos estructurales ni deformaciones plásticas ante la aplicación de la carga crítica calculada.

Mediante este módulo, es posible analizar y contrastar las tensiones a las que se somete el material, utilizando mapas de color para identificar con precisión las zonas críticas y los desplazamientos de la estructura. De este modo, sí evalúa si la pieza cumple con los criterios de diseño establecidos o si, por el contrario, se requiere un rediseño geométrico o una revisión de las cargas de diseño.

3.2.6.2 *Caracterización del material*

Para que el software Solid Edge pueda ejecutar los cálculos numéricos de la simulación, es imprescindible definir tanto el material de estudio como sus propiedades mecánicas.

Para el desarrollo del modelo final se empleará una aleación de aluminio, solución habitual en componentes estructurales de automoción y otros de vehículos. En concreto, se ha seleccionado el aluminio L-2560 (AlSi10Mg), Caracterizado por su excelente contabilidad y soldabilidad. Así mismo, al tratarse de un material con una dureza moderada, es ideal para los procesos de mecanizado posteriores. Dado que el material se encuentra en estado recocido (sin tratamiento térmico), sus propiedades mecánicas podrían incrementarse significativamente mediante un tratamiento de endurecimiento por precipitación, siendo el T6 el más común para esta aleación. Dicho proceso permitiría aumentar alrededor de un 110% tanto la resistencia máxima como el límite elástico, proporcionando un margen de seguridad superior ante situaciones de cargas extremas, anómalas y poco recomendadas. [41]

En la siguiente figura se detallan las propiedades mecánicas y la hoja de especificaciones del material seleccionado en donde se han empleado valores intermedios dentro el amplio rango posible de tensión de rotura y límite elástico:

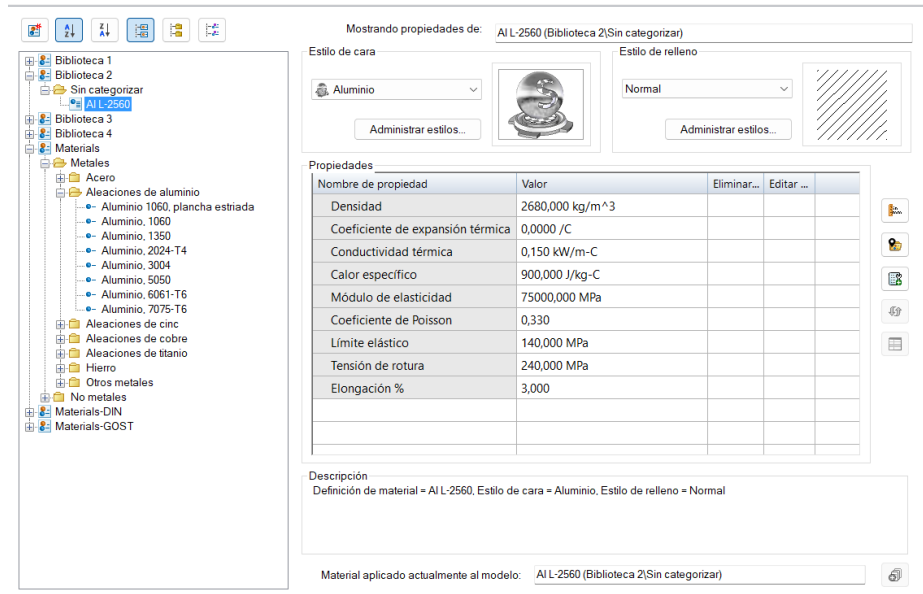


Figura 65. Caracterización aluminio L-2560 en Solid Edge

3.2.6.3 Configuración previa a la simulación

Previamente al análisis, además de las cargas de diseño establecidas, es necesario definir las restricciones de movimiento, los puntos de apoyo y las articulaciones. Al tratarse de un estudio estático lineal en el escenario de mayor sollicitación mecánica -correspondiente al instante que el basculante alcanza su inclinación mínima de 15°-, resulta imprescindible modelar el apoyo de la rueda como una articulación. De lo contrario, el modelo no describiría fielmente el comportamiento real del sistema, y las fuerzas aplicadas provocarían la rotación del basculante.

Por otra parte, debido a la existencia de 2 posiciones de amortiguación diferentes, el análisis se ha ejecutado de manera idéntica para ambas configuraciones, seleccionando finalmente la posición inferior por prestar el escenario más restrictivo.

Así mismo, tal y como se anticipó, la malla de puntos digitalizada genera excesivas y irregularidades superficiales a pesar de los procesos previos de suavizado y simplificación, esto incrementa exponencialmente el tiempo de computación en esta fase. Este factor, proyectado hacia el posterior análisis de optimización topológica, exigiría algoritmos de cálculo notablemente más complejos, tiempos de proceso inviables y unos requerimientos de memoria RAM superiores a la capacidad de computación disponible.

Por este motivo, y a pesar de haber completado satisfactoriamente el proceso de ingeniería inversa, se termina **continuar el desarrollo del proyecto** trabajando sobre el modelo **sólido diseñado directamente mediante CAD**.

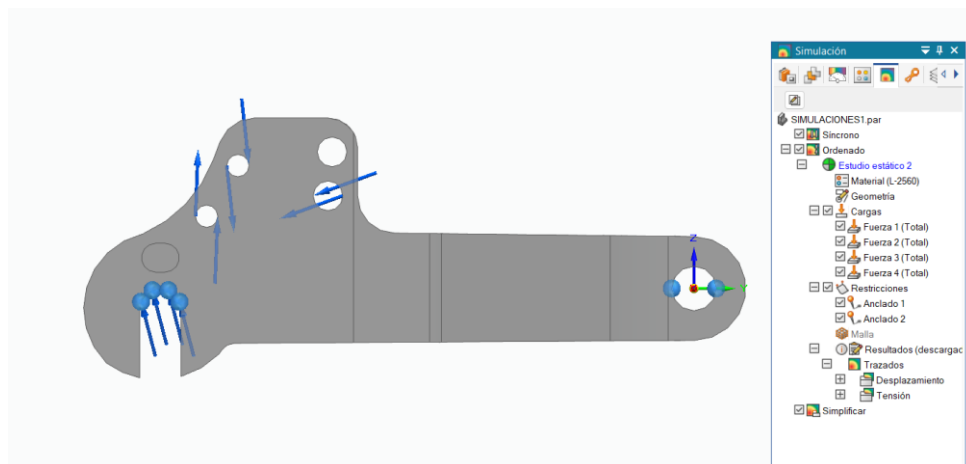


Figura 66. Aplicación de fuerzas para el estudio de simulación

3.2.6.4 Resultado y Conclusiones

Para esta configuración, el resultado obtenido fue favor, puesto que la **tensión máxima** registrada es de **77 MPa**, un valor significativamente inferior al límite elástico establecido de aproximadamente 140 MPa.

Al analizar el mapa de tensiones y la leyenda correspondiente en el margen derecho de la figura, se observa que la mayor parte de la geometría se encuentra en un rango comprendido

entre los 10 y los 25 MPa. Este escenario de bajas solicitaciones globales resulta idóneo para la generación de formas orgánicas y vástagos mediante optimización topológica.

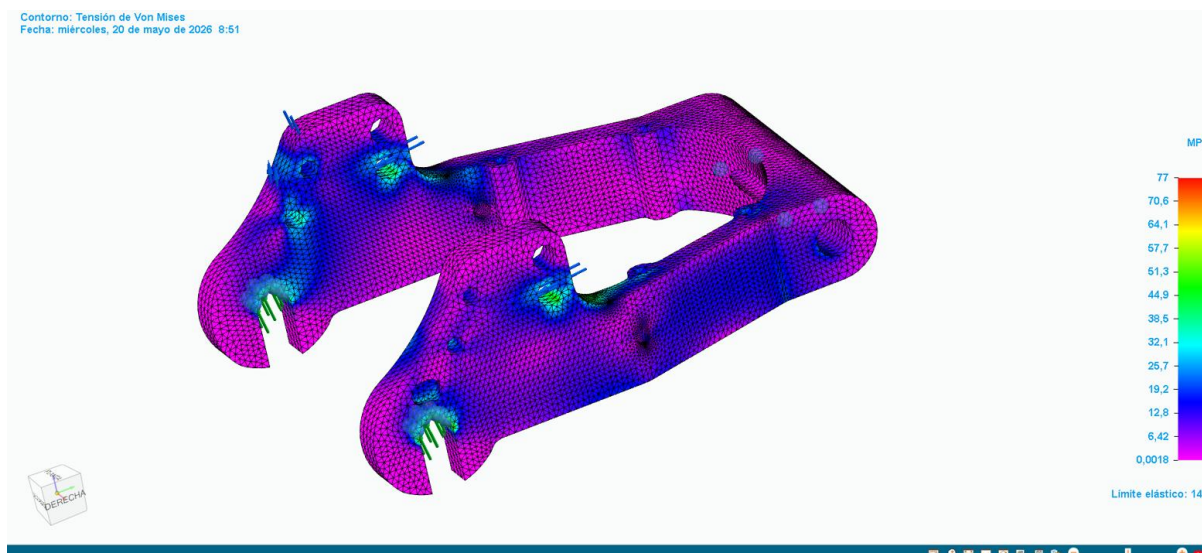


Figura 67. Resultado simulación con Solid Edge

Por otra parte, tal y como se aprecia en la figura, las regiones que concentran las mayores tensiones coinciden con los puntos de aplicación de las cargas. Por consiguiente, resulta imprescindible preservar tanto la geometría general del componente como la integridad de estas zonas de alta sollicitación.

3.2.7 DISEÑO GENERATIVO

3.2.7.1 Área de trabajo en Solid Edge

Paralelamente al módulo de simulación, se sitúa el espacio de diseño generativo. Como se expuso en el estado del arte, este entorno implementa el método de elementos finitos (FEM) a partir de un mallado inicial del componente, permitiendo evaluar de forma iterativa qué elementos discretos de la malla presentan mayor relevancia estructural ante las sollicitudes de carga aplicadas.

De este modo, el algoritmo converge en una geometría optimizada con una masa significativamente reducida, garantizando al mismo tiempo un estado tensional similar y seguro respecto al modelo inicial.

3.2.7.2 configuración previa a la optimización

Al igual que en la simulación, se deben determinar previamente tanto parámetros como restricciones del sistema. Dado que el material ya se incluyó en las librerías de Solid Edge durante el anterior apartado, no es necesario volverlo a incluir, simplemente seleccionarlo.

Además de este, hay otros tres parámetros fundamentales a determinar antes de la optimización.

Regiones preservadas:

Este apartado constituye una de las fases más críticas del análisis, puesto que no solo se deben considerar las tensiones mecánicas que soporta el componente, sino también los factores de seguridad y las zonas de ensamblaje con otros elementos.

Al tratarse de un componente estructural de automoción expuesto al exterior, la geometría resultante debe responder a criterios de viabilidad técnica y funcional. Por este motivo, se determinó preservar tanto la cara superior como la inferior del perfil, estableciendo un espesor constante de 2,5 mm.

Por otra parte, la región del eje principal se definió como una zona restringida por constituir una de las principales zonas críticas. Dado a un error del programa que solo permitía preservar su geometría en un radio de 6 mm, se tuvo que preservar de la misma manera que los perfiles, la superficie exterior curva del basculante.

Finalmente, debido a que las iteraciones previas de optimización no se obtuvieron soluciones convergentes o satisfactorias en el entorno de aplicación de las fuerzas (zona izquierda de la figura), se decidió incorporar dichas caras a la geometría a preservar.

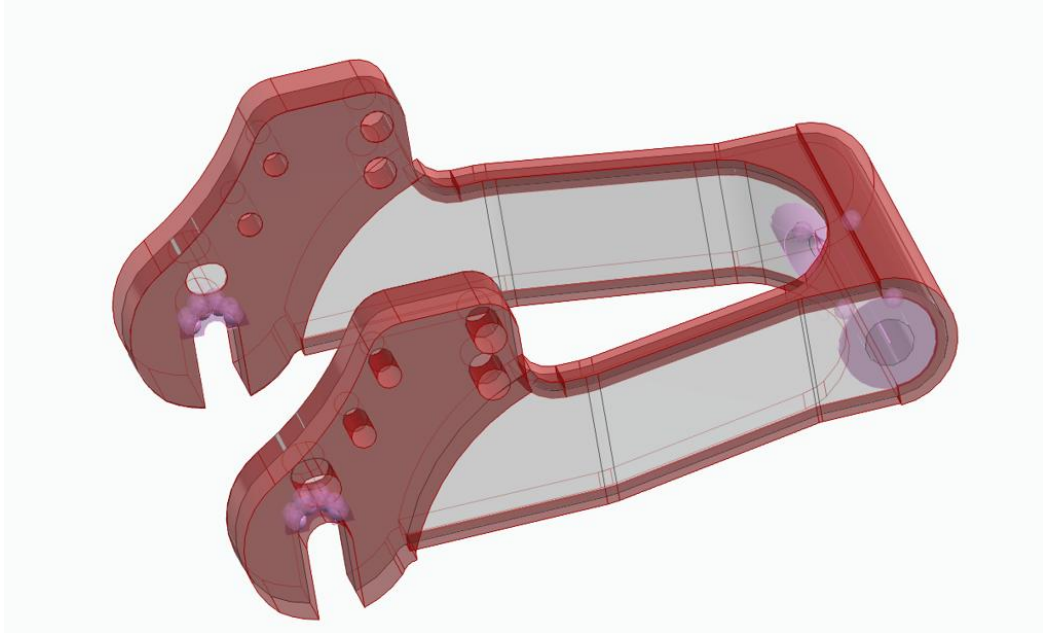


Figura 68. Zonas preservadas durante la optimización

Con la definición de estas restricciones geométricas, el espacio de diseño queda agotado de forma que el algoritmo limite su actuación exclusivamente al núcleo interno de la pieza, asegurando así la funcionalidad del ensamblaje.

Aplicación de cargas:

El escenario de cargas aplicado es equivalente al descrito en el apartado anterior. La única particularidad metodológica radica en que el software requiere la definición de regiones preservadas (*preserve regions*) en torno a los puntos de aplicación de los esfuerzos.

En esta fase, se identificaron diversas divergencias y errores de cálculo durante las iteraciones de optimización, causados por la intersección geométrica entre ciertas áreas preservadas o debido a que estas excedían los límites del volumen asociado al espacio de diseño. Por este motivo, se desarrollaron dos esquemas de carga diferenciados, los cuales se exponen a continuación:

- **Esquema de carga convencional:** Representa el escenario habitual y de mayor fidelidad respecto al comportamiento real, donde las fuerzas se aplican directamente sobre las operaciones mecánicas de la pieza. El volumen marcado en color violeta define el espacio preservado, introducido en el entorno de Solid Edge mediante un desfase geométrico u offset (denominado genéricamente como desplazamiento en la interfaz), el cual delimita la región inmune a la eliminación de material sin implicar restricciones cinemáticas.

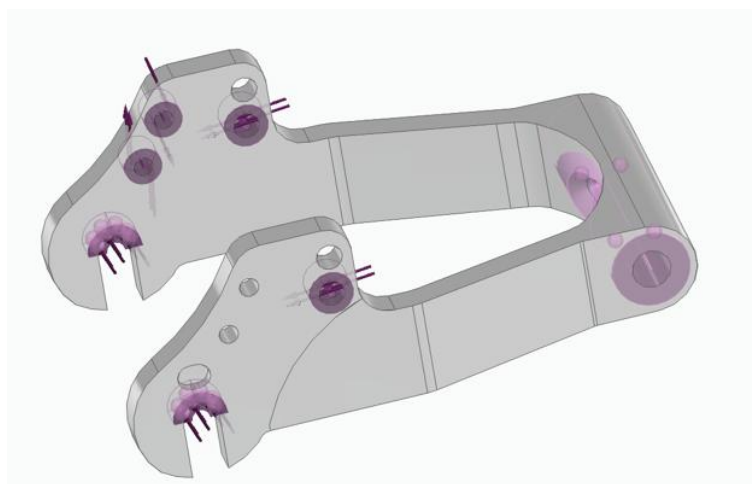


Figura 69. Aplicación de cargas puntuales para la optimización

- **Esquema de carga simplificado:** Ante las colisiones geométricas y los errores numéricos derivados del modelo anterior, se optó por estructurar un sistema de cargas simplificado para solventar dichas inconsistencias.

Como se ilustra en la figura correspondiente (Figura 69.), las cargas se aplicaron de forma conjunta sobre las superficies de acoplamiento. Dado que el objetivo del análisis no contempla la optimización de estas geometrías de contacto, y habiendo constatado que las concentraciones de tensión se localizan en ellas y no en los ‘brazos’ del basculante, este planteamiento resulta mecánico y conceptualmente coherente para la consecución del diseño final.

