



# GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

## **DISEÑO GENERATIVO DEL PEDAL-BIELA DE UNA BICICLETA Y SU FABRICACIÓN MEDIANTE FUNDICIÓN AL MODELO PERDIDO**

Autor: Marta Domingo Albert

Director: Mariano Jiménez Calzado

Co-Director: Xavier Soldani

Madrid

Julio de 2025

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título  
“DISEÑO GENERATIVO DEL PEDAL-BIELA DE UNA BICICLETA Y SU  
FABRICACIÓN MEDIANTE FUNDICIÓN AL MODELO PERDIDO”

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

curso académico 2024/25 es de mi autoría, original e inédito y

no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos.

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

tomada de otros documentos está debidamente referenciada.



Fdo.: Marta Domingo Albert

Fecha: 22 / 07 /2025

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO



Fdo.: Mariano Jiménez Calzado

Fecha: 22 / 07 /2025

EL CODIRECTOR DEL PROYECTO



Fdo.: Xavier Soldani

Fecha: 22 / 07 /2025



# GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

## **DISEÑO GENERATIVO DEL PEDAL-BIELA DE UNA BICICLETA Y SU FABRICACIÓN MEDIANTE FUNDICIÓN AL MODELO PERDIDO**

Autor: Marta Domingo Albert

Director: Mariano Jiménez Calzado

Co-Director: Xavier Soldani

Madrid

Julio de 2025

# Agradecimientos

A Xavier por su acompañamiento en los primeros pasos del proyecto.

A Mariano por su dedicación, generosidad y compromiso. Por contagiarme su pasión por la ingeniería. Ha sido un verdadero privilegio contar con su guía.

A David por hacer el proyecto realidad. Sin su ayuda no habría sido posible.

A mi familia y amigos por estar a mi lado a lo largo de mis estudios.

# **DISEÑO GENERATIVO DEL PEDAL-BIELA DE UNA BICICLETA Y SU FABRICACIÓN MEDIANTE FUNDICIÓN AL MODELO PERDIDO**

**Autor: Domingo Albert, Marta.**

Director: Jiménez Calzado, Mariano.

Co-Director: Soldani, Xavier.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

## **RESUMEN DEL PROYECTO**

Este proyecto tiene como objetivo principal la obtención de un pedal-biela más ligero sin comprometer su resistencia estructural. Además, busca en la fundición al modelo perdido una alternativa de fabricación más económica frente a la impresión 3D metálica.

**Palabras clave:** Diseño generativo, optimización topológica, método de elementos finitos, fundición al modelo perdido, fabricación aditiva, impresión 3D, pedal-biela.

### **1. Introducción**

La búsqueda de componentes más ligeros sin comprometer su resistencia estructural es un objetivo clave en sectores como la movilidad sostenible. Este proyecto aborda el diseño de una biela de una bicicleta y la reducción de su masa mediante herramientas de diseño generativo y optimización topológica, manteniendo la resistencia necesaria para su funcionamiento. Debido a la complejidad de la geometría resultante de la solución optimizada, se ha optado por la fabricación por fundición al modelo perdido como alternativa más económica viable frente a la impresión 3D metálica. La incorporación de técnicas de impresión 3D para la fabricación de los modelos utilizados en la fundición supone un avance significativo, al facilitar la integración entre diseño generativo y fabricación rápida de piezas.

### **2. Definición del proyecto**

En el proyecto se ha seguido el diagrama de flujo mostrado en la Figura 1. Primero se ha diseñado la geometría de una biela sencilla, de la que se ha partido para el proceso de optimización topológica. Una vez conseguido el diseño, se ha seleccionado el material, aplicado cargas y restricciones, y se ha realizado una simulación mediante métodos de elementos finitos. A partir de esta simulación se ha establecido una condición de tensión máxima admisible para el proceso iterativo de optimización topológica. Posteriormente, se ha comenzado el proceso iterativo de optimización topológica y simulación FEM hasta conseguir un modelo óptimo. Este modelo se ha refinado y se ha sometido a una validación FEM final para obtener la pieza final optimizada.

Además, en paralelo, para los procesos de fabricación se ha añadido un sistema de alimentación a la biela y se ha diseñado una tapa para el molde de fundición al modelo perdido.

Para materializar el diseño se ha elegido el método de fundición al modelo perdido. Primero se ha impreso en 3D el modelo con los bebederos y la base del molde. Después se ha preparado el molde cerámico y se ha sometido a una rampa de temperatura para eliminar el modelo. Finalmente, se ha realizado la colada y se ha obtenido la pieza fundida con los bebederos que pueden ser eliminados en un postprocesado para conseguir la geometría final.

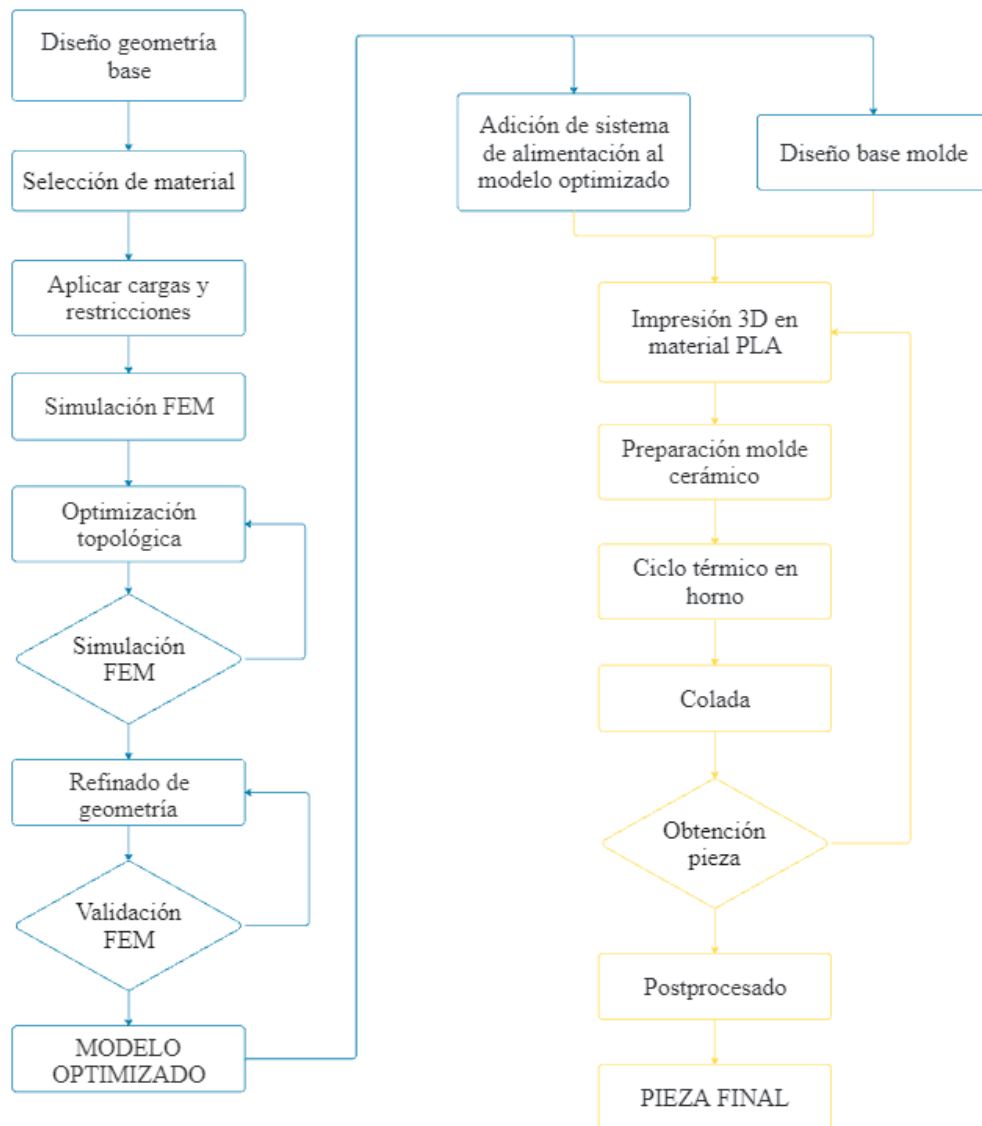


Figura 1: Flujo de trabajo del proceso de diseño y fabricación. Fuente propia.