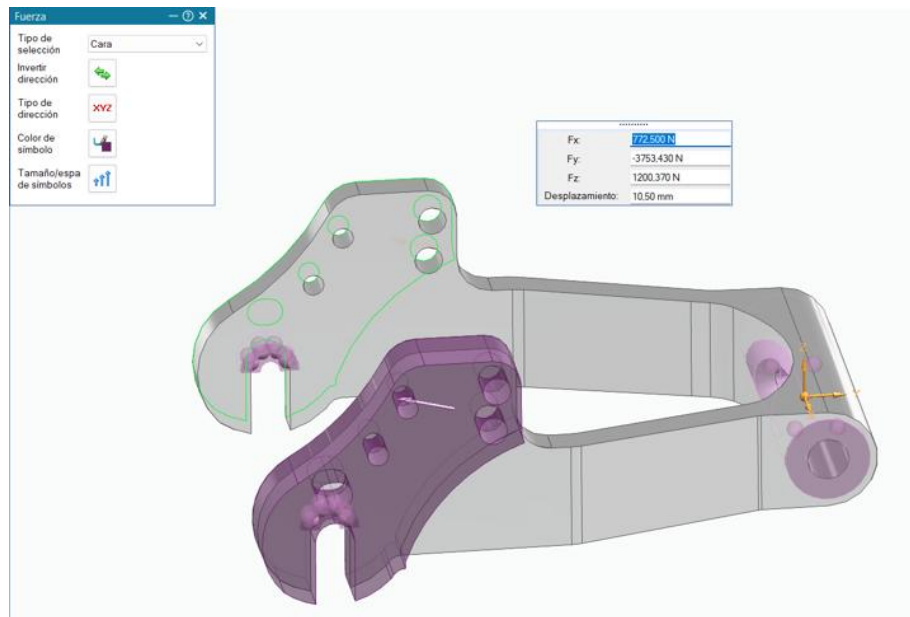


Figura 70. Aplicación de cargas distribuidas para la optimización

3.2.7.3 Proceso Iterativo y análisis post-optimización

Puesto que el resultado de la optimización converge en función del tamaño de vóxel (*volumetric pixel*) y del porcentaje de reducción de masa objetivo, se identificó la necesidad de seleccionar un tamaño de malla intermedia. Una dimensión de vóxel excesivamente grande penalizaría la resolución geométrica de los resultados, Generando soluciones indefinidas y poco deseables. Por el contrario, un tamaño excesivamente reducido incrementaría el coste computacional de forma inviable, elevando el tiempo de proceso por encima de las 5 horas o provocando la saturación de la memoria del sistema debido a una elevada complejidad de cálculo numérico.

Por este motivo, durante las sucesivas iteraciones analíticas se estipuló un **tamaño de vóxel constante** de 0,85 mm. A partir de esta discretización, se incrementó progresivamente el porcentaje de reducción de masa desde un valor inicial del 10%. Tras evaluar múltiples escenarios, se constató un límite crítico a partir del cual el algoritmo comenzaba a remover material de las regiones preservadas en las etapas previas.

Para reflejar de manera sintética la evolución del componente y el comportamiento del modelo analítico durante este proceso, se recoge en la Tabla 4 algunas de las principales y más destacables iteraciones ensayadas hasta converger en el diseño definitivo:

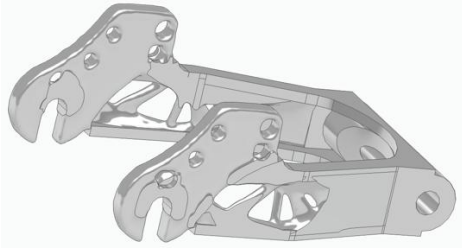
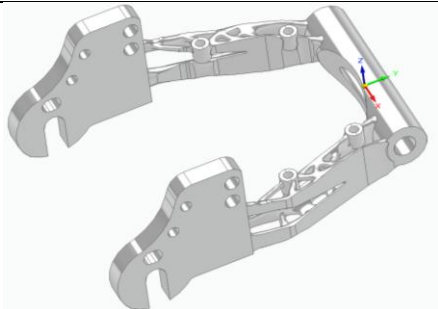
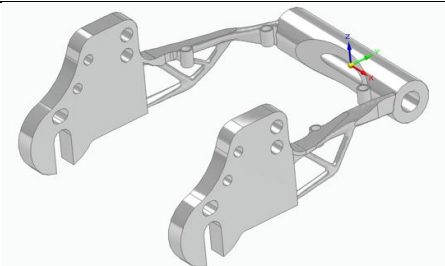
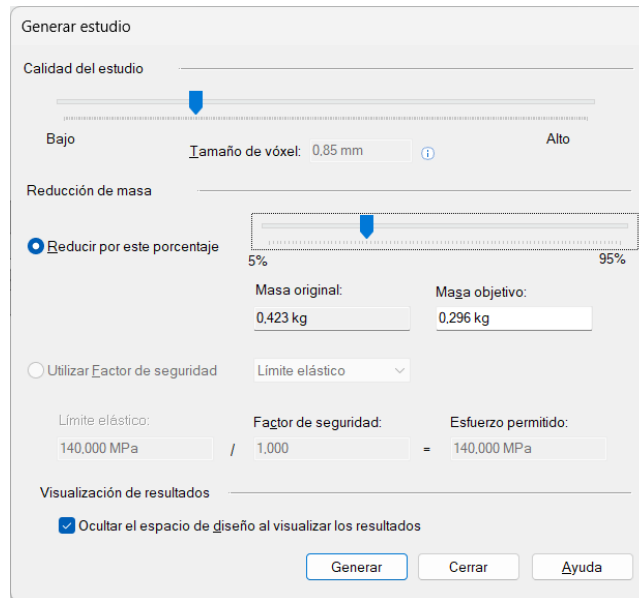
Resultado	Masa final y % de reducción	Anotaciones/ Análisis
 Figura 71. 1ª iteración OT	0.317 kg 25%	<ul style="list-style-type: none"> - Modificación de zonas preservadas. - Creación de sobreespesores. - Reducción de masa insuficiente.
 Figura 72. 2ª Iteración OT	0.275 kg 35%	<ul style="list-style-type: none"> - Vulnerabilidad estructural en el entorno del eje transversal - Transición geométrica abrupta entre la geometría optimizada y la preservada.
 Figura 73. 3ª Iteración OT	0.2538 kg 40%	<ul style="list-style-type: none"> -Reducción de masa excesiva. - Presencia de elementos aislados o no conectados con el resto de la geometría.

Tabla 4. Historial de optimizaciones

Finalmente, en una de las distintas iteraciones se determinó que el umbral óptimo para la

optimización topológica de este componente en el entorno de Solid Edge se situaba en un 30% de reducción de masa, logrando disminuir el peso del elemento desde los 0,423 kg iniciales hasta los 0,296 kg finales.



Generar estudio

Calidad del estudio

Bajo Tamaño de vóxel: 0.85 mm Alto

Reducción de masa

☒ Reducir por este porcentaje 5% 95%

Masa original: 0,423 kg Masa objetivo: 0,296 kg

☐ Utilizar Factor de seguridad Límite elástico

Límite elástico: 140.000 MPa Factor de seguridad: 1.000 Esfuerzo permitido: 140.000 MPa

Visualización de resultados

☒ Ocultar el espacio de diseño al visualizar los resultados

Generar Cerrar Ayuda

Figura 74. Parámetros de optimización

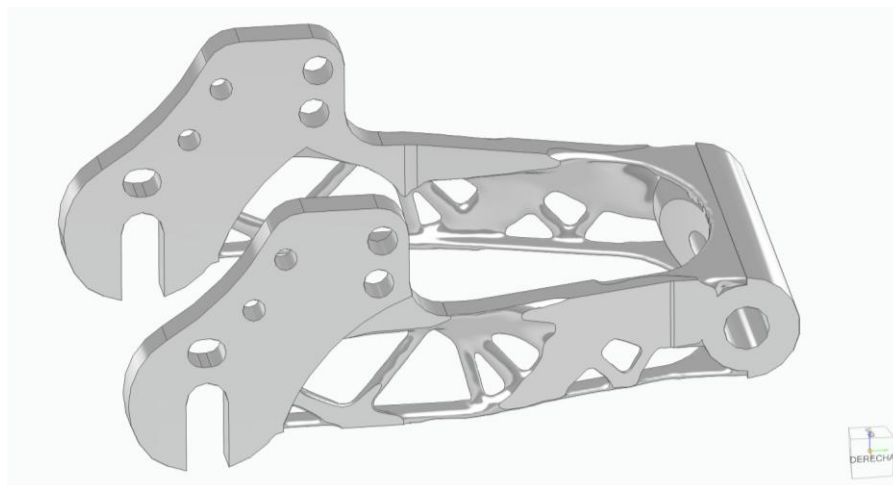


Figura 75. Solución del modelo optimizado por Solid Edge

A pesar de que esta optimización no constituye el modelo definitivo, sí que es un buen punto

de comienzo para acometer las posteriores operaciones de suavizado de superficies, corrección de errores y reconstrucción de aquellas cavidades cuya geometría se considere conveniente mantener.

3.2.7.4 Postprocesado y Reconstrucción Geométrica en Altair Inspire

El desarrollo de esta fase se ha ejecutado en el entorno de Altair Inspire, utilizando una licencia de uso académico. Para ello, el modelo optimizado previamente se exportó en formato de malla poligonal (.stl), permitiendo su posterior importación en el nuevo espacio de trabajo.

Dentro de esta plataforma, el proceso se centró en el módulo **de modelado PolyNURBS**. Esta herramienta posibilita la conversión de mallas procedentes de una optimización topológica en geometrías CAD continuas y de superficies suavizadas, mediante la generación de parches poligonales que envuelven el diseño orgánico preliminar. Con el propósito de reducir el coste computacional y facilitar la manipulación del modelo sin incurrir en una pérdida significativa de resolución geométrica, se simplificó la estructura PolyNURBS, disminuyendo el número de polígonos desde los 2500 iniciales hasta 850. Adicionalmente, con el fin de optimizar el comportamiento mecánico y asegurar la viabilidad de la posterior manufactura, se incrementó la sección de determinados nervios estructurales mediante comandos de edición directa. Asimismo, se generó un nuevo nervio o vástago de refuerzo orientado a incrementar la rigidez de la estructura y mitigar las deformaciones.

Posteriormente, se aplicaron algoritmos de reparación geométrica en combinación con modificaciones manuales, logrando ocluir cavidades residuales de la malla y subsanar discontinuidades internas en la geometría. Este procedimiento permitió consolidar una estructura PolyNURBS cerrada apta para ser transformada en un modelo de superficies mediante herramientas de modelado implícito.

Finalmente, en el módulo de geometría se efectuó una operación booleana de sustracción; mediante este procedimiento, se eliminaron del modelo optimizado aquellas regiones correspondientes a las zonas preservadas que, durante el postprocesado orgánico, habían alterado sus dimensiones nominales. Tras esta acción, se realizó una segunda operación booleana de unión o combinación de superficies entre el cuerpo optimizado residual y las geometrías originales de las zonas preservadas, con la intención de restituir así las dimensiones de montaje requeridas.

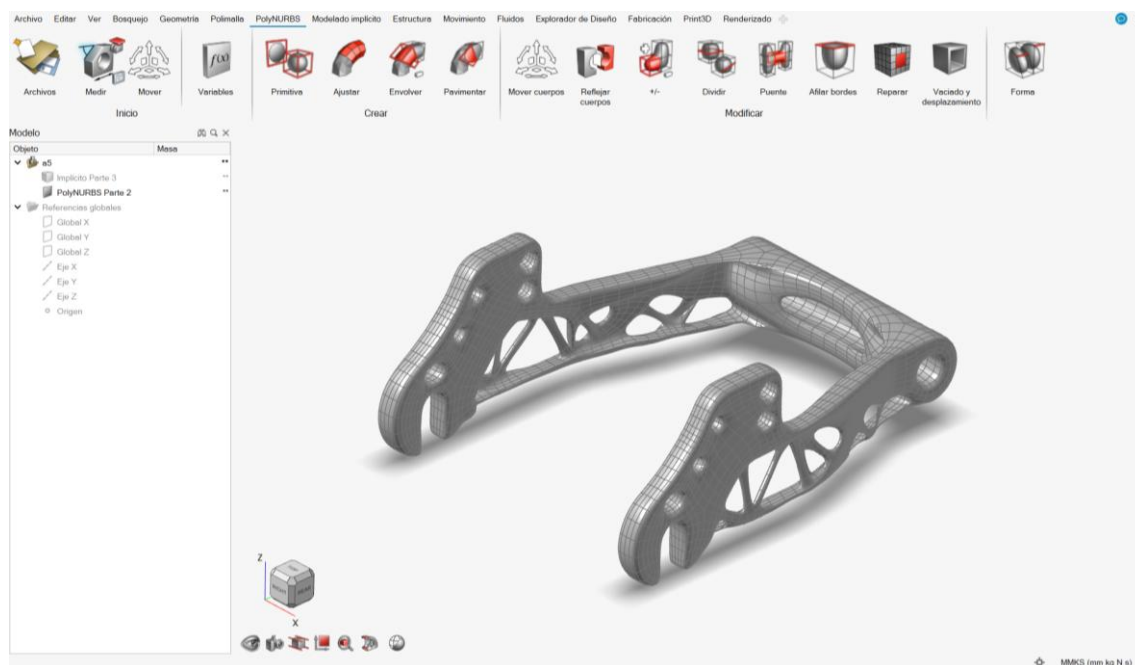


Figura 76. Resultado de la malla tras el uso de Altair

Debido a las modificaciones manuales introducidas en la etapa previa, la geometría final resultante presentaba cierta asimetría. Para corregir esta condición y asegurar la simetría del componente, se aprovechó la alineación del sistema de coordenadas global cuyo plano YZ se había hecho coincidir estratégicamente con el plano de simetría de la pieza. Hoy de este modo, se ejecutó una operación de corte sobre dicho plano, para posteriormente realizar una copia simétrica del semimodelo optimizado.

Para llevar a cabo este procedimiento, fue necesario volver al entorno de Solid Edge. Dado que ambas plataformas de software son compatibles con el formato de intercambio de datos Parasolid (.x_t y .x_b), se garantizó una transferencia de archivos sin pérdida de precisión dimensional. Así mismo, mediante la configuración de los parámetros de importación en el software de destino, se automatizó la conversión de la estructura de superficies en un modelo sólido y editable.

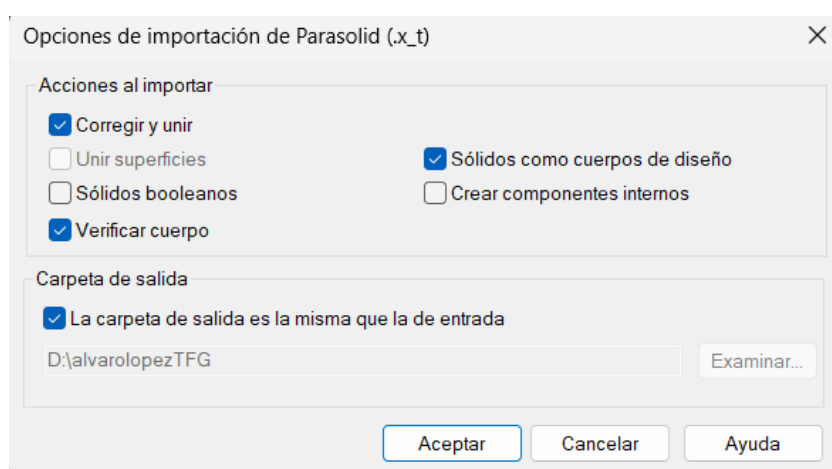


Figura 77. Opciones de importación de archivo Parasolid (.x_t)

Una vez ejecutadas las operaciones de simetría, se procedió con la preparación de la geometría para su posterior proceso de fabricación. Puesto que los alojamientos de los ejes y el resto de las características funcionales requieren tolerancias dimensionales estrictas, así como operaciones de roscado posteriores, la solución técnica más eficiente consistió en el macizado de estas cavidades. Esta estrategia facilita el flujo del metal durante la colada y proporciona el excedente del material de mecanizado necesario para llevar a cabo el posterior arranque de viruta, garantizando así el cumplimiento de las tolerancias geométricas.

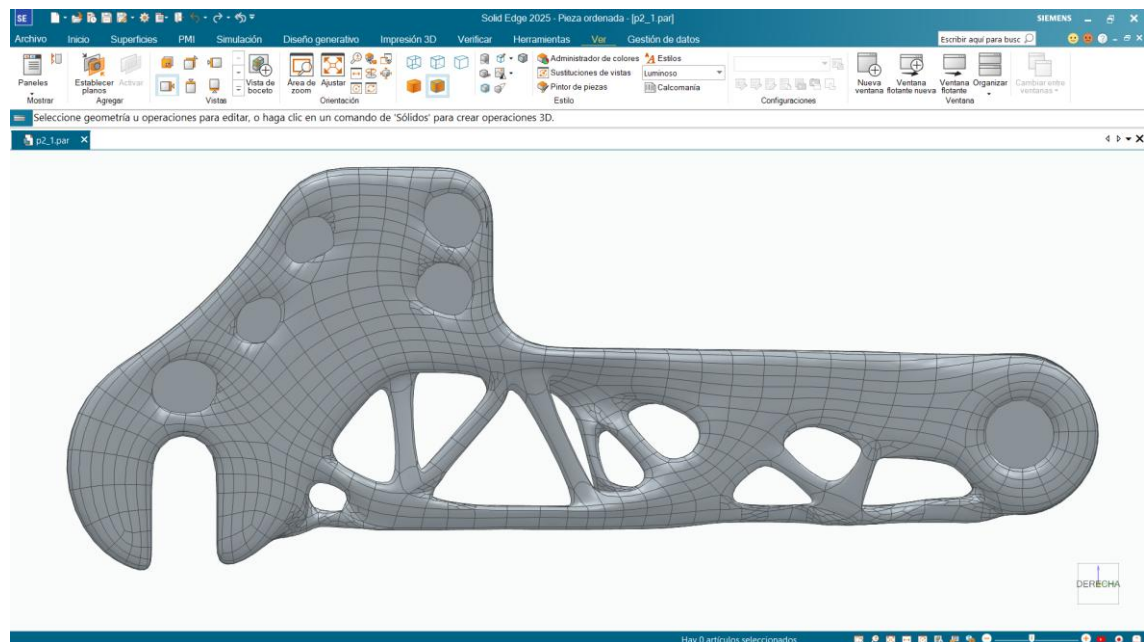


Figura 78. Modelo CAD final pre-fabricación

3.2.8 VERIFICACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LA PIEZA

En este apartado llevará a cabo una nueva simulación empleando los parámetros definidos anteriormente, con el propósito de verificar que el modelo es capaz de soportar las cargas impuestas antes de proceder a su fabricación.

Siguiendo la metodología descrita, se han aplicado las restricciones, las cargas y las propiedades del material seleccionado.

En la siguiente figura se muestra una captura de pantalla del software de simulación con los resultados obtenidos:

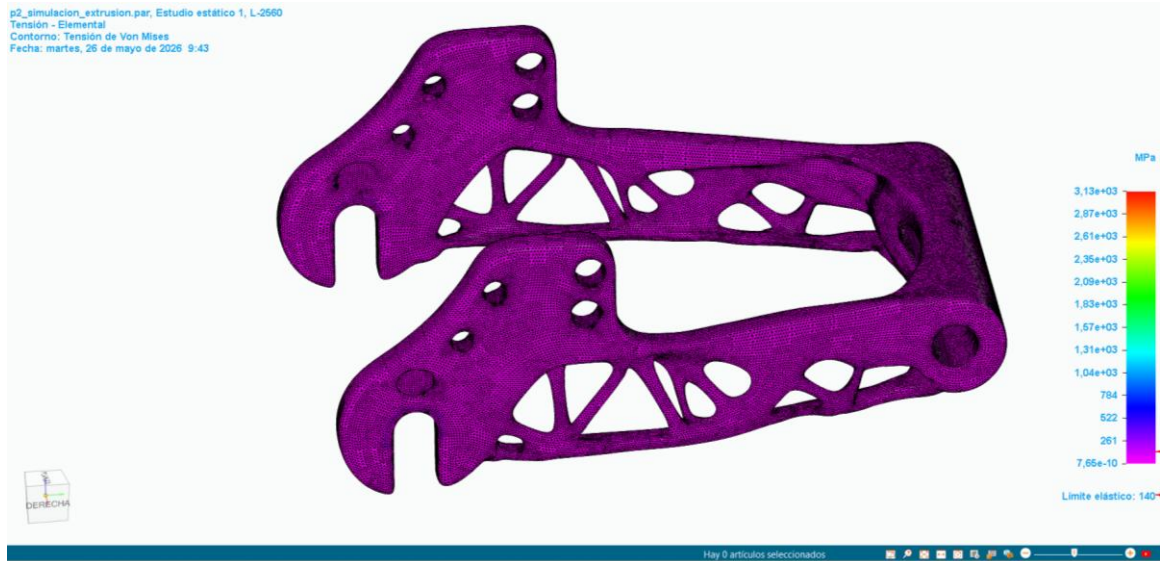


Figura 79. Comprobación de cargas en la geometría optimizada

A pesar de que los resultados muestran un pico de tensión máxima extremadamente elevado, este se concentra únicamente en un nodo localizado en una zona preservada y no modificada durante la optimización. Este comportamiento contradice la simulación inicial del modelo original. Dados el procedimiento realizado y el resultado obtenido, se concluye que este pico se debe a una **singularidad numérica** provocada por una falta de adaptación local de la malla a la geometría, lo que genera un error de discretización en el cálculo de tensiones.

Por tanto, se **determina que el modelo optimizado cumple con las restricciones y el estado de cargas de diseño**, ya que el mapa de tensiones se muestra predominantemente en tono violeta claro, indicando valores notablemente inferiores al límite elástico establecido de 140 MPa. Finalmente, de cara a mitigar este efecto en el modelo virtual, se requeriría un refinamiento local de la malla en las superficies de aplicación de las cargas; estructuralmente, para garantizar que el componente real no sufra concentraciones de tensión por irregularidades geométricas, bastaría con un acabado superficial de suavizado (operación de limado o pulido) en dichas zonas de contacto.

4. FABRICACIÓN

4.1 PREPARACIÓN Y LAMINADO DEL MODELO (IMPRESIÓN 3D)

La manufactura mediante el método de modelo perdido comienza con la impresión 3D del componente utilizando un polímero calcinable. A continuación, se detallan las fases de preparación del modelo y los ajustes en el *slicer*. Este *software* de laminación es el encargado de procesar la geometría original (en formato .3mf) y transformarla en el código de trayectorias (.gcode) que interpreta el equipo de fabricación aditiva.

Puesto que el proceso de manufactura seleccionado requiere un utillaje de soporte que se adapte con precisión a la morfología del componente, en las secciones posteriores se abordarán de manera diferenciada los parámetros de fabricación del modelo calcinable y de su base de correspondiente.

4.1.1 CONFIGURACIÓN DE PARÁMETROS EN BAMBU STUDIO PARA EL MODELO

El proceso en el *software* de laminación comienza con la exportación de la geometría optimizada desde Solid Edge en formato .stl. En esta fase, es crítico configurar correctamente las opciones de exportación del archivo CAD, estableciendo las unidades en milímetros y definiendo unas tolerancias de conversión de 0.01 mm para la desviación lineal y de 2.5° para la angular, garantizando así la fidelidad geométrica de la malla.

Posteriormente, al iniciar el proyecto en Bambu Studio, se procede con la selección del perfil de la máquina, el material calcinable indexado a su respectiva bobina y, finalmente, los parámetros de impresión. Estos últimos se determinan en función de la complejidad geométrica del componente y de los requerimientos funcionales del patrón para su posterior colada.

Para la fabricación del molde, se parte de una carcasa exterior preexistente conformada por placas troqueladas de acero de 2 mm de espesor. Debido a la necesidad de adaptarse a estas dimensiones volumétricas restrictivas, se desarrollaron **dos configuraciones** distintas para la disposición del modelo, el bebedero y los respiraderos. Asimismo, se realizó un análisis de viabilidad para asegurar la correcta evacuación del PLA calcinable durante la etapa de descerado, minimizando el riesgo de colapso del molde.

La diferencia fundamental entre ambas alternativas radica en la inclinación del modelo respecto a la plataforma de fabricación:

- **Configuración a 20°:** Presenta una mejor adaptabilidad geométrica a las dimensiones de la carcasa de acero. Esta orientación optimiza el espacio disponible, asegurando que el espesor del revestimiento refractario (escayola) se mantenga en todo el contorno por encima del umbral mínimo recomendado para fundiciones de tamaño pequeño o mediano (15 mm).
- **Configuración a 30°:** Favorece la dinámica de evacuación del material polimérico licuado por gravedad durante la calcinación. Esto reduce significativamente la probabilidad de oclusión de gases o la aparición de defectos superficiales en la pieza final provocados por residuos carbonosos.

A pesar de las diferencias en la orientación del mallado, ambos patrones se fabricaron bajo las mismas condiciones operativas y tecnológicas:

- **Equipo de manufactura:** Se empleó una impresora **Bambu Lab P1S** de tecnología de Modelado por Depresión Fundida (FDM). Este equipo destaca por su cámara de impresión completamente cerrada, una característica esencial para mitigar las tensiones residuales térmicas y evitar defectos de contracción (*warping*). La máquina cuenta con un sistema automático de gestión de material (AMS) de cuatro bobinas, permitiendo el uso de filamentos técnicos y la combinación de múltiples materiales en un mismo ciclo mediante una única boquilla de 0.4 mm. Desde el punto de vista operativo, ofrece un volumen útil de trabajo de $256 \times 256 \times 256 \text{ mm}^3$, una

temperatura máxima de extrusión de 300°, velocidades de cabezal de hasta 500 mm/s y aceleraciones que alcanzan los 20 m/s^2 . [42]

- **Parámetros del proceso:** Dentro del entorno de configuración de Bambu Studio, se ajustaron las variables tanto generales como avanzadas para el control del depósito de material. Los parámetros específicos relativos a la calidad superficial, resistencia estructural, velocidad cinemática y estructuras de soporte se detallan a continuación:

Altura de capa	0.20 mm
Ancho de línea	<ul style="list-style-type: none"> - Capa inicial: 0.50 mm - Pared interior: 0.45 mm - Pared exterior: 0.42 mm
Patrón	Giroide (Gyroid)
Densidad de relleno	<ul style="list-style-type: none"> - Exterior: 100% - Interior: 10%
Soportes	Automático tipo árbol (necesario)
Velocidad	<ul style="list-style-type: none"> - Capa inicial: 50 mm/s - Pared exterior: 60 mm/s - Pared interior: 300 mm/s - Relleno disperso: 270 mm/s
Solape entre relleno y paredes	10%

Tabla 5. Parámetros de impresión del modelo por FDM

En la configuración del proceso de fabricación aditiva, destaca el empleo de un patrón de infill de tipo *Gyroid* (giroide), el cual aporta una mayor rigidez estructural y resistencia mecánica isotrópica en comparación con otras morfologías de llenado interno. Para las estructuras de soporte, se determinó la implementación de soportes de tipo árbol; este método de generación algorítmica permite optimizar y reducir significativamente el consumo de material respecto a las geometrías de soporte convencionales. Asimismo, se

estableció un ángulo umbral de 30° respecto a la vertical, lo que asegura la sustentación de todas aquellas superficies con una inclinación superior a 60° respecto al plano horizontal, garantizando así un correcto acabado superficial y previniendo el colapso del material.

Por último, cabe destacar que se configuró un porcentaje de densidad de relleno excepcionalmente bajo. Esta decisión técnica responde a que el propósito final del modelo impreso es su posterior calcinación; de este modo, al minimizar el volumen de material polimérico existente, se facilita una evacuación limpia de los residuos en el molde y se mitiga el riesgo de expansión térmica durante el ciclo térmico de fundición.

4.1.2 CONFIGURACIÓN DE PARÁMETROS EN BAMBU STUDIO PARA LA BASE

De manera análoga a la metodología aplicada en los modelos analizados previamente, la proyección de dos moldes diferenciados implica que sus bases de sustentación correspondientes compartan las mismas dimensiones exteriores nominales; no obstante, la configuración geométrica y la disposición de sus puntos de apoyo variarán en función del componente a soportar.

Estas dos estructuras de fijación se fabricarán asimismo mediante tecnología de modelado por deposición fundida (FDM). En este caso, el proceso se ejecutará en una impresora **Bambu Lab X1 Carbon**. Este equipo comparte las especificaciones de velocidad y aceleración de la serie P1S, pero incorpora múltiples ventajas tecnológicas orientadas al entorno de producción, tales como un control activo de la temperatura de la cámara, una interfaz de usuario optimizada mediante panel táctil y un sistema de calibración automatizado asistido por tecnología LiDAR. [43]

Con respecto a los parámetros de laminado y las características de impresión, estos diferirán notablemente de los seleccionados para el modelo anterior, puesto que los requisitos operativos y la finalidad de este utillaje exigen criterios de rigidez y estabilidad dimensional específicos:

Altura de capa	0.28 mm
Ancho de línea	<ul style="list-style-type: none"> - Capa inicial: 0.50 mm - Pared interior: 0.45 mm - Pared exterior: 0.42 mm
Patrón	Rectilíneo (Rectilinear)
Densidad de relleno	<ul style="list-style-type: none"> - Exterior: 100% - Interior: 20%
Soportes	Automático tipo árbol (no necesario)
Velocidad	<ul style="list-style-type: none"> - Capa inicial: 50 mm/s - Pared exterior: 200 mm/s - Pared interior: 200 mm/s - Relleno disperso: 200 mm/s
Solape entre relleno y paredes	15%

Tabla 6. Parámetros de impresión de la Base por FDM

Esta configuración presenta un incremento sustancial las velocidades de impresión y modificaciones tanto el patrón como la densidad de relleno. Al tratarse de un utillaje de soporte cuya prioridad es la consistencia geométrica frente al acabado superficial, y al estar constituido por formas prismáticas sencillas, las velocidades de deposición pudieron elevarse hasta los 200 mm/s.

Asimismo, el patrón de relleno seleccionado (rectilíneo) genera una retícula ortogonal interna mediante filamentos orientados alternativamente a 45° y -45°. Esta morfología simplifica la trayectoria del cabezal de extrusión y reduce las aceleraciones locales, a diferencia de las trayectorias complejas exigidas por los patrones giroide o cúbico. Por último, debido a la orientación horizontal de la pieza respecto a la plataforma de fabricación y a la ausencia de ángulos de inclinación estructural (*overhangs*) superiores a 50° respecto a

la vertical, se determinó que no es necesaria la implementación de estructuras de soporte, optimizando así el tiempo de ciclo y el consumo de material.

Adicionalmente, puesto que este utillaje debe ser capaz de soportar esfuerzos de compresión vertical durante su operación, se incrementó la densidad de relleno hasta un 20%. Aunque este porcentaje pueda parecer moderado en aplicaciones convencionales, en estructuras prismáticas con patrones rectilíneos genera un incremento sustancial de la rigidez y la resistencia a la compresión, optimizando el compromiso entre la resistencia mecánica del utillaje y el consumo de filamento.

4.1.3 RESULTADOS DEL LAMINADO Y ESTIMACIÓN DE RECURSOS

Al accionar el comando de laminado (Slice Plate), el propio software procesa la geometría y genera el código numérico en formato .gcode, el cual contiene las instrucciones de trayectoria y extrusión que ejecutará la impresora. Más allá de la obtención de este archivo de fabricación, resulta indispensable analizar el compendio de estadísticas de impresión proporcionado por el entorno del slicer.

En este escenario, dichos datos son fundamentales para acometer el posterior análisis de costes de manufactura, así como para determinar el volumen real del componente. Por este motivo, se deben registrar para su posterior cómputo los parámetros relativos a la longitud de filamento empleado en el modelo, el filamento total consumido (incluyendo purgas y estructuras auxiliares si las hubiera), la masa neta de la pieza y el tiempo estimado de ciclo de trabajo.

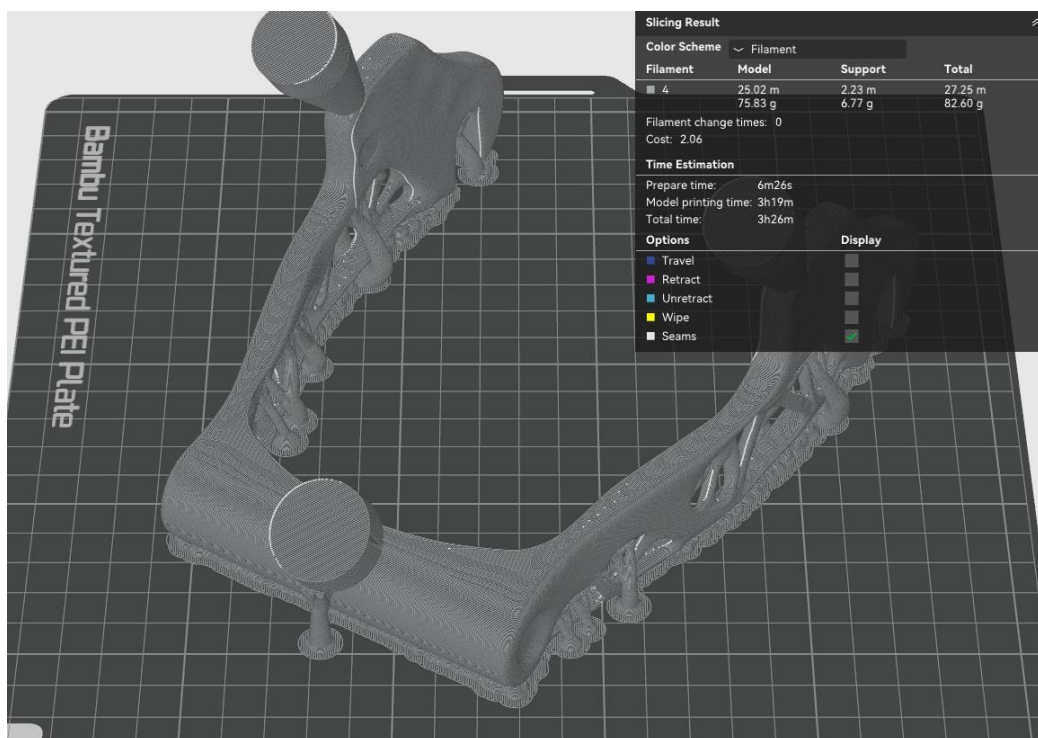


Figura 80. Vista previa del laminado del Modelo Optimizado

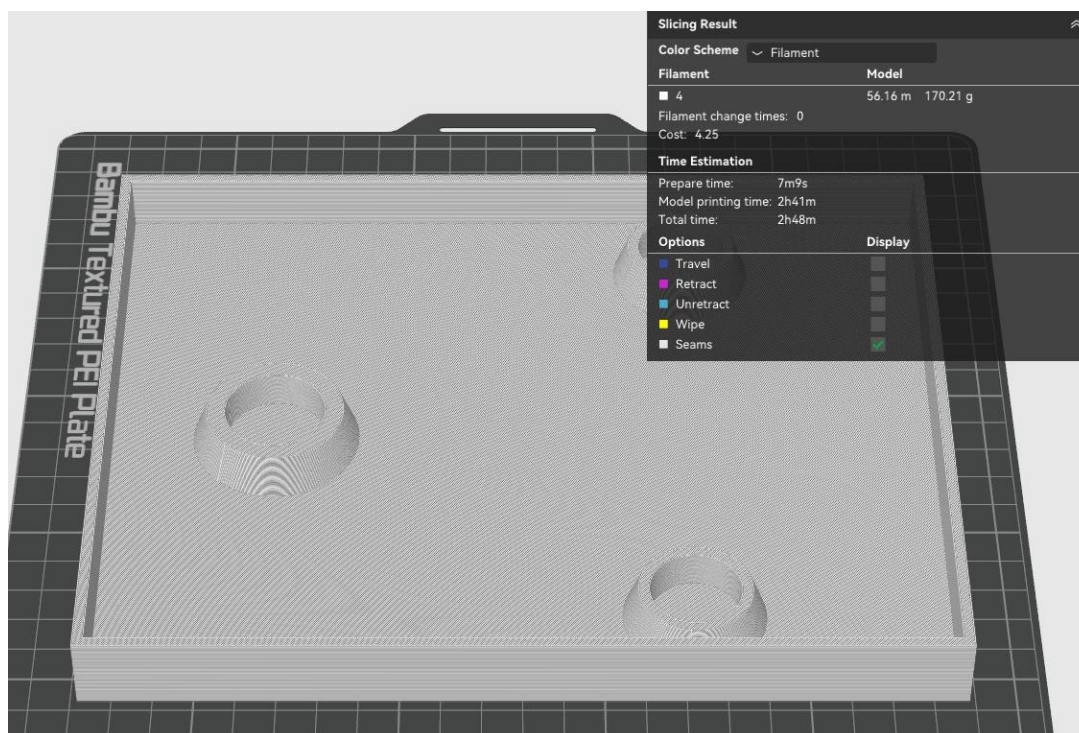


Figura 81. Vista previa del laminado de la Base

	Modelo Optimizado (P1S)	Base (X1 Carbon)
Longitud del filamento total	27.25 m	56.16 m
Masa neta de la pieza	75.83 g	170.21 g
Tiempo de trabajo	3 h 26 min	2 h 48 min

Tabla 7. Parámetros cuantitativos de fabricación aditiva

Puesto que las discrepancias geométricas entre las distintas variantes introducidas apenas suponen una desviación de pocos minutos en el tiempo de manufactura y una diferencia inferior a un metro en el consumo de filamento, se determinó la validez de unificar estas métricas. Por consiguiente, se emplearán las estadísticas recopiladas en la Tabla 7 como valores representativos para los posteriores análisis, asumiendo un error marginal despreciable.