### 3. Descripción del modelo/sistema/herramienta

Las herramientas empleadas en el proyecto son las siguientes:

- Solid Edge. Se ha utilizado para el diseño inicial, las simulaciones FEM y la optimización topológica.
- Altair Inspire. Se ha empleado para el refinamiento de la geometría.
- Ultimaker Cura. Software utilizado para el laminado de las piezas para impresión 3D.

- Impresoras Prusa I3KS-MK3S+ y HP Jet Fusion 580 C. Se han empleado para la impresión 3D de los prototipos y de los modelos desechables.

#### 4. Resultados

El resultado obtenido tras las iteraciones de optimización topológica es una biela con una reducción del 41% de masa. A continuación, se muestran los resultados obtenidos mediante fabricación aditiva y fundición al modelo perdido.



Ilustración 1: Comparativa biela original, optimizada y fundida. Fuente propia.

#### 5. Conclusiones

Las conclusiones principales obtenidas a lo largo del proyecto son:

- La optimización topológica es una herramienta útil para la reducción de masa manteniendo la integridad estructural.
- La fundición al modelo perdido es ideal para la fabricación de piezas metálicas obtenidas mediante diseño generativo a un coste inferior que mediante impresión 3D metálica.
- Las limitaciones principales se encuentran en la calidad superficial del proceso de fundición al modelo perdido sin mecanizado posterior.

#### 6. Referencias

1. Y. Ismail, G. Na, y B. Koo, «Topology and Response Surface Optimization of a Bicycle Crank Arm with Multiple Load Cases», *Appl. Sci.*, vol. 10, n.º 6, p. 2201, mar. 2020, doi: 10.3390/app10062201.
2. M. P. Bendsøe y O. Sigmund, *Topology optimization: theory, methods and applications*, Nouv. ed. révisée et augm. Berlin: Springer, 2003.
3. Groover, Mikell P., *Fundamentals of modern manufacturing : materials, processes, and systems*, 5th ed. 1939.

# **GENERATIVE DESIGN OF A BICYCLE CRANK ARM AND ITS MANUFACTURING VIA INVESTMENT CASTING**

**Author: Domingo Albert, Marta.**

Supervisor: Jiménez Calzado, Mariano.

Co-Supervisor: Soldani, Xavier.

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas.

## **ABSTRACT**

The main objective of this project is to obtain a lighter crank arm without compromising its structural strength. Additionally, it explores investment casting as a more cost-effective manufacturing alternative to metal 3D printing.

**Keywords:** Generative design, topology optimization, finite element method, investment casting, additive manufacturing, 3D printing, crank arm.

## **1. Introduction**

The pursuit of lighter components without compromising structural strength is a key objective in sectors such as sustainable mobility. This project focuses on the design of a bicycle crank arm and the reduction of its mass through generative design tools and topology optimization, while maintaining the strength required for its function. Due to the complexity of the geometry resulting from the optimized solution, investment casting has been chosen as a more cost-effective manufacturing alternative to metal 3D printing.

The incorporation of 3D printing techniques for producing the casting patterns represents a significant advancement, as it facilitates the integration of generative design with rapid fabrication of functional parts.

## **2. Project Definition**

This project followed the workflow illustrated in Figura 2. The process began with the design of a basic crank arm geometry, which served as the starting point for topology optimization. After defining the material, applying loads and boundary conditions, and running a finite element analysis (FEA), a maximum allowable stress criterion was established to guide the iterative optimization process. The crank arm was then refined through successive iterations of topology optimization and structural simulation until an optimal and efficient model was obtained. This final design was further refined and validated through a final FEA to ensure its structural performance.

In parallel, and with manufacturing in mind, a feeding system was integrated into the design, and a custom lid was created to support the ceramic mold during the investment casting process.

To bring the optimized design into physical form, investment casting was chosen as the manufacturing method. The final model, including the gating system and mold base, was 3D printed using PLA. A ceramic mold was then created around the printed model and subjected to a controlled burnout cycle to eliminate the internal pattern. Finally,



molten aluminum was poured into the mold, and once cooled, the cast part was retrieved with the gating system still attached. These additional elements can be removed during post-processing to obtain the final geometry.