4.2 IMPRESIÓN 3D DEL MODELO MEDIANTE TECNOLOGÍA FDM

Una vez transferidos los archivos de fabricación a los respectivos equipos, aplicar una laca especializada para impresión 3D cuya función es facilitar la adhesión de la primera capa y verificada la correcta ejecución de las capas iniciales, se completó el ciclo de impresión tras un tiempo aproximado de tres horas. Posteriormente, se procedió a la apertura de las cámaras de construcción para la retirada de los componentes, dando inicio a las sucesivas etapas:

4.2.1 RETIRADA DE SOPORTES

Tras la conclusión del ciclo de fabricación, se procedió a la extracción cuidadosa del modelo impreso. Para ello, se retiró la plataforma de fabricación flexible y se sometió a una ligera flexión, despegando la capa inicial sin comprometer la integridad geométrica de la pieza.

A continuación, se utilizaron alicates de punta fina para la retirada de las estructuras de soporte de tipo árbol. Finalmente, se llevó a cabo un desbaste y decapado mecánico mediante el empleo de limas de grano fino en aquellas regiones de interfaz que habían estado en contacto directo con los soportes; de este modo, se eliminaron las marcas residuales y los filamentos con adherencia deficiente, optimizando la rugosidad y el acabado superficial del componente.

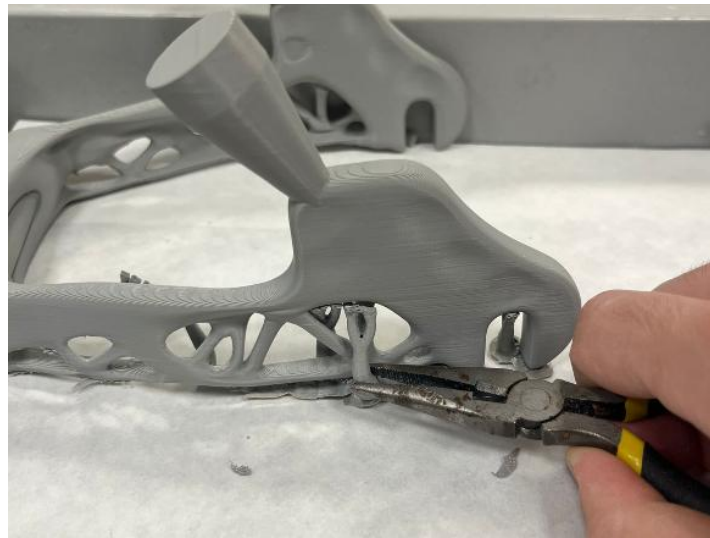


Figura 82. Eliminación manual de soportes

4.2.2 ANÁLISIS DE CALIDAD SUPERFICIAL Y PRECISIÓN DIMENSIONAL DEL PATRÓN OBTENIDO

Una vez concluidas las operaciones de acabado, se procedió a la verificación dimensional y de ajuste del ensamblaje, así como a la evaluación de la integridad y calidad superficial del modelo optimizado. Este último control resulta crítico, puesto que cualquier imperfección geométrica o rugosidad anómala en el patrón calcinable se replicaría directamente en la superficie del componente final tras el proceso de fundición.

Debido a que en la fase de diseño se incorporó una tolerancia geométrica de 0,4 mm en los diámetros y zonas de acoplamiento, el ajuste entre las piezas impresas resultó conforme y adecuado.

En líneas generales, la **calidad superficial** obtenida exhibe una baja rugosidad y una alta fidelidad geométrica. No obstante, en regiones específicas como la cara superior de los brazos del basculante, cuya orientación presentaba una ligera inclinación respecto al plano de manufactura durante la impresión, se manifestó el denominado **efecto escalera** (staircase effect). Este fenómeno, provoca que las geometrías curvas o inclinadas adopten un perfil escalonado debido a la naturaleza de la deposición del material capa a capa. [44]

Si bien este efecto suele mitigarse mediante la reorientación óptima del modelo sobre la plataforma de construcción, la complejidad geométrica de este componente —caracterizado por la no paralelidad entre sus planos superior e inferior— limitaba dicha alternativa. Asimismo, la orientación seleccionada en el slicer respondió al criterio de minimización de estructuras de soporte. Por consiguiente, priorizar la atenuación del efecto escalera mediante un cambio de inclinación habría penalizado directamente la eficiencia del proceso, incrementando el volumen de soporte requerido, el tiempo de ciclo de la máquina y, de manera vinculante, los costes globales de fabricación.

4.3 ELABORACIÓN DEL MOLDE DE REVESTIMIENTO CERÁMICO

Todo proceso de fundición requiere la manufactura de un molde que reproduzca con fidelidad la impronta geométrica del componente. Las propiedades del material constituyente del molde determinan parámetros críticos como la rugosidad superficial, el nivel de detalle reproducible e incluso la dinámica del llenado del metal líquido. En este escenario, el utillaje debe exhibir una elevada refractariedad y estabilidad estructural a altas temperaturas durante ciclos térmicos prolongados, condiciones imperativas para garantizar la completa evacuación del modelo calcinable en el interior del horno de resistencias.

Por este motivo, se determinó la implementación de un revestimiento cerámico, seleccionado por sus excelentes propiedades térmicas, su resistencia al choque térmico y su óptima capacidad de copiado de detalles morfológicos complejos. A continuación, se detallan tanto las operaciones de fabricación de las paredes del molde como el procedimiento de preparación y aplicación de la suspensión cerámica:

4.3.1 DISEÑO PREVIO Y FABRICACIÓN DEL MOLDE Y SU CAJA EXTERIOR

Siguiendo el flujo de trabajo estandarizado para este tipo de procesos de fundición de precisión, y con el propósito de mitigar riesgos operativos durante el vertido, se ejecutaron las siguientes etapas preparatorias:

1. **Verificación del ajuste acoplamiento-base:** Se comprobó que el utillaje de la base (impreso previamente) encajara de manera óptima en el extremo inferior de la caja contenedora rectangular de acero. Se garantizó un ajuste con juego ligero que, al mismo tiempo que impedía la fuga del revestimiento refractario en estado fluido, facilitaba el desmoldeo y la separación posterior de ambos elementos sin requerir esfuerzos mecánicos severos.
2. **Sellado periférico de la carcasa troquelada:** Se procedió al revestimiento exterior de las paredes de la carcasa mediante cinta de carroceros. La función primordial de este sellado es contener el revestimiento licuado en el interior del volumen útil del molde durante el fraguado. Como se justificó previamente, el patrón de perforaciones circulares de la estructura de acero —esencial para la evacuación de gases en la colada, la optimización térmica del burnout y la disgregación por choque térmico— exige este confinamiento provisional para evitar pérdidas de material.

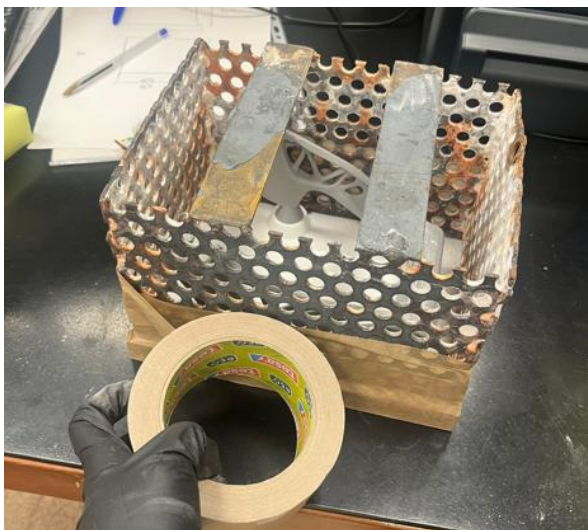


Figura 83. Sellado periférico de la caja troquelada para la contención del revestimiento refractario

3. **Refuerzo estructural del utillaje de contención:** Con el objetivo de optimizar la rigidez del conjunto y perfeccionar la metodología de proyectos precedentes —donde se empleaban láminas de cartulina susceptibles de deformarse—, se implementó un sistema de refuerzo rígido. Para ello, se cortaron a medida ocho placas de aluminio de 1 mm de espesor mediante una cizalla hidráulica de laboratorio, conformándolas con las dimensiones nominales específicas para adaptarse a la periferia de las caras planas de la carcasa. Estas placas se fijaron sobre el encintado, incrementando la resistencia estructural de las paredes y contrarrestando la presión hidrostática del revestimiento para evitar fenómenos de abombamiento.

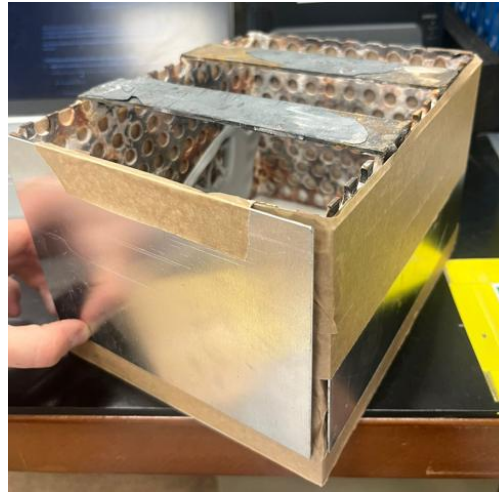


Figura 84. Encofrado temporal del molde durante la fase líquida el fraguado a temperatura ambiente

4.3.2 CÁLCULO DE PROPORCIONES DE LA MEZCLA DE SULFATO DE CALCIO

Debido a la disponibilidad de stock en los laboratorios, se optó por emplear dos composiciones de **revestimiento** diferentes, asignando una a cada molde. Ambos materiales, desarrollados por el fabricante *Ransom & Randolph*, comparten una matriz común de sulfato de calcio y sílice refractaria: el *Ultra-Vest* y el *Argentum*. Aunque estas formulaciones están orientadas originalmente a modelos de cera, su uso es perfectamente viable y adaptable para modelos impresos en PLA, siempre que se controlen los parámetros de evacuación térmica.

Para el cálculo de las proporciones y la preparación de la mezcla, se tomaron como referencia las fichas técnicas suministradas por el fabricante. Dado que ambos compuestos presentan una naturaleza química análoga y el polvo posee una densidad idéntica, la relación agua/polvo es equivalente. Esto permite unificar los cálculos dosimétricos y replicar el proceso de mezclado de forma idéntica para ambas composiciones, optimizando la fase de preparación en el laboratorio. [45], [46]

Cálculo del volumen del modelo

A partir de los datos analíticos de la manufactura aditiva, específicamente la masa del material extruido y la densidad nominal del ácido poliláctico ($\rho = 1.24 \text{ g/cm}^3$), se determinó en primera instancia el volumen neto del material:

$$V_{PLA} = \frac{m}{\rho} = \frac{75.83 \text{ g}}{1.24 \text{ g/cm}^3} = 61.15 \text{ cm}^3$$

No obstante, este valor no representa el volumen geométrico total (envolvente) del componente, debido a que la pieza se fabricó con una densidad de patrón del 10%. Considerando la presencia de las superficies al 100% de su densidad en el contorno y la morfología del basculante, se estimó una densidad globalizada equivalente del 25% del volumen teórico macizo. Por consiguiente, el volumen exterior aparente se calcula como:

$$V_{modelo} = 61.15 \text{ cm}^3 * \frac{100}{25} = 244.6 \text{ cm}^3$$

Cálculo del volumen de la caja

Al tratarse de un prisma rectangular regular, se determinaron las dimensiones de sus caras interiores mediante instrumentación de metrología directa (cinta métrica), obteniendo de esta manera el volumen interno disponible del molde vacío.

$$V_{caja} = a * b * h = 13.8 * 16.3 * 20.9 = 4701.25 \text{ cm}^3$$

Cálculo del volumen neto de revestimiento

Dado que el modelo se encuentra dentro de la caja de acero, el volumen real de la mezcla fluida se obtiene por diferencia geométrica:

$$V_{recubrimiento} = 4701.25 - 244.6 = 4456.65 \text{ cm}^3$$

Cálculo de proporciones

De acuerdo con las especificaciones de uso y seleccionando los parámetros para la fabricación de piezas de fundición grandes (39/100 WP), se han de añadir en ambos casos 1.25 g de polvo refractario por cada unidad de volumen y una cantidad de 0.488 ml de agua por unidad de volumen. Empleando como unidades de volumen el centímetro cúbico (cm^3).

$$kg_{polvo} = 4456.65 * \frac{1.25}{1000} = 5.57 \text{ kg}$$

$$ml_{agua} = 4456.65 * 0.488 = 2175 \text{ ml}$$

4.3.3 PROCEDIMIENTO DE PREPARACIÓN Y HOMOGENEIZACIÓN DE LA MEZCLA

Para la elaboración de la suspensión cerámica y la obtención de una masa óptima, se ejecutó un protocolo secuencial prestando al orden de adición de los componentes.

- 1- **Dosificación e introducción de la fase sólida:** Se determinó la masa requerida de polvo cerámico mediante balanza y se introdujo en primera instancia en el recipiente de mezcla seco.
- 2- **Adición de la fase líquida:** Se midió el volumen de agua calculado anteriormente con un recipiente calibrado y se añadió de forma continua al mismo recipiente
- 3- **Homogeneización mecánica:** El batido se llevó a cabo mediante la acción de una varilla mezcladora de palas helicoidales acoplada a un taladro eléctrico de velocidad regulable. La agitación se mantuvo durante un intervalo controlado de entre 2 y 3 minutos hasta alcanzar la textura y consistencia deseada. El objetivo es obtener una suspensión con una textura completamente homogénea, exenta de grumos suspendidos y con una viscosidad lo suficientemente baja para garantizar la posterior mojabilidad sobre la superficie geométrica del basculante.

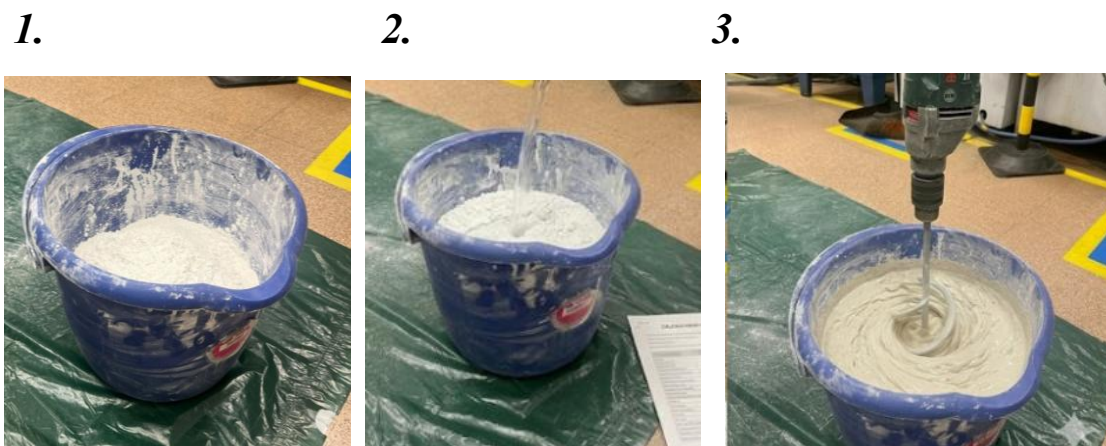


Figura 85. Secuencia operativa para la preparación de revestimiento refractario

Durante la ejecución experimental se constató una divergencia significativa en el comportamiento reológico de ambos compuestos. Por un lado, el Argentum adquirió una consistencia notablemente más fluida, lo que optimizó la mojabilidad superficial del patrón y facilitó un llenado continuo y homogéneo de la carcasa de acero. Por otro lado, el revestimiento Ultra-Vest exhibió una viscosidad aparente muy superior bajo las mismas condiciones de mezcla, manifestando una menor capacidad de fluencia a pesar de poseer una base química similar (sulfato de calcio).

Esta diferencia de comportamiento es crítica en la caracterización de suspensiones cerámicas. Ambos materiales se encuadran dentro de la categoría de fluidos no newtonianos de carácter pseudoplástico; sin embargo, el Ultra-Vest presenta una mayor resistencia estructural interna en reposo. Esta alta viscosidad complica notablemente la operación de colado, así como la correcta adaptación del revestimiento en las zonas estrechas o en los pequeños detalles geométricos del molde. Por lo tanto, la menor viscosidad cinemática del Argentum se traduce en una ventaja directa para la colada, reduciendo el riesgo de oclusión de burbujas en las zonas de geometría compleja. [47]

En caso de que quisiéramos un resultado óptimo deberíamos modificar este procedimiento, puesto que a pesar de haber batido y mezclado la masa hasta que visualmente parecía una

composición homogénea, posteriormente se observó alguna zona con grumos y pequeñas burbujas atrapadas. Esto es un factor crítico porque la presencia de estos defectos puede generar imperfecciones superficiales notables y desajustes dimensionales en la pieza final. Para solucionarlo, lo idóneo sería aplicar este mismo proceso utilizando una **cámara de vacío** para extraer el aire ocluido y una **mesa vibratoria** que transmita vibraciones controladas al recipiente. Con esta mejora se eliminarían por completo las burbujas y los grumos, logrando un resultado mucho más profesional y libre de defectos, tal y como se realiza en la fabricación de piezas de joyería que exigen una altísima calidad superficial.

4.3.4 VERTIDO DEL REVESTIMIENTO Y RELLENO DEL MOLDE

El vertido del revestimiento debe hacerse inmediatamente después de haber finalizado el mezclado del polvo cerámico y el agua dado que en cuestión de uno o dos minutos empieza a solidificarse. Durante este proceso es importante mantener un flujo continuo de la mezcla y no verter directamente hacia el interior de la caja, sino que se debe echar sobre una de las placas horizontales situadas en la parte superior y dejar que el revestimiento fluya hacia los laterales. Esto evita la formación de burbujas y en caso de detectar algún grumo de tamaño considerable se podría retirar ya que se quedaría en esta superficie.



Figura 86. Llenado de las cajas de contención usando el revestimiento cerámico

Durante los minutos inmediatamente posteriores al vertido del material en el utillaje, se desencadena el fenómeno de hidratación del aglutinante. El producto comercial empleado está constituido por una matriz refractaria de sílice en un alto porcentaje (entre el 60% y el 75%) y por sulfato de calcio (yeso) como elemento aglutinante.

En su proceso de manufactura industrial, el sulfato de calcio se obtiene a partir de piedra de yeso natural, la cual se somete a una calcinación térmica controlada para provocar su deshidratación parcial y convertirla en polvo comercial (hemihidrato). Al añadir agua a la mezcla en el laboratorio, se produce el fenómeno inverso: la **rehidratación del compuesto**, comúnmente denominada **fraguado**.

En esta etapa, el aglutinante absorbe el agua libre iniciando de manera inmediata la nucleación y el posterior crecimiento de cristales de sulfato de calcio, los cuales van entrelazándose progresivamente hasta consolidar y endurecer la matriz cerámica. Durante este intervalo crítico de transición de fase, es fundamental mantener los moldes en absoluto reposo y evitar cualquier tipo de agitación o perturbación mecánica. Debido a que las agujas cristalinas en crecimiento se encuentran en un estado estructural de alta vulnerabilidad, cualquier microfisura prematura degradaría irreversiblemente las propiedades mecánicas y la estabilidad dimensional del molde refractario.

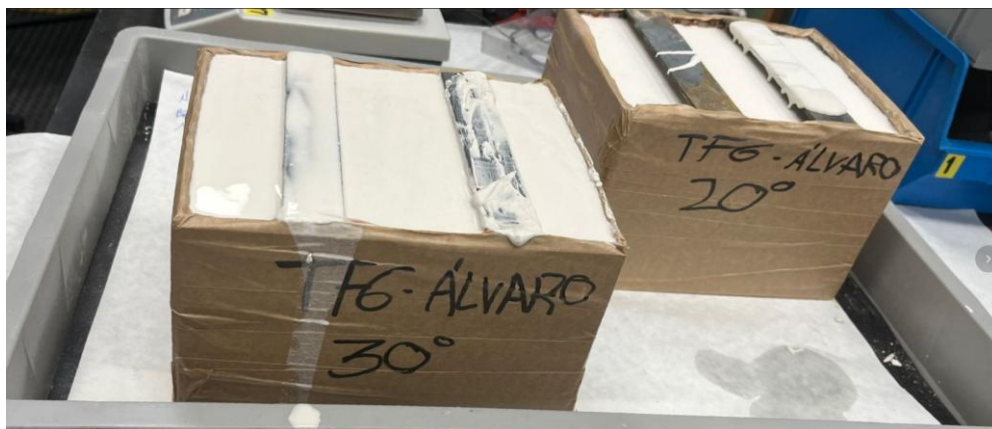


Figura 87. Moldes refractarios en su etapa de fraguado

4.4 CALCINACIÓN DEL PLÁSTICO Y PRECALENTAMIENTO

Los siguientes pasos dentro del flujo de trabajo requieren el uso de un horno de resistencias para la preparación del molde refractario. En esta etapa, debido a las elevadas temperaturas, se logra la calcinación y pirólisis del material plástico, dejando la cavidad interior vacía y completamente lista para la colada del material metálico.

4.4.1 CICLOS TÉRMICOS EN HORNO

El proceso de calentamiento o "curado" del molde se realiza en posición inversa a la del vertido para habilitar la salida por gravedad del material del modelo perdido. Para ello, se emplea un horno de resistencias capaz de alcanzar los 1500°C y que destaca por su aislamiento y su revestimiento interior.

Tras dejar secar el molde a temperatura ambiente durante cuatro días (un período superior al mínimo recomendado de 24 a 48 h debido a la gestión de tiempos del laboratorio), se inició la secuencia de calentamiento dividida en las siguientes fases, adaptadas a partir de la hoja técnica del fabricante y supervisadas por el tutor del proyecto: [45], [46], [48]

- **Fase 1: Rampa y meseta a 150 °C (2 h):** El ciclo comienza a temperatura ambiente, incrementándola de forma moderada hasta los 150 °C para evitar choques térmicos que agrieten el material refractario. Esta temperatura se mantiene durante dos horas para evaporar el agua libre que no fue absorbida durante el fraguado. En esta etapa, el patrón de PLA comienza a ablandarse.
- **Fase 2: Rampa y meseta a 370 °C (2 h):** Al superar el punto de fusión del PLA (160-180 °C), el plástico fundido comienza a evacuar el molde. Simultáneamente, el aglutinante cerámico experimenta su deshidratación química. La contracción que sufre el yeso en este punto se contrarresta de forma natural con la expansión térmica de la sílice, manteniendo la integridad del molde y evitando fracturas.

- **Fase 3: Rampa y meseta a 480 °C (2 h):** A esta temperatura se inicia la gasificación del material plástico remanente, que pasa de estado sólido o líquido a fase gaseosa.
- **Fase 4: Rampa y meseta a 730 °C (4 h):** La matriz cerámica alcanza su máxima resistencia estructural en caliente y una porosidad idónea para la evacuación de gases. El carbono y el hollín residuales del plástico se oxidan por completo convirtiéndose en CO₂, lo que deja la cavidad interna totalmente limpia.
- **Fase 5: Rampa y meseta a 800 °C (2 h):** Esta última etapa no está contemplada en la hoja técnica del fabricante, sino que se integra basándose en la experiencia de proyectos previos de la Universidad, donde se ha comprobado que este incremento final optimiza los resultados de la calcinación.

Para finalizar y evitar el choque térmico entre el metal fundido y el molde de yeso, se debe controlar cómo baja la temperatura del molde dentro del propio horno antes de vaciar el metal, midiendo todo el proceso con una pistola térmica infrarroja. Aquí hay una gran diferencia según el material que vayamos a usar, ya que para la aleación de aluminio el metal se calienta en el crisol hasta unos 740°C y por tanto el molde se tiene que mantener muy caliente y casi a la misma temperatura que el horno para que el aluminio no se enfríe de golpe y pueda rellenar bien las zonas más delgadas del basculante, mientras que con el Zamac el metal solo se calienta hasta los 410°C aproximadamente y por eso se deja enfriar el molde bastante más tiempo dentro del horno antes de echar el metal para adaptarlo a la temperatura más baja de esta aleación.

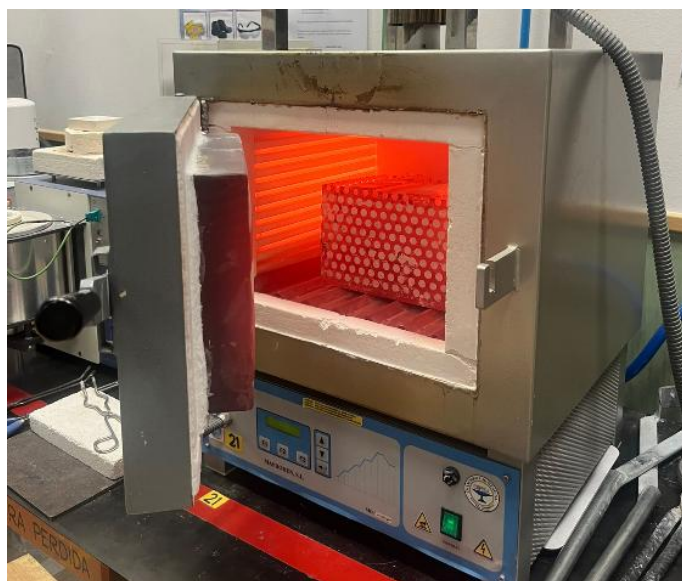


Figura 88. Introducción del molde refractario en el horno de mufla para la evacuación del patrón calcinable.

4.4.2 EVALUACIÓN DE LA EVACUACIÓN DEL PLA

El proceso de exposición del molde a altas temperaturas debería haber dejado la cavidad interna completamente vacía; por ello, de forma previa a la colada, se llevó a cabo una inspección visual de control. Debido al intenso calor radiante desprendido y a las medidas de seguridad requeridas, no fue posible realizar una exploración interna de gran profundidad. A pesar de esta limitación, se **apreciaron residuos de cenizas notablemente visibles** tanto en los canales de alimentación y salidas de gases, como en el interior del molde.



Figura 89. Presencia de cenizas en los canales de alimentación

Esta evidencia permite evaluar críticamente la raíz del fallo. Dado que la fundición técnica al modelo perdido se ejecuta habitualmente mediante patrones de cera o resinas calcinables específicas, la replicación de este proceso empleando un filamento de PLA genérico ha demostrado que, si bien una meseta térmica de 800 °C es suficiente para calcinar el polímero, el programa de temperaturas implementado está diseñado principalmente para eliminar trazas mínimas de material residual que no hayan sido evacuadas previamente. En este escenario, la inspección visual sugiere que el patrón impreso no dispuso de la fluidez ni el tiempo necesario para drenar hacia el exterior antes de sufrir la calcinación completa, quedando retenido en forma de cenizas estables que bloquearon los conductos e impidieron el correcto flujo de la aleación fundida.

4.5 COLADA DE LA ALEACIÓN DE ALUMINIO, DESMOLDEO Y ACABADO

Una vez completado el tratamiento térmico del molde cerámico, se inicia la fase puramente metalúrgica y de manufactura física del componente. Este bloque engloba de manera

secuencial los procesos críticos de fusión del metal base, el vertido controlado de la aleación líquida, la solidificación del material y las posibles tareas de postprocesado.

Cabe destacar que, por restricciones de tiempo de cara a la fecha de entrega del proyecto, el estudio experimental de esta fase se acotó finalmente a los resultados asociados al molde de 20° de inclinación, empleando exclusivamente la aleación de aluminio. El flujo de trabajo metalúrgico que se describe en los siguientes subapartados:

4.5.3 FUSIÓN Y VERTIDO DE LA ALEACIÓN DE ALUMINIO

Una vez que el molde terminó su proceso de horneado y calcinación, se sacó del horno con mucho cuidado. Sin apagar el equipo, se introdujo el metal para llevarlo a su punto de fusión. Dado que la temperatura de fusión de este aluminio ronda los 750 °C, no se modificó la temperatura del horno de resistencias, ya que inicialmente estaba fijada a unos 800 °C. Se decidió tomar aproximadamente 740 g de la aleación de aluminio para asegurar que se cubriría por completo tanto el volumen de la pieza como el de los canales de entrada.



Figura 90. Disposición de la materia prima en el interior del crisol

Lo ideal en este tipo de fundiciones, donde la temperatura de fusión del material está muy cerca de la temperatura a la que se ha sometido el molde, es disponer de dos hornos. De esta

manera, se pueden calentar ambos al mismo tiempo para realizar la colada de forma rápida. Sin embargo, dado que en el laboratorio solo se dispone de un horno adaptado a este tipo de proyectos, el aluminio tardó aproximadamente 10 minutos en fundirse, lo que provocó que el molde se enfriara al quedar expuesto a una temperatura ambiente de 23 °C.

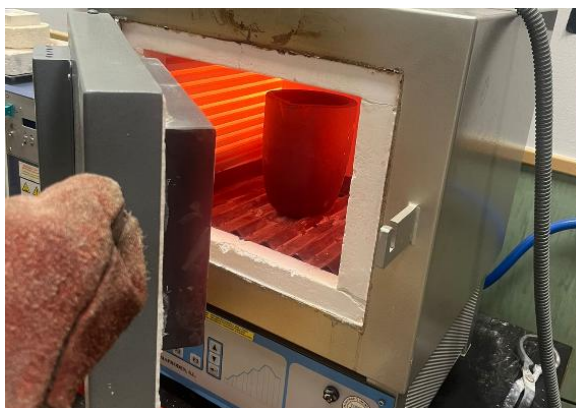


Figura 91. Fusión del metal base en horno de resistencias

Una vez que se comprobó que el aluminio estaba totalmente líquido, se tomaron las medidas de seguridad necesarias y se vertió el metal hacia el interior del molde. En ese momento, el canal de entrada se llenó rápidamente, por lo que hubo que echar material también por ambos respiraderos para intentar rellenar el máximo volumen posible. En una situación ideal, al verter el metal líquido por la entrada principal, este habría ocupado toda la geometría de la pieza en unos segundos y el material sobrante habría salido hacia arriba por los respiraderos.

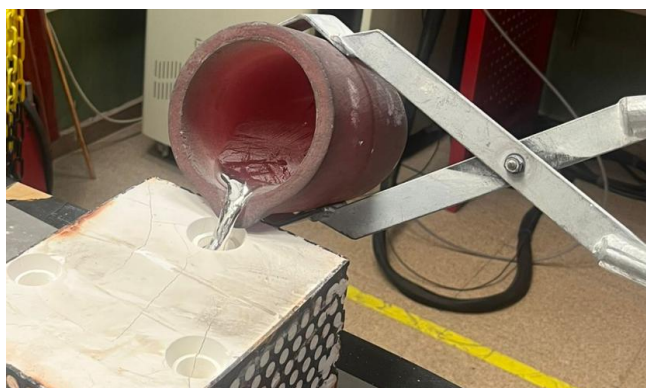


Figura 92. Colada por gravedad de la aleación de aluminio

4.5.4 ENFRIAMIENTO CONTROLADO Y ROTURA DEL MOLDE CERÁMICO (DESMOLDEO).

Tras introducir la aleación en el molde, se debe esperar un tiempo razonable (alrededor de 10 minutos) para dejar que el aluminio líquido se solidifique por completo y disminuya su temperatura. El siguiente paso para la obtención de la pieza es la retirada del molde; en este tipo de fundición al modelo perdido, tanto el molde como el modelo se pierden una vez realizado el proceso.

En este caso, debido a las propiedades de los componentes del revestimiento cerámico y a las altas temperaturas que todavía retiene, el material se reblandece al entrar en contacto directo con el agua. Además, a causa del choque térmico, los trozos de cerámica se desprenden con facilidad al tocar una superficie mucho más fría. Como consecuencia de este proceso, se obtiene la pieza metálica limpia y lista para poder realizar un estudio superficial, así como para su posterior mecanizado en las zonas de interés (como, por ejemplo, la eliminación de los canales de alimentación y respiraderos).



Figura 93. Desmoldeo del revestimiento cerámico mediante agua

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL COMPONENTE FABRICADO

En esta sección se detallará la caracterización del modelo final fabricado. Para ello, se realizará en primer lugar un análisis visual con el objetivo de detectar tanto los defectos principales apreciables a simple vista como posibles grietas o fallos locales en zonas geométricas críticas. Posteriormente, se evaluarán aspectos clave como el acabado superficial obtenido y, finalmente, se cuantificará la reducción de peso conseguida respecto a la pieza original de serie, siendo este último el indicador fundamental que justifica todo el proceso de optimización topológica.

5.1.1 RESULTADO DE LA FUNDICIÓN

A pesar de que los resultados tras el proceso de fabricación no hayan cumplido las expectativas debido a que, principalmente, el llenado del molde ha sido insuficiente, el objetivo principal del proyecto se centraba en estudiar la viabilidad de aplicar este tipo de técnicas de fabricación a geometrías más complejas (como la que se ha optimizado en este mismo trabajo).

Por tanto, el resultado obtenido es clave para detectar posibles errores y mejoras a implementar, pero también nos permite apreciar algunos detalles que sí se han obtenido tal y como se esperaban.