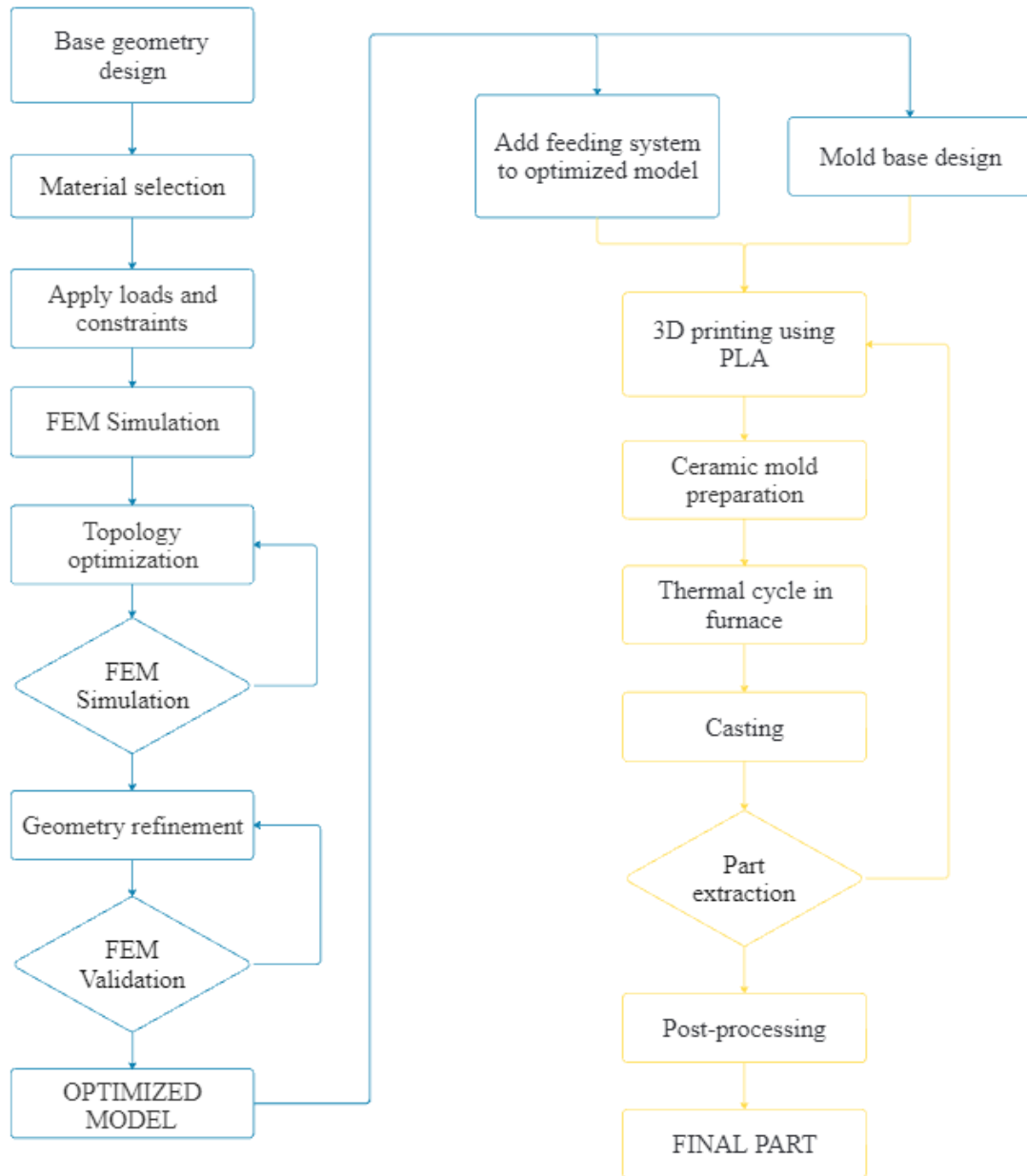


Figura 2: Workflow of the design and manufacturing process. Own source.

### 3. Description of the model/system/tools

The tools used throughout the project are as follows:

- Solid Edge: Used for the initial design, finite element simulations (FEM), and topology optimization.
- Altair Inspire: Employed for geometry refinement after optimization.
- Ultimaker Cura: Software used for slicing the 3D models prior to printing.

- Prusa I3KS-MK3S+ and HP Jet Fusion 580 C: These 3D printers were used to fabricate both functional prototypes and disposable casting patterns.

#### 4. Results

The final outcome of the topology optimization process was a crank arm design with a 41% reduction in mass compared to the original model. The project also includes the fabrication of the optimized geometry using both additive manufacturing and investment casting, allowing for a comparative assessment of both processes.



Ilustración 2: Comparison between original, optimized and cast crank arm. Own source.

#### 5. Conclusiones

The main conclusions drawn from this project are as follows:

- Topology optimization is an effective tool for reducing mass while maintaining structural integrity.
- Investment casting is a suitable and cost-efficient method for manufacturing metal parts with complex geometries generated through generative design, offering a more affordable alternative to metal 3D printing.
- The main limitations lie in the surface finish quality of the cast parts, particularly when no post-processing or machining is applied.

#### 6. References

1. Y. Ismail, G. Na, y B. Koo, «Topology and Response Surface Optimization of a Bicycle Crank Arm with Multiple Load Cases», *Appl. Sci.*, vol. 10, n.º 6, p. 2201, mar. 2020, doi: 10.3390/app10062201.
2. M. P. Bendsøe y O. Sigmund, *Topology optimization: theory, methods and applications*, Nouv. ed. révisée et augm. Berlin: Springer, 2003.
3. Groover, Mikell P., *Fundamentals of modern manufacturing : materials, processes, and systems*, 5th ed. 1939.

# Índice de la memoria

|                                                                               |           |
|-------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Capítulo 1. Introducción .....</b>                                         | <b>11</b> |
| 1.1 Motivación del proyecto.....                                              | 11        |
| 1.2 Objetivos del proyecto.....                                               | 11        |
| 1.3 Alineación con los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) .....         | 12        |
| <b>Capítulo 2. Estado del arte .....</b>                                      | <b>14</b> |
| 2.1 Diseño generativo.....                                                    | 14        |
| 2.1.1 Orígenes y evolución .....                                              | 14        |
| 2.1.2 Flujo de trabajo.....                                                   | 15        |
| 2.1.3 Casos de estudio relevantes.....                                        | 16        |
| 2.1.4 Software y herramientas de diseño generativo.....                       | 19        |
| 2.2 Optimización topológica .....                                             | 20        |
| 2.2.1 Fundamentos y formulación matemática .....                              | 20        |
| 2.2.2 Integración en software.....                                            | 22        |
| 2.3 Métodos de análisis por elementos finitos (FEM).....                      | 23        |
| 2.3.1 Fases del análisis por elementos finitos .....                          | 25        |
| 2.4 Fabricación aditiva .....                                                 | 28        |
| 2.4.1 Fundamentos .....                                                       | 28        |
| 2.4.2 Aplicaciones en diseño generativo .....                                 | 30        |
| 2.4.3 Ventajas y limitaciones.....                                            | 31        |
| 2.5 Fundición al modelo perdido.....                                          | 32        |
| 2.5.1 Orígenes y evolución .....                                              | 32        |
| 2.5.2 Fases del proceso .....                                                 | 33        |
| 2.5.3 Ventajas e inconvenientes.....                                          | 34        |
| <b>Capítulo 3. Metodología.....</b>                                           | <b>36</b> |
| 3.1 Geometría base .....                                                      | 37        |
| 3.2 Selección de materiales .....                                             | 38        |
| 3.3 Análisis de cargas según ángulo de pedaleo y condiciones de contorno..... | 40        |
| 3.4 Estudio de iteraciones de optimización topológica .....                   | 41        |
| 3.5 Criterios de impresión 3D .....                                           | 42        |
| 3.5.1 Formato .stl .....                                                      | 42        |
| 3.5.2 Software de laminado.....                                               | 43        |

|                                                                                                        |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.5.3 Parámetros generales de impresión FDM .....                                                      | 43        |
| 3.6 Criterios de diseño para fundición al modelo perdido.....                                          | 44        |
| <b>Capítulo 4. Desarrollo del trabajo.....</b>                                                         | <b>45</b> |
| 4.1 Modelado cad de la geometría inicial.....                                                          | 45        |
| 4.2 Definición de materiales.....                                                                      | 46        |
| 4.3 Definición de cargas y restricciones.....                                                          | 46        |
| 4.4 Simulación FEM del caso base.....                                                                  | 47        |
| 4.5 Optimización del modelo .....                                                                      | 49        |
| 4.5.1 Iteraciones con carga crítica.....                                                               | 49        |
| 4.5.2 Estudio de diseño generativo con reducción óptima de masa en función del ángulo de pedaleo ..... | 65        |
| 4.6 Refinado geométrico del modelo para la fabricación.....                                            | 66        |
| 4.7 Validación mediante FEM.....                                                                       | 68        |
| 4.8 Fabricación del prototipo.....                                                                     | 69        |
| 4.8.1 Fabricación aditiva .....                                                                        | 69        |
| 4.8.2 Fundición al modelo perdido .....                                                                | 79        |
| <b>Capítulo 5. Análisis de Resultados.....</b>                                                         | <b>86</b> |
| 5.1 Análisis de resultados y comparativa .....                                                         | 86        |
| 5.2 Estudio de viabilidad económica del proyecto.....                                                  | 88        |
| 5.2.1 Costes de prototipado.....                                                                       | 88        |
| 5.2.2 Costes de fabricación por impresión 3D metálica .....                                            | 91        |
| 5.2.3 Costes de fabricación por fundición al modelo perdido .....                                      | 91        |
| <b>Capítulo 6. Conclusiones y Trabajos Futuros.....</b>                                                | <b>94</b> |
| 6.1 Conclusiones del proyecto.....                                                                     | 94        |
| 6.2 Limitaciones encontradas .....                                                                     | 95        |
| 6.3 Propuestas para trabajos futuros.....                                                              | 95        |
| <b>Capítulo 7. Bibliografía.....</b>                                                                   | <b>97</b> |

## *Índice de figuras*

|                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1: Flujo de trabajo del proceso de diseño y fabricación. Fuente propia..... | 6  |
| Figura 2: Workflow of the design and manufacturing process. Own source. ....       | 9  |
| Figura 3: Proceso de diseño tradicional [5]. ....                                  | 15 |
| Figura 4: Proceso de diseño generativo [5]. ....                                   | 16 |
| Figura 5: Flujo de trabajo del proceso de diseño y fabricación. Fuente propia..... | 36 |
| Figura 6: Rampa de temperaturas. Fuente propia.....                                | 82 |

## *Índice de tablas*

|                                                                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1: Softwares diseño generativo. Fuente propia.....                                                         | 20 |
| Tabla 2: Software de optimización topológica. Fuente propia. ....                                                | 22 |
| Tabla 3: Distribución de cargas en función del ángulo de pedaleo [19]. ....                                      | 40 |
| Tabla 4: Parámetros generales de impresión FDM par PLA [20] y PolyCast [21]. ....                                | 44 |
| Tabla 5: Análisis de costes de impresión 3D de biela sin optimizar. Fuente propia. ....                          | 88 |
| Tabla 6: Análisis de costes de impresión 3D FDM de biela optimizada. Fuente propia. ...                          | 89 |
| Tabla 7: Análisis de costes de impresión 3D fusión en lecho de polvo de biela optimizada.<br>Fuente propia. .... | 90 |
| Tabla 8: Análisis de costes de impresión 3D en PLA de modelo desechable de biela. Fuente<br>propia. ....         | 92 |
| Tabla 9: Análisis de costes de impresión 3D en PLA de base del molde. Fuente propia. ..                          | 93 |
| Tabla 10: Análisis de costes de fundición al modelo perdido de la biela optimizada. Fuente<br>propia. ....       | 93 |

## *Índice de ilustraciones*

|                                                                                            |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Ilustración 1: Comparativa biela original, optimizada y fundida. Fuente propia. ....       | 7  |
| Ilustración 2: Comparison between original, optimized and cast crank arm. Own source. .... | 10 |
| Ilustración 3: Implante craneofacial personalizado de Materialise [6]. ....                | 17 |
| Ilustración 4: Heydar Aliyev Centre, Zaha Hadid Architects [7]. ....                       | 17 |
| Ilustración 5: Vestido colección "Eathrise", ....                                          | 18 |
| Ilustración 6: Synflux Algorithmic Couture $\beta$ [9]. ....                               | 18 |
| Ilustración 7: Soporte de asiento de General Motors [10]. ....                             | 18 |
| Ilustración 8: conectores generativos ROCKRIDER BABEL [11]. ....                           | 19 |
| Ilustración 9: Proceso de optimización topológica de una pieza [13]. ....                  | 22 |
| Ilustración 10: Elementos y nodos. Fuente propia. ....                                     | 23 |
| Ilustración 11: método algebraico [15]. ....                                               | 28 |
| Ilustración 12: EDPs [15]. ....                                                            | 28 |
| Ilustración 13: Superposición de retícula y ajuste de contorno [15]. ....                  | 28 |
| Ilustración 14: Triangulación de Delaunai [15]. ....                                       | 28 |
| Ilustración 15: Frente de avance [15]. ....                                                | 28 |
| Ilustración 16: Proceso de fundición al modelo perdido [17]. ....                          | 34 |
| Ilustración 17: Planta de la geometría base. Fuente propia. ....                           | 37 |
| Ilustración 18: Sección del alzado de la geometría base. Fuente propia. ....               | 37 |
| Ilustración 19: Tabla propiedades Aluminio 6061-T6 [18]. ....                              | 39 |
| Ilustración 20: Esquema de pedaleo [19]. ....                                              | 40 |
| Ilustración 21: Exportación a formato .stl. Fuente propia. ....                            | 42 |
| Ilustración 22: Biela base. Fuente propia. ....                                            | 45 |
| Ilustración 23: Vistas de la biela base. Fuente propia. ....                               | 45 |
| Ilustración 24: Asignación de material "Aluminio, 30361-T6". Fuente propia ....            | 46 |
| Ilustración 25: Asignación de carga crítica de 2750 N. Fuente propia. ....                 | 47 |
| Ilustración 26: Aplicación de restricción fija. Fuente propia. ....                        | 47 |
| Ilustración 27: Mallado de la pieza base. Fuente propia. ....                              | 48 |
| Ilustración 28: Simulación 2750 N a 90° del caso base. Fuente propia. ....                 | 48 |

|                                                                                 |    |
|---------------------------------------------------------------------------------|----|
| Ilustración 29: Preservación de regiones. Fuente propia. ....                   | 49 |
| Ilustración 30: Reducción 10% masa con calidad 50. Fuente propia. ....          | 50 |
| Ilustración 31: Optimización topológica reducción 10% masa. Fuente propia. .... | 50 |
| Ilustración 32: Simulación reducción 10% de masa. Fuente propia. ....           | 50 |
| Ilustración 33: Reducción 20% masa con calidad 50. Fuente propia. ....          | 51 |
| Ilustración 34: Optimización topológica reducción 20% masa. Fuente propia. .... | 51 |
| Ilustración 35: Simulación reducción 20% de masa. Fuente propia. ....           | 51 |
| Ilustración 36: Reducción 30% masa con calidad 50. Fuente propia. ....          | 52 |
| Ilustración 37: Optimización topológica reducción 30% masa. Fuente propia. .... | 52 |
| Ilustración 38: Simulación reducción 30% de masa. Fuente propia. ....           | 52 |
| Ilustración 39: Reducción 40% masa con calidad 50. Fuente propia. ....          | 53 |
| Ilustración 40: Optimización topológica reducción 40% masa. Fuente propia. .... | 53 |
| Ilustración 41: Simulación reducción 40% de masa. Fuente propia. ....           | 53 |
| Ilustración 42: Reducción 50% masa con calidad 50. Fuente propia. ....          | 54 |
| Ilustración 43: Optimización topológica reducción 50% masa. Fuente propia. .... | 54 |
| Ilustración 44: Simulación reducción 50% de masa. Fuente propia. ....           | 54 |
| Ilustración 45: Reducción 49% masa con calidad 50. Fuente propia. ....          | 55 |
| Ilustración 46: Optimización topológica reducción 49% masa. Fuente propia. .... | 55 |
| Ilustración 47: Simulación reducción 49% de masa. Fuente propia. ....           | 55 |
| Ilustración 48: Reducción 48% masa con calidad 50. Fuente propia. ....          | 56 |
| Ilustración 49: Optimización topológica reducción 48% masa. Fuente propia. .... | 56 |
| Ilustración 50: Simulación reducción 48% de masa. Fuente propia. ....           | 56 |
| Ilustración 51: Reducción 47% masa con calidad 50. Fuente propia. ....          | 57 |
| Ilustración 52: Optimización topológica reducción 47% masa. Fuente propia. .... | 57 |
| Ilustración 53: Simulación reducción 47% de masa. Fuente propia. ....           | 57 |
| Ilustración 54: Reducción 46% masa con calidad 50. Fuente propia. ....          | 58 |
| Ilustración 55: Optimización topológica reducción 46% masa. Fuente propia. .... | 58 |
| Ilustración 56: Simulación reducción 46% de masa. Fuente propia. ....           | 58 |
| Ilustración 57: Reducción 45% masa con calidad 50. ....                         | 59 |
| Ilustración 58: Optimización topológica reducción 45% masa. Fuente propia. .... | 59 |
| Ilustración 59: Simulación reducción 45% de masa. Fuente propia. ....           | 59 |