Las siguientes figuras muestran el resultado final, donde es importante fijarse no solo en el defecto principal del llenado incompleto, sino también en su causa y en el análisis para posteriores intentos:



Figura 94. Modelo en Aluminio obtenido tras la fundición



Figura 95. Resultado en detalle de la fundición con inclusiones de ceniza

5.1.2 INSPECCIÓN DIMENSIONAL Y DESVIACIONES FRENTE AL MODELO CAD FINAL.

Estas aleaciones sufren contracciones volumétricas al solidificar, lo que además de reducir las dimensiones finales de la pieza respecto al molde original, es la causa directa de defectos como los rechupes. En procesos de fundición, los porcentajes de contracción lineal suelen rondar el 1%, lo que significa que una cota inicial de 100 mm se reducirá hasta los 99 mm tras el enfriamiento. De forma específica, la aleación de aluminio L-2560 presenta una contracción de aproximadamente un 1.15%, mientras que el Zamac destaca por ser uno de los metales con menor coeficiente de contracción (0.65%), lo que le permite replicar los detalles del molde con una precisión geométrica superior.

A pesar de que, debido al resultado obtenido, no se han podido tomar dimensiones en demasiados puntos de la pieza, se ha analizado el grosor de los apoyos laterales. Estos se habían diseñado inicialmente con un espesor de 10,5 mm. Empleando como instrumento de medida un calibre con una sensibilidad de 0,1 mm, apenas se apreciaron diferencias respecto al diseño, por lo que se estima que efectivamente, las dimensiones del modelo final sufrieron una contracción en un orden cercano al 1%.

5.1.3 CARACTERIZACIÓN DEL ACABADO SUPERFICIAL Y DEFECTOS DE FUNDICIÓN (POROSIDADES/VALLES).

En el modelo metálico, los defectos son notables, siendo la mayoría de ellos causados por los residuos calcinados que quedaron atrapados en el interior durante el horneado. Como se observó previamente, el modelo en PLA apenas había evacuado el molde ni se había gasificado; por el contrario, se calcinó y se mantuvo en forma sólida durante todo el proceso. Esto conllevó a la generación de los dos principales problemas en el proceso de fundición:

- **Llenado incompleto:** Los residuos sólidos actúan como una barrera física. Hacen que el material base, a pesar de estar completamente líquido, no consiga fluir con facilidad, costándole mucho más alcanzar los lugares estrechos y menos aún si el conducto de paso está taponado.
- **Inclusiones de ceniza:** El problema de las inclusiones suele aparecer frecuentemente en las fundiciones con moldes de arena debido a que esta se desprende y se incrusta en la superficie. En este caso ocurre algo similar, solo que los residuos ya se encontraban en el interior del molde y no tenían forma de salir, por lo que se terminaron adhiriendo a la pieza metálica, dejando zonas superficiales prácticamente sin metal y ocasionando grandes desperfectos.

Frente a estos problemas, también hay zonas en las que es interesante recalcar el buen resultado de este método de fabricación:

En primer lugar, dado que la fabricación aditiva se compone de una superposición de capas, la superficie exterior del modelo de plástico reflejaba la textura típica de la impresión (tanto el efecto escalera como las líneas de las capas en los laterales). Si se analiza la pieza metálica final, se comprueba que estos detalles también son perfectamente visibles en ella. Esto sugiere que, si se soluciona el problema del llenado, la técnica tiene **la precisión suficiente para copiar con fidelidad superficies** con cierto nivel de detalle.

Por otro lado, tanto el **bebedero** como los **respiraderos** parecen estar bien ubicados, teniendo además un tamaño bastante adecuado y proporcionado con las dimensiones de la pieza. Al no incorporar canales de ataque secundarios, sino acoplarse directamente a la geometría, consiguieron actuar eficazmente como mazarotas en los tres puntos de mayor importancia.

5.1.4 COMPARATIVA DE REDUCCIÓN DE MASA REAL (PESO INICIAL VS. PESO OPTIMIZADO EN ALUMINIO).

Pese a no poder realizar una comparativa directa de la masa debido a las condiciones en las que se encuentra el modelo final, sí es posible efectuar una aproximación muy cercana de la reducción real obtenida.

Teniendo en cuenta que la masa original del basculante es de 473,2 gramos y que durante la etapa de optimización se consiguió reducir significativamente en un 30%, si a esto le añadimos las pequeñas modificaciones posteriores para el ensanchamiento de zonas críticas y la reconstrucción de alguna geometría mal optimizada, podemos estimar una reducción de la masa total cercana al 26%. Esto convertiría nuestra pieza final en un componente mucho más ligero, con un peso teórico de tan solo 350,2 gramos.

5.2 ANÁLISIS DE COSTES DEL PROYECTO

Como parte fundamental del proyecto, se evalúa la viabilidad económica de fabricar estas piezas de geometría compleja, analizando si la mejora del rendimiento justifica el incremento en los costes de producción. Para ello, en esta sección se desglosan los costes asociados tanto a la impresión 3D de los patrones como al posterior proceso de fundición, detallando los gastos de materiales y el tiempo de uso de los diferentes equipos e instalaciones empleados.

5.2.1 COSTES DE DISEÑO Y OPTIMIZACIÓN

En el ámbito de la ingeniería y los estudios computacionales, es imprescindible el uso de diversas herramientas de software, cuyas licencias se adquieren habitualmente mediante modalidades de suscripción mensual, trimestral o anual. Para el desarrollo de este proyecto se emplearon los entornos VXelements, Solid Edge y Altair Inspire. No obstante, dado que el modelo escaneado inicialmente se descartó por los motivos computacionales previamente

expuestos, se han omitido los costes de adquisición del escáner 3D y de su plataforma digital vinculados a la generación de la malla poligonal.

De este modo, para contabilizar el impacto económico asociado a esta etapa de diseño y cálculo, se consideran los siguientes conceptos generales:

Concepto	Coste
5 meses Microsoft 365	$5 * 11.7€ = 58.5€$
3 meses de licencia Solid Edge	$3 * 312€ = 936€$
1 mes de licencia Altair Inspire	$1 * 500€ = 500€$
Mano de obra ingeniero/ técnico (20€/h)	$135h * 20 \frac{€}{h} = 2700€$
Total:	4194.5 €

Tabla 8. Costes fijos de diseño y optimización

5.2.2 COSTES DE FABRICACIÓN ADITIVA

Los primeros costes analizados corresponden a la fase de fabricación aditiva. Para su cálculo no se considera únicamente el volumen de material consumido, sino que se incluye de forma detallada la amortización de los equipos, el coste de la mano de obra en tareas de desmoldeo y postprocesado, y el consumo eléctrico derivado del tiempo de impresión.

Aunque los diseños se fabricaron en dos impresoras distintas, al tratarse de equipos de la misma tecnología y utilizar el mismo filamento, los datos económicos recogidos en las tablas proporcionadas por el laboratorio representan un valor medio estandarizado del coste operativo habitual para este tipo de maquinaria.

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

Tabla 9. Datos amortización impresora FDM tamaño medio

Costes asociados a la impresión del modelo:

PIEZA modelo optimizado Álvaro - Orientación HORIZONTAL		
CONCEPTOS PRESUPUESTADOS	Opción Sólido	Costes parciales
Material modelo (cc)	61,15	1,48 €/ud
Soporte modelo (cc)	5,46	0,00 €/ud
Tiempo modelo (h)	3,43	2,49 €/ud
Piezas por bandeja (ud)	1,00	0,20 €/ud
Tiempo técnico-analista (h)	0,3	9,00 €
Cantidad de piezas	2,00	
Coste unitario (€) en ICAI + IVA	8,67 €/Ud	
Coste total (€) en ICAI + IVA	17,34 €	

Tabla 10. Costes de impresión FDM asociados al modelo optimizado

Además, si se supone un coste medio de la electricidad tomando como referencia desde 2022 hasta 2026, se establece un precio medio de 0.15 kW/h para contratos de baja tensión, esto generaría un coste adicional de:

$$\text{Coste unitario electricidad (€)} = 0.15 \frac{\text{kW}}{\text{h}} * 3.43 * 0.15 \frac{\text{€}}{\text{kW/h}} = 0.077\text{€}$$

Teniendo en cuenta el conjunto de gastos, en total, la fabricación de un solo modelo en PLA para su posterior calcinación costaría alrededor de **8.75 €/ud.**

Costes asociados a la impresión de la base:

PIEZA base soporte Álvaro - Orientación HORIZONTAL		
CONCEPTOS PRESUPUESTADOS	Opción Solido	Costes parciales
Material modelo (cc)	137,27	3,33 €/ud
Soporte modelo (cc)	0,00	0,00 €/ud
Tiempo modelo (h)	2,80	2,03 €/ud
Piezas por bandeja (ud)	1,00	0,20 €/ud
Tiempo técnico-analista (h)	0,3	9,00 €
Cantidad de piezas	2,00	
Coste unitario (€) en ICAI + IVA	10,06 €/Ud	
Coste total (€) en ICAI + IVA	20,12 €	

Tabla 11. Costes de impresión FDM asociados a la base-soporte

Realizando el mismo simple cálculo del gasto eléctrico, en este caso estaríamos gastando simplemente 0.063 € por impresión, lo que aumentaría los gastos totales de fabricación de la base a **10.15 €/ud**.

Al contrario que el modelo optimizado, esta base simplemente nos serviría únicamente durante el proceso de elaboración del molde, por lo que se podría llegar a reutilizar y no haría falta generar un nuevo modelo para cada unidad fabricada.

5.2.3 COSTES DEL PROCESO DE FABRICACIÓN MEDIANTE FUNDICIÓN

Para evaluar y comparar el coste de producción de la pieza mediante fundición, se desglosan los costes de los materiales empleados tanto para los modelos metálicos como para los moldes cerámicos refractarios. Asimismo, se incluye la amortización de los equipos utilizados y el coste de operación (OPEX), el cual integra principalmente la mano de obra directa y los consumos energéticos derivados del proceso.

CONCEPTO DE COSTE	PARÁMETROS Y COSTE PARCIAL
Coste de material	Material de fundición (250 cm ³): - Aluminio (L-2560): $250\text{cm}^3 * 2.65 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} * 4.5 \frac{\text{€}}{\text{kg}} = 3\text{€}$
	- Zamac : $250\text{cm}^3 * 6.6 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} * 3.8 \frac{\text{€}}{\text{kg}} = 6.27\text{€}$
Coste de equipos	Revestimiento en polvo (5,5 kg): - Argentum : $5.5\text{kg} * 3.2 \frac{\text{€}}{\text{kg}} = 17.6 \text{ €}$
	- Ultra-Vest : $5.5\text{kg} * 2.8 \frac{\text{€}}{\text{kg}} = 15.4 \text{ €}$
Coste de operación	Horno de mufla: (vida útil muy larga por lo que se presupone un coste de 0.1 €/h) $12\text{h} * 0.1\text{€} = 1.2\text{€}$
	Taladro y herramientas: El desgaste de las herramientas y mantenimientos se tasa como un coste de 3€
TOTAL	Mano de obra directa: $20 \frac{\text{€}}{\text{h}} * 2\text{h} = 40 \text{ €}$
	Consumo energético del horno: $2 \text{ kW} * 12\text{h} * 0.15\text{€/kWh} = 3.6\text{€}$
TOTAL	Modelo en Aluminio: 68.4 €
	Modelo en Zamac: 69.47 €

Tabla 12. Desglose de costes asociados al proceso de fundición

5.2.4 CONSOLIDACIÓN DEL COSTE UNITARIO

Para el cálculo del coste unitario del componente, se suman los costes asociados a todo el proceso de fabricación prescindiendo de los gastos derivados del rediseño geométrico preliminar, y bajo la hipótesis de que cada base de soporte impresa en PLA es capaz de resistir un promedio de tres ciclos de preparación del molde antes de sufrir deformaciones

térmicas o mecánicas que comprometan las tolerancias dimensionales respecto a la caja de acero exterior.

$$\text{Costes}_{\text{variables por unidad}} = 8.75 + \frac{10.15}{3} + 69 = \mathbf{81.13 \text{ €}}$$

Estos gastos se han clasificado como costes variables, ya que dependen directamente del volumen de piezas que se deseen fabricar. Por el contrario, los costes fijos representan una inversión inicial significativamente mayor que debe amortizarse; sin embargo, bajo la hipótesis de producir una serie de 1000 unidades, este impacto se diluye, reduciendo el coste fijo unitario a solo 4,19 €.

Con todo ello, el coste total aproximado por componente para una serie mediana se situaría en el entorno de los **85 €** mediante la técnica de fundición a la cera perdida asistida por fabricación aditiva.

Si se decidiera llevar esta pieza a una producción industrial, el primer paso sería optimizar por completo el método de fabricación. Habría que transicionar desde la metodología actual —diseñada exclusivamente para una fase de prototipado y validación en laboratorio— hacia un proceso industrializado, estandarizado y organizado. Al automatizar los ciclos de fundición y optimizar el uso de los moldes, se conseguiría reducir drásticamente los costes por unidad, haciendo que este componente sea mucho más competitivo en el mercado de la movilidad eléctrica.

5.3 COMPARATIVA ECONÓMICA Y DE MERCADO

Una vez consolidado el coste unitario del prototipo mediante fundición asistida por fabricación aditiva, es imperativo evaluar su competitividad y posicionamiento frente a las alternativas tecnológicas y comerciales del sector industrial. Esta sección analiza la viabilidad económica y técnica del proceso desarrollado en comparación con los métodos de manufactura convencionales y la impresión 3D directa en metal, justificando cómo la

complejidad geométrica derivada de la optimización topológica altera las reglas de producción habituales. Asimismo, se establece un balance beneficio-coste para cuantificar el impacto real que la reducción de peso ejerce sobre la eficiencia energética y el comportamiento dinámico del vehículo. [40]

5.3.1 LIMITACIONES TÉCNICAS Y VIABILIDAD ECONÓMICA DE LOS MÉTODOS DE FABRICACIÓN CONVENCIONALES.

El componente comercial genérico utilizado como punto de partida en el proceso de ingeniería inversa tiene un precio de mercado de 25 €, mientras que el recambio oficial distribuido por la web de Smart Giro Speedway (uno de los modelos de patinete compatibles) se sitúa en los 39 €. No obstante, más allá de una comparación económica directa, es crucial determinar que la geometría orgánica obtenida mediante la optimización topológica es técnicamente inviable o prohibitiva si se intentase replicar mediante los métodos de manufactura que dominan la industria actual. Consiguientemente, la introducción de estas formas eficientes exige la adopción de un cambio de paradigma en el proceso de fabricación.

En la actualidad, las alternativas industriales convencionales se dividen principalmente en dos tecnologías. Por un lado, la fundición por inyección a alta presión requeriría moldes de acero templado con un coste de mecanizado inicial astronómico; además, la complejidad geométrica del nuevo diseño daría lugar a graves problemas para establecer la línea de partición, obligando a implementar machos refractarios extremadamente complejos para asegurar el desmoldeo. Por otro lado, el mecanizado CNC a partir de bloque macizo, aunque otorga mayor flexibilidad, exige simplificar drásticamente las formas para permitir el acceso de la herramienta, incurriendo en tiempos de ciclo excesivos y en un desperdicio de material inasumible.

5.3.2 ANÁLISIS COMPARATIVO FRENTE A LA IMPRESIÓN 3D DIRECTA EN METAL

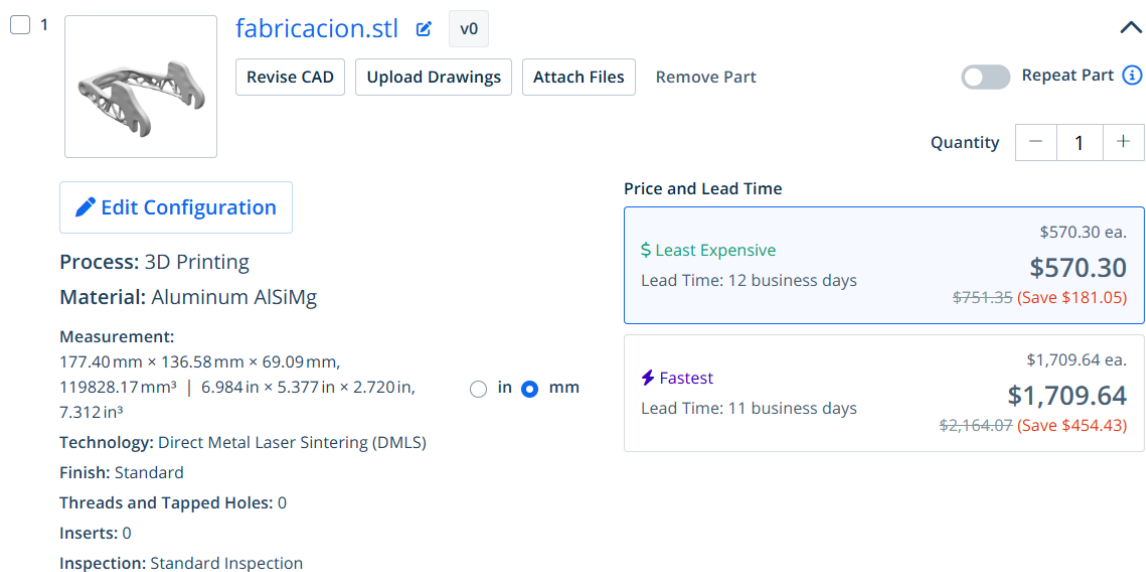
Ante este escenario, la fabricación aditiva se consolida como la única vía viable para materializar geometrías optimizadas en series cortas o fases de prototipado. Debido al notable desarrollo tecnológico y de materiales de los últimos años, el sector industrial ha experimentado un crecimiento exponencial en el empleo de estos métodos de manufactura. En la actualidad, existe una amplia variedad de técnicas aditivas que permiten obtener formas de alta complejidad geométrica utilizando un catálogo de materiales cada vez más diverso.

En este contexto, resulta de gran interés contrastar la metodología híbrida empleada en este proyecto frente a la producción de un componente impreso directamente en aluminio mediante tecnología de sinterizado directo de metal por láser (DMLS). Esta técnica fabrica piezas metálicas de alta precisión capa por capa, fundiendo polvo micrométrico mediante un láser de fibra de alta potencia en una atmósfera controlada de gas inerte. Si bien el proceso DMLS destaca por otorgar una total libertad de diseño —resolviendo los problemas de desmoldeo y rebajando el peso estructural al mínimo—, introduce importantes limitaciones económicas y operativas: el elevado coste del polvo esférico de aluminio, la necesidad obligatoria de estructuras de soporte metálicas difíciles de retirar y la exigencia de tratamientos térmicos posteriores.[28]

Dado que la tecnología DMLS emplea un haz láser de alta densidad energética para fusionar el polvo metálico, las altas tasas de enfriamiento confieren al material un límite elástico elevado, cercano a los 250 MPa. Este valor supera notablemente al del material recocido convencional, pero introduce un estado de tensiones residuales internas que obliga a someter al componente a un tratamiento térmico posterior de alivio de tensiones. Dependiendo de los parámetros de tiempo y temperatura de dicho ciclo, se pueden modular las propiedades mecánicas finales; no obstante, tras un tratamiento estándar de homogeneización se suele estabilizar el límite elástico en torno a los 165 MPa. Dado que esta magnitud es ligeramente superior a la obtenida mediante procesos de fundición convencional, el modelo impreso

directamente en metal presentaría, a igualdad de geometría, un coeficiente de seguridad mayor frente a las cargas de servicio estimadas. [49], [50]

En lo que respecta al coste de producción indexado a través de la tecnología DMLS, el precio unitario para series cortas se sitúa en los **570.3 €**, una cifra significativamente más alta a los costes operativos del método de fundición a la cera perdida, debido a los altos costes de las impresoras (su amortización) y principalmente el elevado coste del polvo metálico apto para impresión 3D. Estos datos analíticos se han obtenido mediante la plataforma de manufactura bajo demanda **Xometry**, uno de los principales proveedores globales de fabricación aditiva y mecanizado, empleando su motor de presupuestado en línea calibrado para las especificaciones del aluminio. [51]



The screenshot shows the Xometry interface for a 3D printed part. The part is named 'fabricacion.stl' and is version 'v0'. It is a 3D model of a mechanical part. The process is '3D Printing' and the material is 'Aluminum AlSiMg'. The measurement is '177.40 mm x 136.58 mm x 69.09 mm, 119828.17 mm³ | 6.984 in x 5.377 in x 2.720 in, 7.312 in³'. The technology is 'Direct Metal Laser Sintering (DMLS)'. The finish is 'Standard'. The threads and tapped holes are '0'. The inserts are '0'. The inspection is 'Standard Inspection'.

The 'Price and Lead Time' section shows two options:

Option	Price	Lead Time	Savings
Least Expensive	\$570.30 ea.	12 business days	\$181.05 (Save)
Fastest	\$1,709.64 ea.	11 business days	\$454.43 (Save)

Figura 96. Presupuesto comercial de manufactura aditiva directa de metal (DMLS)

Como consecuencia de estos valores, se deduce que si bien la impresión directa en metal representa un sobrecoste para la fase de producción frente al método desarrollado en este proyecto, su viabilidad económica para series muy pequeñas o únicas lo convierte en una buena opción, debido a que de esta manera, dada su total automatización, nos aseguramos

de que el resultado es correcto sin la necesidad de tener que realizar multitud de pruebas y ensayos hasta obtener el proceso de fabricación ideal.

Más allá del factor puramente financiero, la tecnología DMLS aporta ventajas operativas críticas desde la primera unidad: reduce drásticamente las horas de mano de obra directa al suprimir por completo las etapas de moldeado y colada, y mitiga el riesgo de defectos geométricos o estructurales (como porosidades, rechupes o inclusiones) que son intrínsecos al proceso de fundición convencional.

5.3.3 ANÁLISIS BENEFICIO-COSTE: IMPACTO DE LA LIGEREZA EN LA AUTONOMÍA Y DINÁMICA DEL PATINETE.

Como se ha constatado a lo largo de este análisis económico, la materialización de componentes mediante diseño generativo y optimización topológica incurre en costes de fabricación superiores a los de las alternativas comerciales de serie. No obstante, en el sector industrial, el incremento del coste unitario debe ponderarse en función de las prestaciones que se le añaden al vehículo. En el caso de este basculante optimizado, el aumento del presupuesto se justifica principalmente a través de dos mejoras. El primero de ellos es la eficiencia energética y el consecuente incremento de la autonomía por ciclo de carga. Al reducir drásticamente la masa del componente, disminuye la inercia del vehículo; por consiguiente, durante las fases de aceleración transitoria el motor eléctrico demanda un menor par motor, optimizando el consumo de corriente de la batería.

El segundo factor diferencial radica en la reducción de la masa no suspendida del patinete, definida como el conjunto de componentes mecánicos que se mueven de forma solidaria con la rueda. Cuando el neumático impacta contra una irregularidad del terreno, experimenta una fuerza vertical brusca; si la masa del basculante (que forma parte de este conjunto no suspendido) es elevada, su alta inercia dificulta la reactividad de la suspensión, provocando pérdidas temporales de adherencia y transmitiendo vibraciones al chasis. Al aligerar la geometría de la pieza, el conjunto adquiere una menor inercia, permitiendo que el

amortiguador trabaje en su rango óptimo de operación, lo que mitiga el riesgo de pérdida de tracción y mejora el confort de la marcha. [52] De este modo, las modificaciones geométricas propuestas trascienden el plano puramente estético, impactando de forma directa en la seguridad dinámica y en la respuesta de conducción de un vehículo ligero, donde la reducción de unos pocos gramos altera cualitativamente el comportamiento global del sistema.

6. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En este capítulo se presentan, tras la finalización del proyecto, tanto las conclusiones extraídas sobre la metodología empleada y las posibles mejoras para simplificar el proceso, como aquellos aspectos que podrían abordarse en estudios posteriores para completar la investigación relativa a la optimización y fabricación del componente.

6.1 CONCLUSIONES DEL PROYECTO

- **Limitaciones de la fotogrametría:** A la vista de los resultados obtenidos, se recomienda emplear la fotogrametría como técnica de ingeniería inversa en aquellos casos donde los requisitos de detalle geométrico sean de nivel bajo o medio.
- **Coste computacional:** Dada la complejidad geométrica inherente a la generación de mallas mediante ingeniería inversa, se debe considerar que, incluso con una alta capacidad de procesamiento, los tiempos de resolución mediante el método de elementos finitos son significativamente altos.
- **Planificación en el diseño generativo:** Previo a cualquier optimización topológica en Solid Edge, resulta fundamental definir un esquema funcional de la pieza para identificar con precisión las zonas de preservación. Asimismo, la configuración de la optimización dependerá directamente de los criterios de integridad superficial requeridos.
- **Simplificación del modelo:** Tanto para las simulaciones, como para las optimizaciones realizadas en las cuales se parte de un modelo mallado complejo, se recomienda realizar operaciones de extrusión en los puntos de aplicación de las cargas. Esta simplificación previa facilita significativamente el cálculo y la convergencia del modelo.

- **Gestión de PolyNURBs en el postprocesado:** Durante el postprocesado en Altair Inspire, es necesario generar una PolyNURB que, manteniendo una geometría sencilla, se adapte fielmente al contorno de la pieza. Dada la posibilidad de que el tratamiento manual introduzca defectos (como intersecciones no deseadas o pequeñas discontinuidades), es imperativo realizar una inspección exhaustiva. De lo contrario, cualquier inconsistencia geométrica impedirá la correcta conversión a un cuerpo sólido editable al exportar el archivo a Solid Edge.
- **Idoneidad del Componente para el Diseño Generativo:** El basculante trasero seleccionado demostró una absoluta validez para la aplicación de técnicas de optimización topológica. Las simulaciones estructurales iniciales revelaron que, bajo hipótesis de carga relativamente severas, el material en las regiones laterales trabajaba a niveles tensionales muy inferiores a su límite elástico. Este sobredimensionamiento geométrico de partida confirmó la existencia de un amplio margen de mejora, justificando la eliminación estratégica de material en los flancos laterales sin comprometer en ningún momento la rigidez ni la integridad estructural original del componente.
- **Defectología en la fundición:** Dado que la mayoría de los defectos surgidos durante la colada son consecuencia directa de la elección del material del patrón calcinable, se concluye que, durante las etapas de horneado del molde, este se debe mantener durante un mayor tiempo en una meseta térmica en torno a los 200 °C. En este punto, el PLA se encuentra a una temperatura superior a su punto de fusión pero notablemente inferior a la de calcinación, lo que permitiría su correcto drenaje y evacuación líquida del molde antes de que se comiencen a formar las cenizas.
- **Análisis de Viabilidad Económica y Escalabilidad:** El análisis de costes determinó que la fundición al modelo perdido con patrones calcinables es uno de los mejores métodos de fabricación para estas formas orgánicas, pero incrementa los costes de

manufactura. El coste de fabricación unitario en laboratorio asciende a 85 €, frente a los 40 € del recambio comercial de serie. Esto situaría el precio de venta al público en torno a los 100 €, evidenciando que este proceso es idóneo para prototipado rápido o componentes de altas prestaciones, pero requiere automatización para competir en producción en masa.

- **Revalorización Funcional mediante Optimización Topológica:** La aplicación del diseño generativo aporta una notable revalorización técnico-funcional respecto a las geometrías convencionales debido a dos beneficios clave. Por un lado, la reducción de la masa no suspendida atenúa las vibraciones estructurales, optimizando la amortiguación y el confort de marcha. Por otro lado, la disminución del peso global reduce la inercia del vehículo en condiciones transitorias (aceleraciones); esto disminuye el par motor demandado y permite que la batería suministre una menor tensión, mejorando directamente la eficiencia energética y la autonomía.

6.2 LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN Y TRABAJOS FUTUROS

Dado que el alcance del presente trabajo se ha ceñido a las fases de diseño y optimización, se proponen las siguientes líneas de investigación para profundizar en el desarrollo del componente:

- **Optimización comparativa en Altair Inspire:** Con el fin de diversificar la metodología, se plantea realizar una comparativa empleando el software Altair Inspire como herramienta de trabajo. Su especialización en tareas de diseño generativo permitiría explorar nuevas soluciones geométricas alternativas a las obtenidas en el presente estudio.

- **Optimización y Simulación Avanzada del Proceso de Fundición:** Con base en las imperfecciones superficiales detectadas en el prototipo, se recomienda profundizar en el estudio del sistema de alimentación de la colada. Estos defectos no invalidan la viabilidad del método de modelo perdido, sino que señalan la necesidad de parametrizar geométricamente el vertido. Para futuros casos de estudio, se propone integrar softwares de simulación de colada para evaluar digitalmente la dinámica de fluidos antes del vertido. Esto permitirá analizar distintas orientaciones e inclinaciones del bebedero, así como rediseñar mazarotas (interiores y exteriores) para optimizar el gradiente térmico y garantizar la máxima calidad superficial.
- **Análisis de viabilidad técnica y fabricación:** Se recomienda explorar la integración del diseño optimizado con diversas tecnologías de fabricación, analizando procesos como la fundición a la cera perdida (mediante modelos impresos en SLS o DLP), la fundición a la espuma perdida (*Lost Foam Casting*) o la fabricación aditiva directa mediante tecnología DMLS. Asimismo, se considera de vital importancia, tanto para la mejora de este trabajo como para futuros proyectos de investigación; realizar un estudio profundo de los tiempos y temperaturas de calcinación de los modelos perdidos. Este análisis térmico debe plantearse de forma sistemática en función del material empleado, así como de las dimensiones y grosores específicos de la geometría a fundir, con el fin de garantizar la evacuación completa del patrón y evitar la aparición de defectos residuales.
- **Validación experimental:** Para un posible uso en aplicaciones reales, sería necesario realizar una caracterización física del componente. Se propone la fabricación de prototipos para someterlos a ensayos destructivos y no destructivos, lo que permitiría identificar la presencia de concentraciones de tensiones, defectos geométricos o irregularidades derivadas del proceso de fabricación.
- **Optimización e industrialización del proceso de fabricación:** En la fase actual del proyecto, el coste unitario calculado se mantiene prácticamente constante debido a

que tanto la impresión del modelo evaporable como la preparación del molde refractario, el horneado y la colada se han dimensionado para la obtención de un único prototipo. Como línea de investigación futura, se plantea el desarrollo de un estudio de escalabilidad industrial. Esto incluiría la estandarización de los ciclos térmicos, el diseño de árboles de colada y la automatización del postprocesado. Con estas mejoras, se lograría reducir drásticamente los tiempos de ciclo y los costes variables por pieza, incrementando la competitividad del componente en el mercado de la micromovilidad.

- **Estudio de tratamiento térmico:** Dado que el aluminio fundido de forma convencional no adquiere de manera directa elevadas propiedades mecánicas, se plantea para futuros proyectos el estudio de tiempos y temperaturas para realizar un tratamiento térmico posterior que aumente su resistencia mecánica estructural.

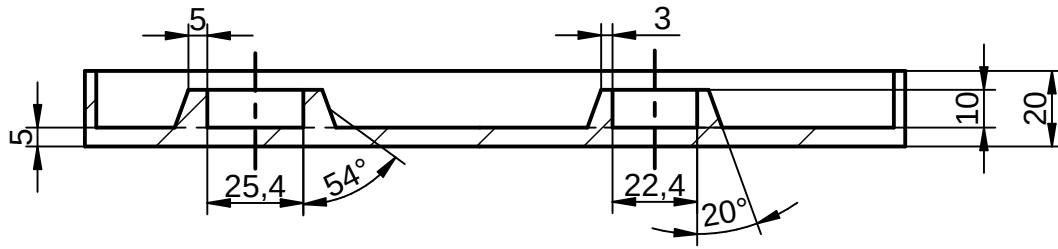
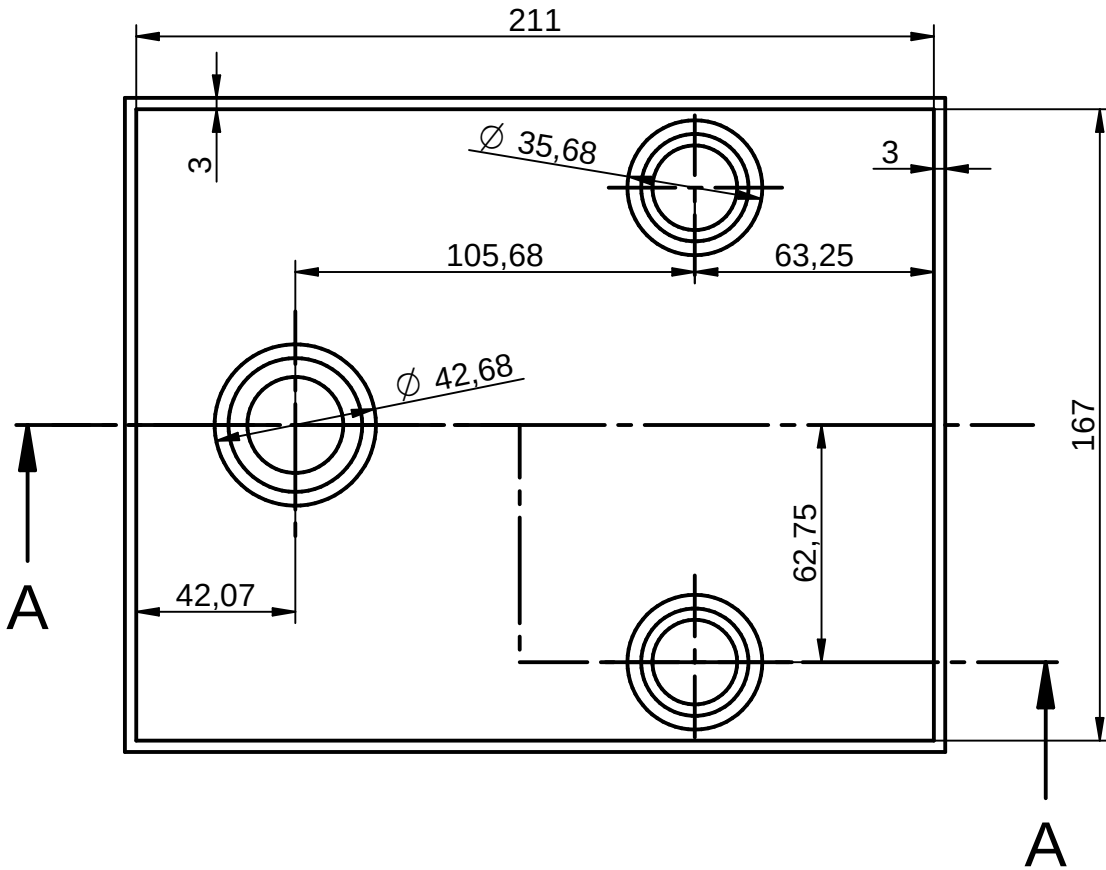
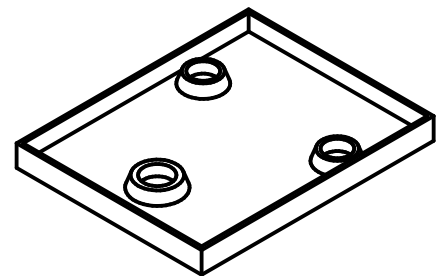
7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. Mesicek, M. Pagac, J. Petru, P. Novak, J. Hajnys y K. Kutiova, "Topological optimization of the Formula Student bell crank," *MM Science Journal*, vol. 2019, no. October, pp. 2964–2971, Oct. 2019, doi: 10.17973/MMSJ.2019_10_201893.
- [2] T. Tang, L. Wang, M. Zhu, H. Zhang, J. Dong, W. Yue y H. Xia, "Topology Optimization: A Review for Structural Designs Under Statics Problems," *Materials*, vol. 17, n.º 23, art. n.º 5970, dic. 2024. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.3390/ma17235970>.
- [3] P. S. Cocero, M. J. Calzado, y J. G. Llopis, «ANÁLISIS, DISEÑO GENERATIVO Y FABRICACIÓN MEDIANTE IMPRESIÓN 3D DE LOS BRAZOS DE SUJECCIÓN PARA UNA PRENSA DE SUJECCIÓN PARALELA».
- [4] «Google Gemini», Gemini. Accedido: 30 de mayo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://gemini.google.com>
- [5] L. J. Castillo Butters y H. Barrera Yaranga, «Fotogrametría, modelamiento tridimensional y drones en arqueología : Primera parte. La ilustración arqueológica. De la representación artística al modelamiento tridimensional = Photogrammetry, 3D modeling and drones in archaeology: Part one. Archaeological illustration. From artistic renderings to 3D modeling», *Bol. Arqueol. PUCP*, n.º . 35, pp. 96-121, ene. 2024, doi: 10.18800/boletindearqueologiapucp.202402.005.
- [6] N. De Leo, C. Chimenti, L. Maiorano, y D. Tamagnini, «Protocol for 3D photogrammetry and morphological digitization of complex skulls», *STAR Protoc.*, vol. 6, n.º 1, p. 103572, mar. 2025, doi: 10.1016/j.xpro.2024.103572.
- [7] «TFM_Victor.pdf». Accedido: 1 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: https://accedacris.ulpgc.es/bitstream/10553/6320/4/TFM_Victor.pdf
- [8] S. Falip, D. Del Cogliano, S. Falip, y D. Del Cogliano, «Generación de Nubes de Puntos 3D con Escáner Laser Terrestre. Georreferenciación y Evaluación de la Calidad», *Ingeniería*, vol. 24, n.º 2, pp. 171-197, ago. 2019, doi: 10.14483/23448393.14542.
- [9] B. R. Mario, «Ingeniería Inversa Aplicada: Metodología y aplicaciones industriales.».
- [10] «Estudio comparativo del láser escáner aplicado a patrimonio».
- [11] «TESIS_MASTER_ADRIAN_MARTINEZ_FERNANDEZ.pdf». Accedido: 1 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: https://oa.upm.es/34108/1/TESIS_MASTER_ADRIAN_MARTINEZ_FERNANDEZ.pdf
- [12] P. R. Navarro, «La fotogrametría digital automatizada frente a los sistemas basados en sensores 3D activos», *EGA Expr. Gráfica Arquít.*, n.º 20, pp. 100-111, 2012, doi: 10.4995/ega.2012.1408.
- [13] J. L. Lerma, «Modelado fotorrealístico 3D a partir de procesos fotogramétricos: láser escáner versus imagen digital», 2013.
- [14] «Diseño generativo para arquitectura, ingeniería y construcción | Autodesk». Accedido: 2 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en:

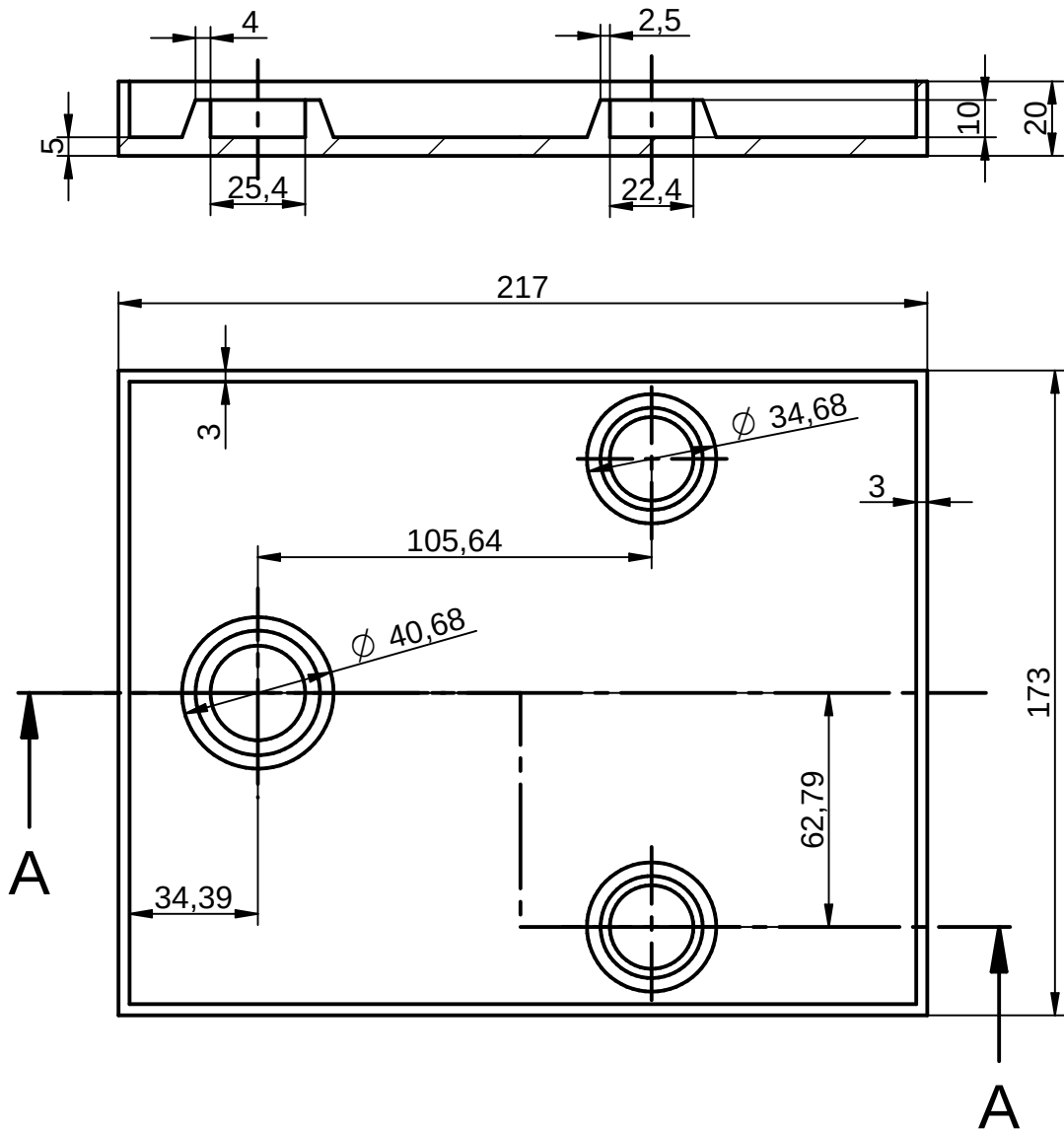
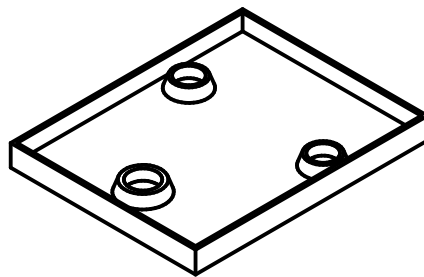
- <https://www.autodesk.com/es/solutions/generative-design/architecture-engineering-construction>
- [15] «¿Qué es el diseño generativo?», Siemens Digital Industries Software. Accedido: 2 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://resources.sw.siemens.com/es-ES/e-book-what-is-generative-design/>
- [16] L. García Menéndez, «Diseño generativo: el estado del arte», *Téc. Ind.*, vol. 327, n.º 327, pp. 44-49, nov. 2020, doi: 10.23800/10417.
- [17] «Todo lo que necesita saber sobre la optimización topológica | SOLIDWORKS». Accedido: 2 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.solidworks.com/es/media/everything-you-need-know-about-topology-optimization>
- [18] A. R. Peñalver y M. J. Calzado, «DISEÑO GENERATIVO, SIMULACIÓN E IMPRESIÓN 3D DE TRES VERSIONES DIFERENTES DE UN RACOR DE UNA BICICLETA».
- [19] Á. M. Ballesteros y M. J. Calzado, «ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA DE ELEMENTOS PARA PRODUCTOS DE CONSUMO».
- [20] «TFG_Ene21_Garcia_Torija_Analsabel.pdf». Accedido: 2 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: https://oa.upm.es/66899/1/TFG_Ene21_Garcia_Torija_Analsabel.pdf
- [21] «Design Elements». Accedido: 2 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: https://help.altair.com/hwsolvers/os/topics/solvers/os/topology_opt_design_elements_r.htm
- [22] J. X. L. Medina, «MÉTODO DE OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA DE ESTRUCTURAS CONTINUAS BASADO EN QUIMOTAXIS DE BACTERIAS».
- [23] E. Tyflopoulos y M. Steinert, «A Comparative Study of the Application of Different Commercial Software for Topology Optimization», *Appl. Sci.*, vol. 12, n.º 2, p. 611, ene. 2022, doi: 10.3390/app12020611.
- [24] «Restricciones en tensión y minimización del peso una metodología general para la optimización topológica de estructuras». Accedido: 3 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://ruc.udc.es/entities/publication/24ed738e-e46a-4258-a36e-bb20bdf96b29>
- [25] E. minutos de lectura, «Nociones básicas de optimización topológica: Cómo usar modelos algorítmicos para crear un diseño ligero», Formlabs. Accedido: 3 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://formlabs.com/es/blog/optimizacion-topologica/>
- [26] L. M. Aitzol, *FABRICACIÓN ADITIVA*. Editorial UNED, 2023.
- [27] P. M. Hernández-Castellano *et al.*, *Tecnologías de fabricación aditiva*. Servicio de Publicaciones y Difusión Científica de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, 2018. Accedido: 3 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://accedacris.ulpgc.es/jspui/handle/10553/52521>
- [28] «Curso de Diseño para Impresión 3D - Departamento de Fabricación ICAI».
- [29] «3689.pdf». Accedido: 3 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.xoc.uam.mx/jspui/retrieve/a48399b5-a960-4e03-8584-b252586d841b/3689.pdf>
- [30] J. Bernal-Plaza, C. De-Jesús-Méndez, H. Vidal-Pérez, y A. Troncoso-Palacio, «Transformando la Manufactura Global. Ventajas y Retos de la Impresión 3D Frente a

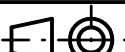
- Métodos Tradicionales», *Bol. Innov. Logística Oper.*, vol. 7, n.º 2, pp. 23-35, jul. 2025, doi: 10.17981/bilo.7.2.2025.03.
- [31] M. N. F. Herrera, D. M. A. Jami, L. D. G. Salazar, y G. M. V. Rivera, «Comparación entre métodos de impresión manual y tecnologías de impresión 3D», *Sci. Rev. Prod. Cienc. E Investig.*, vol. 9, n.º 60, pp. 21-32, dic. 2025, doi: 10.29018/issn.2588-1000vol9iss60.2025pp21-32.
- [32] A. H. Seltzman y S. J. Wukitch, «Resolution and geometric limitations in laser powder bed fusion additively manufactured GRCop-84 structures for a lower hybrid current drive launcher», *Fusion Eng. Des.*, vol. 173, p. 112847, dic. 2021, doi: 10.1016/j.fusengdes.2021.112847.
- [33] M. A. Sarabia-Vallejos, F. E. Rodríguez-Umanzor, C. M. González-Henríquez, y J. Rodríguez-Hernández, «Innovaciones tecnológicas en la impresión 3D basada en extrusión de materiales», 2022, Accedido: 3 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://digital.csic.es/handle/10261/307574>
- [34] M. S. López, M. Musmeci, A. Delconte, y A. C. González, «Análisis del alcance de la implementan de modelos 3D FDM en la fabricación de cascaras cerámicas», presentado en V Jornadas de Investigación, Transferencia y Extensión de la Facultad de Ingeniería (La Plata, 2019), 2019. Accedido: 4 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/75962>
- [35] G. Escudero y M. José, «DISEÑO GENERATIVO DE UN COMPONENTE INDUSTRIAL Y SU FABRICACIÓN MEDIANTE IMPRESIÓN 3D Y FUNDICIÓN AL MODELO PERDIDO», 2025, Accedido: 4 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.comillas.edu/xmlui/handle/11531/94203>
- [36] D. Metals, «Fundición a la cera perdida para la industria aeroespacial: Ingeniería de precisión a gran altura», Dawang Metales. Accedido: 4 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://dawangmetals.com/es/resources/investment-casting-for-the-aerospace-industry/>
- [37] M. Domingo Albert, «DISEÑO GENERATIVO DEL PEDAL-BIELA DE UNA BICICLETA Y SU FABRICACIÓN MEDIANTE FUNDICIÓN AL MODELO PERDIDO», 2025, Accedido: 4 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.comillas.edu/xmlui/handle/11531/90216>
- [38] A. Vigliani, A. Yazhisavendhan, y I. A. D. Vella, «Experimental Analysis on Electric-Kick Scooter».
- [39] M. Asperti, M. Vignati, y F. Braghin, «Modelling of the Vertical Dynamics of an Electric Kick Scooter», *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 23, n.º 7, pp. 9266-9274, jul. 2022, doi: 10.1109/TITS.2021.3098438.
- [40] «Patinete eléctrico smartGyro Speedway Certificado», Smartgyro. Accedido: 23 de mayo de 2026. [En línea]. Disponible en: https://smartgyro.es/single-motor/patinete-electrico-smartgyro-speedway-certificado?srsltid=AfmBOoqZVqx56TeXJUq2XHvJqZv_bXMomWoGeQPcj6Zedc9UHXO7C1cr
- [41] M. Beder, S. B. Akçay, T. Varol, y H. Çuvalcı, «The Effect of Heat Treatment on the Mechanical Properties and Oxidation Resistance of AlSi10Mg Alloy», *Arab. J. Sci. Eng.*, vol. 49, n.º 11, pp. 15335-15346, nov. 2024, doi: 10.1007/s13369-024-08971-1.

- [42] «Bambu Lab P1 Series | Reliable Out-of-the-Box Performance | Bambu Lab EU». Accedido: 28 de mayo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://bambulab.com/en-eu/p1>
- [43] «Bambu Lab X1 Series | Desktop 3D Printer | X1C | Bambu Lab EU». Accedido: 28 de mayo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://bambulab.com/en-eu/x1>
- [44] H. C. Collazos, «SISTEMA DE IMPRESIÓN 3D SOBRE SUPERFICIES NO PLANAS MEDIANTE UN BRAZO ROBÓTICO», n.º 3.
- [45] «Ransom & Randolph | ARGENTUM investments», ransom-randolph 2022. Accedido: 29 de mayo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.ransom-randolph.com/argentum-investments>
- [46] «Ransom & Randolph | Ultra-Vest investments», ransom-randolph 2022. Accedido: 29 de mayo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.ransom-randolph.com/ultra-vest>
- [47] J. Kolczyk, Ł. Jamrozowicz, y N. Kaźnica, «Rheological Properties of Typical Ceramic Slurries Used in the Lost Wax Technology», *Arch. Foundry Eng.*, vol. 17, n.º 1, pp. 197-201, mar. 2017, doi: 10.1515/afe-2017-0035.
- [48] M. Domingo Albert, «DISEÑO GENERATIVO DEL PEDAL-BIELA DE UNA BICICLETA Y SU FABRICACIÓN MEDIANTE FUNDICIÓN AL MODELO PERDIDO», 2025, Accedido: 29 de mayo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.comillas.edu/xmlui/handle/11531/90216>
- [49] L. F. Wang *et al.*, «Enhancement in mechanical properties of selectively laser-melted AlSi10Mg aluminum alloys by T6-like heat treatment», *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 734, pp. 299-310, sep. 2018, doi: 10.1016/j.msea.2018.07.103.
- [50] B. J. Mfusi, N. R. Mathe, L. Motibane, D. Glaser, O. E. Lopez-Botello, y P. A. I. Popoola, «The effect of T6 and hot isostatic pressure thermal treatments on the crack fatigue growth and fracture toughness of AlSi10Mg produced by additive manufacturing», *J. Manuf. Process.*, vol. 151, pp. 1042-1057, oct. 2025, doi: 10.1016/j.jmapro.2025.07.065.
- [51] «Xometry Europe». Accedido: 31 de mayo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://get.xometry.eu/quotes/1899951/parts/4375860>
- [52] R. Vos, I. J. M. Besselink, y H. Nijmeijer, «Influence of in-wheel motors on the ride comfort of electric vehicles», *Proc. 10th Int. Symp. Adv. Veh. Control AVEC10 22-26 August 2010 Loughb. U. K.*, pp. 835-840, 2010.



MATERIAL	PLA	FORMATO		TÍTULO SUPLEMENTARIO
TOLERANCIA	ISO 2768-mK	A4		Base útil para fundición
NOMBRE			FECHA	TÍTULO
DIBUJADO	Álvaro López Jiménez	26/05/2026		baseTFGalvaro
COMPROBADO	Mariano Jiménez Calzado	26/05/2026		
ESCALA:	FIRMA			CÓDIGO
1:2				TFG-ALJ-B1



MATERIAL	PLA	FORMATO A4		TÍTULO SUPLEMENTARIO
TOLERANCIA	ISO 2768-mK			Base útil para fundición v2
NOMBRE			FECHA	TÍTULO baseTFGalvaroV2
DIBUJADO	Álvaro López Jiménez		27/05/2026	
COMPROBADO	Mariano Jiménez Calzado		27/05/2026	
ESCALA: 1:2	FIRMA 			CÓDIGO TFG-ALJ-B2
<div><div>COMILLAS UNIVERSIDAD PONTIFICIA ICA I</div></div>				