|                                                                                                                                      |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Ilustración 60: Reducción 44% masa con calidad 50. Fuente propia. ....                                                               | 60        |
| Ilustración 61: Optimización topológica reducción 44% masa. Fuente propia. ....                                                      | 60        |
| Ilustración 62: Simulación reducción 44% de masa. Fuente propia. ....                                                                | 60        |
| Ilustración 63: Reducción 43% masa con calidad 50. Fuente propia. ....                                                               | 61        |
| Ilustración 64: Optimización topológica reducción 43% masa. Fuente propia. ....                                                      | 61        |
| Ilustración 65: Simulación reducción 43% de masa. Fuente propia. ....                                                                | 61        |
| <i>Ilustración 66: Reducción 42% masa con calidad 50. Fuente propia. ....</i>                                                        | <i>62</i> |
| Ilustración 67: Optimización topológica reducción 42% masa. Fuente propia. ....                                                      | 62        |
| Ilustración 68: Simulación reducción 42% de masa. Fuente propia. ....                                                                | 62        |
| <i>Ilustración 69: Reducción 41% masa con calidad 50. Fuente propia. ....</i>                                                        | <i>63</i> |
| Ilustración 70: Optimización topológica reducción 41% masa. Fuente propia. ....                                                      | 63        |
| Ilustración 71: Simulación reducción 41% de masa. Fuente propia. ....                                                                | 63        |
| Ilustración 72: Planta superior de la pieza optimizada. Fuente propia. ....                                                          | 64        |
| Ilustración 73: Alzado de la pieza optimizada. Fuente propia. ....                                                                   | 64        |
| Ilustración 74: Planta inferior de la pieza optimizada. Fuente propia. ....                                                          | 64        |
| Ilustración 75: Variación del diseño generativo con una reducción del 41% de la masa según el ángulo de pedaleo. Fuente propia. .... | 65        |
| Ilustración 76: Herramienta Ajustar de Altair Inspire. Fuente propia. ....                                                           | 66        |
| Ilustración 77: Herramienta Booleano-Combinar de Altair Inspire. Fuente propia. ....                                                 | 67        |
| Ilustración 78: Geometría tras aplicar herramienta de Ajustar. Fuente propia. ....                                                   | 67        |
| Ilustración 79: Geometría refinada final. Fuente propia. ....                                                                        | 67        |
| Ilustración 80: Validación FEM. Fuente propia. ....                                                                                  | 68        |
| Ilustración 81: Vista inferior validación FEM y vista ampliada de zona de máxima tensión. Fuente propia. ....                        | 68        |
| Ilustración 82: Orientación pieza en Cura. Fuente propia. ....                                                                       | 69        |
| Ilustración 83: Ajustes impresión prototipo sin optimizar. Fuente propia. ....                                                       | 70        |
| Ilustración 84: Simulación de impresión 3D del prototipo sin optimizar. Fuente propia. ..                                            | 70        |
| Ilustración 85: Resultado impresión 3D biela sin optimizar. Fuente propia. ....                                                      | 71        |
| Ilustración 86: Simulación de impresión 3D en PLA del prototipo optimizado. Fuente propia. ....                                      | 71        |

|                                                                                                          |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Ilustración 87: Resultado impresión 3D en PLA de biela optimizada topológicamente. Fuente propia. ....   | 72 |
| Ilustración 88: Pieza dentro de zona de impresión Autodesk Netfab. Fuente propia. ....                   | 72 |
| Ilustración 89: Resultado impresión 3D en polvo de biela optimizada topológicamente. Fuente propia. .... | 73 |
| Ilustración 90: Orientación de modelo desechable. Fuente propia. ....                                    | 73 |
| Ilustración 91: Ajustes impresión modelo desechable en PLA. Fuente propia. ....                          | 74 |
| Ilustración 92: Ajustes impresión modelo desechable en Moldlay. Fuente propia. ....                      | 75 |
| Ilustración 93: Impresión 3D en PLA del modelo desechable. Fuente propia. ....                           | 75 |
| Ilustración 94: Impresión 3D en Moldlay del modelo desechable. Fuente propia. ....                       | 76 |
| Ilustración 95: Resultado impresión 3D del modelo desechable en PLA. Fuente propia. ..                   | 76 |
| Ilustración 96: Resultado impresión 3D del modelo desechable en Moldlay. Fuente propia. ....             | 77 |
| Ilustración 97: Ajustes impresión tapa del molde. Fuente propia. ....                                    | 78 |
| Ilustración 98: Impresión 3D de la base. Fuente propia. ....                                             | 78 |
| Ilustración 99: Resultado impresión 3D de la base del molde. Fuente propia. ....                         | 79 |
| Ilustración 100: Jaula forrada de cinta. Fuente propia. ....                                             | 80 |
| Ilustración 101: cantidades de polvo y agua para revestimiento cerámico ARGENTUM investment [22]. ....   | 80 |
| Ilustración 102: Vertido de revestimiento cerámico. Fuente propia. ....                                  | 81 |
| Ilustración 103: Molde cerámico en el horno. Fuente propia. ....                                         | 81 |
| Ilustración 104: Molde cerámico tras rampa de temperatura. Fuente propia. ....                           | 82 |
| Ilustración 105: Colada. Fuente propia. ....                                                             | 83 |
| Ilustración 106: Enfriamiento de la colada. Fuente propia. ....                                          | 83 |
| Ilustración 107: Enfriamiento visto desde cámara térmica. Fuente propia. ....                            | 84 |
| Ilustración 108: Eliminación de molde cerámico. Fuente propia. ....                                      | 84 |
| Ilustración 109: Pieza obtenida por fundición al modelo perdido. Fuente propia. ....                     | 85 |
| Ilustración 110: Comparativa biela original, optimizada y fundida. Fuente propia. ....                   | 86 |
| Ilustración 111: Detalle de precisión de la fundición. Fuente propia. ....                               | 87 |
| Ilustración 112: Detalle de rugosidad y falta de llenado. Fuente propia. ....                            | 87 |

|                                                                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Ilustración 113: Estimación de coste de impresión 3D metálica de biela optimizada y refinada. Fuente propia..... | 91 |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

## *Índice de acrónimos*

FEM: Método de elementos finitos.

ODS: Objetivos de Desarrollo Sostenible.

CAD: Diseño Asistido por Ordenador.

PLA: Ácido Poliláctico.

FDM: Modelado por Deposición Fundida.

SLA: Estereolitografía.

DLP: Procesado por luz digital.

SLS: Sinterizado Selectivo por Láser.

SLM: Selective Laser Melting.

DMLS: Direct Material Laser Sintering.

BJ: Binder Jetting.

STL: Standard Tessellation Language.

# Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

## ***1.1 MOTIVACIÓN DEL PROYECTO***

A lo largo de las últimas décadas, el compromiso de la sociedad con el medioambiente ha experimentado un crecimiento exponencial. La elección de productos y servicios respetuosos con el medioambiente ha pasado de ser concebido como una tendencia a una necesidad. Teniendo esto en cuenta, no es de extrañar que uno de los sectores más contaminantes del momento, el sector transporte, se encuentre en búsqueda de alternativas menos dañinas para el medioambiente. Una de las elecciones más populares de medio de transporte sostenible es la bicicleta.

El auge del uso de la bicicleta viene acompañado de necesidades de los usuarios, siendo una de las demandas más recurrentes la reducción del peso de ésta. Una posible solución a este problema es la optimización topológica de sus componentes.

El uso de optimización topológica conlleva la utilización de métodos de fabricación aptos para geometrías complejas características del diseño generativo. El método de fabricación más habitual hasta el momento es la impresión 3D metálica, sin embargo, el coste y los tiempos de fabricación son muy elevados.

Este proyecto pretende encontrar un método de fabricación más efectivo y propone el uso de la fundición al modelo perdido como alternativa más económica a la impresión 3D metálica.

## ***1.2 OBJETIVOS DEL PROYECTO***

El objetivo principal del proyecto es la obtención de un modelo de pedal-biela de una bicicleta más ligero y eficiente pero que cumpla con las condiciones de carga necesarias para su correcto funcionamiento, asegurando durante todo el proceso que el proyecto cumpla con

los ODS. Para lograr este objetivo global, deben llevarse a cabo los siguientes objetivos específicos:

- Diseño inicial de un modelo base pedal-biela sin optimizar, e identificación de sus características principales: geometría, material, cargas y restricciones.
- Optimización topológica del modelo y validación por Métodos de Elementos Finitos (FEM).
- Refinado de la geometría obtenida mediante diseño generativo.
- Elaboración del molde por fabricación aditiva.
- Fabricación del modelo por fundición al modelo perdido.
- Análisis comparativo entre fundición al modelo perdido e impresión 3D metálica.

El cumplimiento de estos objetivos permitirá la obtención de un diseño que maximice la eficiencia estructural de la pieza y al mismo tiempo minimice los costes asociados a la fabricación de esta.

### ***1.3 ALINEACIÓN CON LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE (ODS)***

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible [1] fueron adoptados por las Naciones Unidas en 2015 con el propósito de abordar problemáticas de alta importancia como la pobreza, las desigualdades y el cambio climático. Con meta marcada en el año 2030, se espera alcanzar el equilibrio entre la satisfacción de las necesidades humanas y un desarrollo económico de manera sostenible. Este plan global cuenta con 17 objetivos, de los cuales destacan los siguientes con relación al proyecto de fin de grado realizado:



#### **Objetivo 9: INDUSTRIA, INFRAESTRUCTURA INNOVACIÓN E INFRAESTRUCTURA**

Este proyecto incorpora metodologías de diseño innovadoras, como el diseño generativo, el cual contribuye a una mejora de la eficiencia en el proceso de diseño y fabricación.



### Objetivo 12: PRODUCCIÓN Y CONSUMO RESPONSABLES

La optimización topológica permite obtener modelos de productos con menor peso que los originales y que ofrecen las mismas prestaciones. Para ello se eliminan las áreas innecesarias del modelo, y, por consiguiente, se utilizan de manera más eficiente los materiales y se reduce la generación de residuos.



### Objetivo 13: ACCIÓN POR EL CLIMA

El diseño generativo implica una menor extracción de materias primas y generación de desechos. De esta forma, contribuye a la minimización de la huella de carbono correspondiente al proceso y fabricación de productos.

## Capítulo 2. ESTADO DEL ARTE

### 2.1 *DISEÑO GENERATIVO*

#### 2.1.1 ORÍGENES Y EVOLUCIÓN

El diseño generativo es un método de diseño asistido por ordenador que tiene como finalidad la obtención de geometrías más eficientes adaptadas a un conjunto concreto de restricciones de diseño impuestas. Estas restricciones son parámetros específicos del modelo como el tipo de material empleado, las cargas aplicadas, el espacio disponible o las condiciones de contorno.

Los orígenes teóricos del diseño generativo se remontan a principios del siglo XIX. En 1864 James Clerk Maxwell creó el teorema del trabajo recíproco [2], en el que se establecía condiciones de equilibrio en estructuras reticuladas. Posteriormente, se continuó el desarrollo del teorema con la publicación del artículo “The Limits of Economy of Material in Frame Structures” [3] en 1904 en el que Anthony George Maldon Michell presentó una formulación para la creación de estructuras óptimas que pudieran resistir una carga con el mínimo material posible. Estas estructuras se denominan estructuras de Michell y se caracterizan por distribuir de forma óptima el material siguiendo las trayectorias de los esfuerzos internos.

A pesar de los avances teóricos realizados, hasta mediados del siglo XX no se llevó a la práctica implementándose un enfoque computacional. En el año 1988 Martin P. Bendsøe y Noboru Kikuchi concibieron la optimización topológica como un problema continuo de distribución de material dentro de un dominio estructural. Con la aplicación del método de elementos finitos, crearon un modelo en el que la densidad del material en cada punto del dominio pasaba a ser una variable de diseño binaria, siendo su valor 0 para puntos vacíos y 1 para puntos llenos de material. Aquellos puntos en los que la densidad tenía valor nulo, se consideraban zonas innecesarias estructuralmente, por lo que podían ser eliminadas de forma matemática para obtener una geometría más eficiente [4].



A partir de la década de 2010, el avance del desarrollo de software CAD/CAE permitió la integración del diseño generativo en la industria. Además, en los últimos años, se ha comenzado a incorporar inteligencia artificial y modelos generativos que son capaces de explorar y predecir configuraciones óptimas utilizando bases de datos.

### 2.1.2 FLUJO DE TRABAJO

En el enfoque tradicional, el desarrollo de la pieza está basado en la experiencia del diseñador. Se parte de una idea general y se crea una solución inicial basada en dicha idea, utilizando las referencias disponibles y su experiencia previa. En esta primera etapa se elabora un modelo CAD provisional y se realiza un análisis para verificar su comportamiento. Si la solución no cumple con los requisitos, el diseñador crea una nueva solución manualmente, basada en la solución anterior y se vuelve a simular. Este proceso iterativo manual se repite hasta obtener un modelo válido.

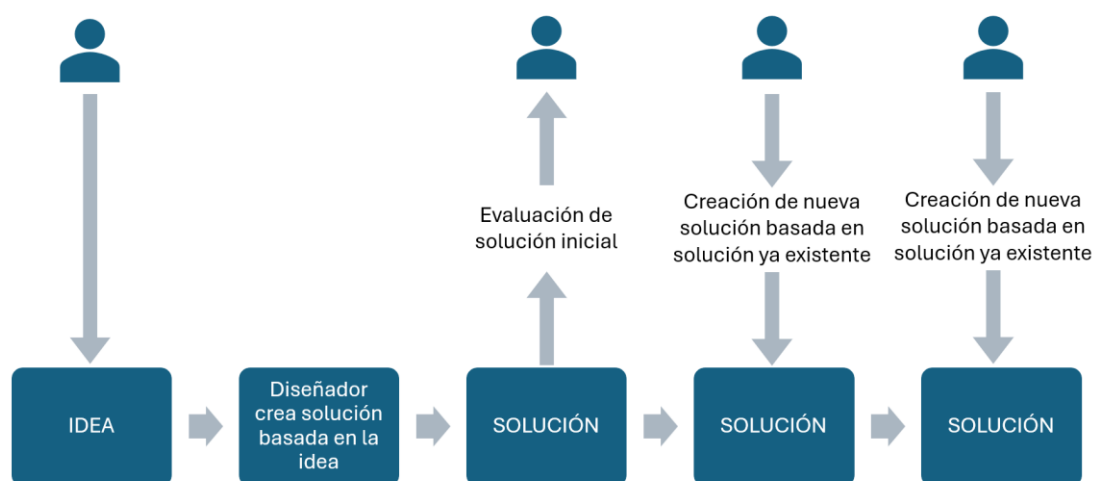


Figura 3: Proceso de diseño tradicional [5].

A diferencia de los métodos de diseño tradicionales, basados en iteraciones manuales y en la intuición del diseñador, el diseño generativo proporciona una amplia gama de soluciones optimizadas, con formas no convencionales e innovadoras. Esto se consigue a través de algoritmos iterativos, que generan soluciones estructurales más eficientes.

En el diseño generativo, se parte de una idea general y el diseñador establece una serie de parámetros específicos como cargas, materiales, restricciones o condiciones de contorno. El software de diseño utiliza algoritmos de optimización y genera múltiples geometrías que cumplen con los requisitos. Finalmente, el diseñador valida la solución creada por el programa logrando un modelo óptimo.

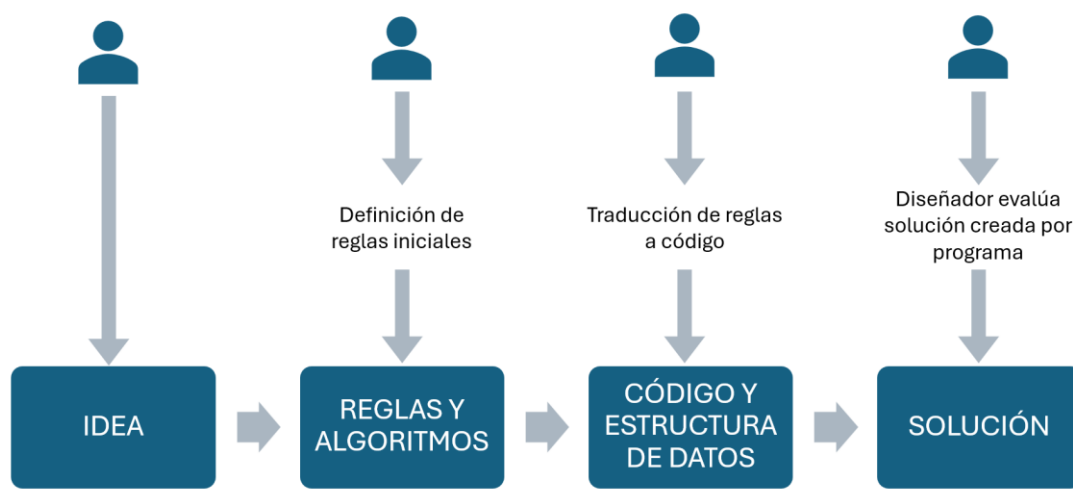


Figura 4: Proceso de diseño generativo [5].

El diseño generativo ofrece importantes ventajas respecto a los métodos de diseño tradicional. La exploración de soluciones se convierte en un proceso automático mediante el cual se identifican configuraciones óptimas que minimizan el uso del material sin comprometer la resistencia estructural. Esto permite una reducción de peso de las piezas y de los costes de producción además de un incremento de su eficiencia.

### 2.1.3 CASOS DE ESTUDIO RELEVANTES

El diseño generativo es una herramienta con gran versatilidad, y por ello es cada vez mayor la cantidad de sectores en los que se ha implementado su uso. A continuación, se muestran algunos casos de uso de diseño generativo en diferentes ámbitos:

- Medicina. En el sector médico, el diseño generativo es una herramienta que permite la creación de implantes óseos personalizado, así como prótesis más ligeras. Se personalizan realizando un escaneo 3D del paciente y se optimizan para asegurar

la correcta adaptación anatómica y la reducción de su peso, mientras se permite el crecimiento óseo utilizando estructuras porosas internas. Un ejemplo de esta aplicación de diseño generativo son las prótesis creadas por la empresa Materialise.

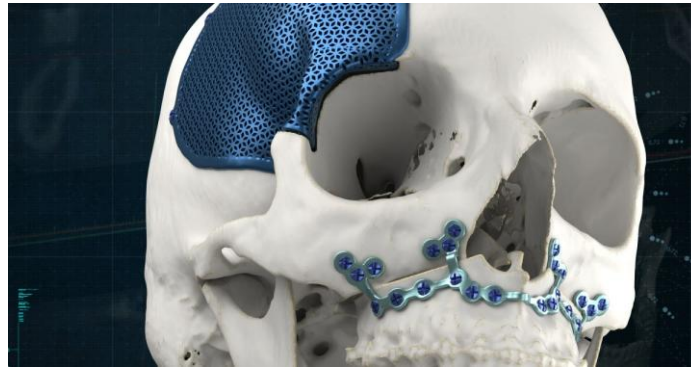


Ilustración 3: Implante craneofacial personalizado de Materialise [6].

- **Arquitectura.** Uno de los antecedentes del diseño generativo computacional es la Sagrada Familia de Antoni Gaudí, cuyo enfoque natural imitaba la lógica estructural de material mínimo. Un ejemplo más actual de diseño generativo en la arquitectura es el Heydar Aliyev Center (Baku, 2012) diseñado por Zaha Hadid Architects. El diseño generativo tuvo un papel fundamental en la definición de la compleja forma que caracteriza al edificio.



Ilustración 4: Heydar Aliyev Centre, Zaha Hadid Architects [7].

- Moda. El diseño generativo ha supuesto un avance en las técnicas de diseño de moda, siendo capaz de crear estructuras complejas que respondan al movimiento, la anatomía y al comportamiento del material. En la alta costura, Iris van Herpen se ha posicionado como líder en el uso de diseño generativo y modelado algorítmico. Además, empresas como Synflux llevan a cabo proyectos como Algorithmic Couture que tienen como objetivo la reducción de residuos textiles generando prendas basadas en escaneos corporales.



Ilustración 5: Vestido colección "Eathrise",  
Iris Van Herpen [8].

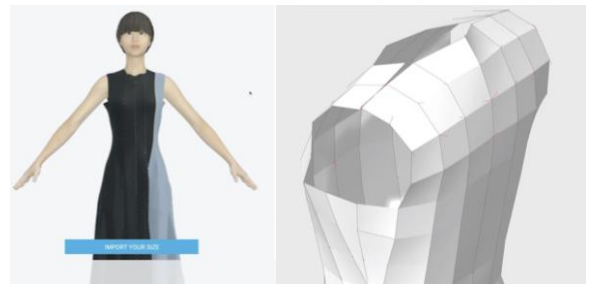


Ilustración 6: Synflux Algorithmic Couture β [9].

- Industria. En el sector industrial destaca el proyecto llevado a cabo por General Motors en colaboración con Autodesk, en el que se ha rediseñado un soporte de asiento utilizando diseño generativo logrando la reducción de su peso en un 40% y la mejora de la resistencia estructural.



Ilustración 7: Soporte de asiento de General Motors [10].

- Deporte y movilidad. Un proyecto reciente en el ámbito del deporte es el de ROCKRIDER BABEL de Mathieu Petot. En este proyecto se han diseñado “lugs” generativos para conectar los tubos de bicicletas estándar optimizados. El objetivo del proyecto es promover un ciclo de vida sostenible del producto.

WITH ALL OUR COMPONENTS IN HAND, WE CAN ASSEMBLE THE FRAME BY BONDING IT WITH STRUCTURAL EPOXY ADHESIVE ADEKIT H9952.

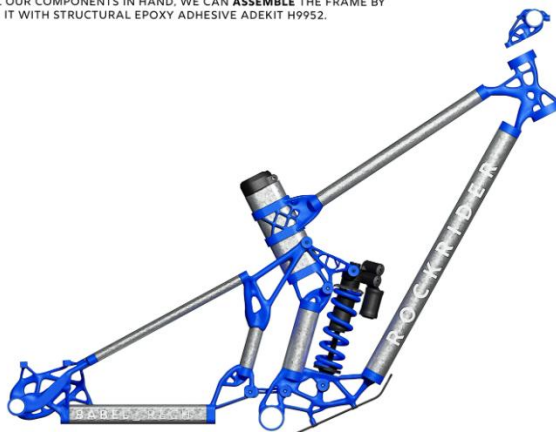


Ilustración 8: conectores generativos ROCKRIDER BABEL [11].

#### 2.1.4 SOFTWARE Y HERRAMIENTAS DE DISEÑO GENERATIVO

El diseño generativo se ha consolidado como metodología accesible y se ha integrado en la industria con el desarrollo de software especializado con módulos específicos dedicados a esto. Estos programas incluyen algoritmos de optimización estructural con modelado 3D y simulaciones de modelos por métodos de elementos finitos (FEM), y permiten evaluar soluciones estructurales para distintas situaciones de cargas y restricciones.

Los entornos de diseño generativo más relevantes en la industria son los siguientes:

| <i>Software</i>                   | <i>Sectores</i>                              | <i>Precio estimado anual</i> |
|-----------------------------------|----------------------------------------------|------------------------------|
| <i>ANSYS Mechanical Discovery</i> | <i>Aeroespacial, automoción, biomecánica</i> | <i>6.900 €</i>               |

|                                         |                                      |                |
|-----------------------------------------|--------------------------------------|----------------|
| <i>Siemens NX</i>                       | <i>Aeroespacial, automoción</i>      | <i>6.200 €</i> |
| <i>Altair Inspire</i>                   | <i>Automoción, aeroespacial</i>      | <i>2.300 €</i> |
| <i>Autodesk Fusion 360</i>              | <i>Industria, diseño de producto</i> | <i>500 €</i>   |
| <i>SolidWorks<br/>3DExperience</i>      | <i>Industria, producto</i>           | <i>5.400 €</i> |
| <i>Solid Edge<br/>Generative Design</i> | <i>Ingeniería mecánica</i>           | <i>2.700€</i>  |
| <i>Rhino + Grasshopper</i>              | <i>Arquitectura, moda, arte</i>      | <i>1000 €</i>  |

Tabla 1: Softwares diseño generativo. Fuente propia.

## 2.2 OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA

### 2.2.1 FUNDAMENTOS Y FORMULACIÓN MATEMÁTICA

La optimización topológica es la rama del diseño generativo dedicada a la reducción de la masa de un modelo. Esta técnica de análisis estructural permite encontrar la mejor distribución posible de material dentro de un volumen determinado y maximizar el rendimiento mecánico para condiciones de contorno específicas.

El planteamiento de este método fue ideado por Bendsøe y Kikuchi en 1988 en su artículo “Generating Optimal Topologies in Structural Design Using a Homogenization Method” [4], en el que introdujeron el concepto de densidad de material como una variable continua de diseño. Esto permitía una representación de zonas llenas de material y zonas vacías en un entorno discretizado utilizando el método de elementos finitos (FEM). La variable densidad toma el valor 0 si el elemento finito está vacío y el valor 1 si se encuentra lleno de material. De esta forma, aquellos elementos que se encuentran vacíos se pueden eliminar matemáticamente para reducir la masa.

La formulación más habitual del problema de optimización es de minimización del cumplimiento estructural. La deformación al aplicar las cargas es menor cuanto menor es el cumplimiento. La expresión del problema es la siguiente:

$$\text{Minimizar: } C(\rho) = f^T * u$$

$$\text{Siendo: } K(\rho) * u = f$$

$$0 \leq \rho \leq 1 \quad \forall x \in \Omega$$

$$\int_{\Omega} \rho(x) * d\Omega \leq V^*$$

Donde:

- $\rho(x)$  es la densidad relativa del material en el punto  $x$ .
- $K(\rho)$  es la matriz de rigidez.
- $F$  es el vector de cargas aplicadas.
- $u$  es el vector de desplazamientos nodales.
- $V^*$  es el volumen máximo disponible.

Posteriormente, en el año 2003 Bendsøe y Sigmund desarrollaron el modelo SIMP (Solid Isotropic Material with Penalization) [12]. Este modelo introduce un parámetro de penalización sobre el módulo de elasticidad efectivo de cada elemento, evitando soluciones con densidades intermedias.

$$E(\rho) = \rho^p * E_0$$

Donde:

- $E_0$  es el módulo de elasticidad del material.
- $p$  es el coeficiente de penalización.

La introducción de una penalización fuerza al algoritmo a aproximar la variable  $\rho$  a una variable binaria mediante la eliminación del material no estructural.

El resultado obtenido de la optimización topológica es un modelo estructural de mayor eficiencia desde el punto de vista de la resistencia mecánica y más ligero.

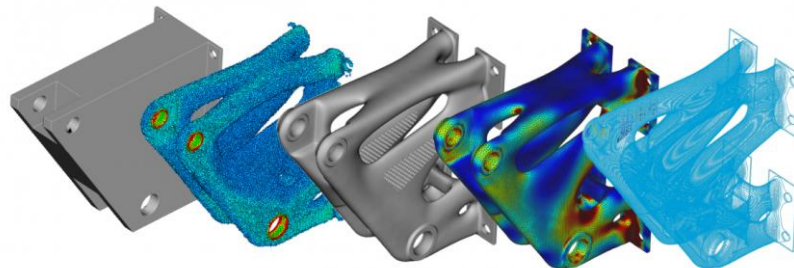


Ilustración 9: Proceso de optimización topológica de una pieza [13].

### 2.2.2 INTEGRACIÓN EN SOFTWARE

El avance en la tecnología de optimización topológica ha sido acompañado de una adopción de dicha técnica en entornos de diseño CAD. Actualmente numerosos programas de diseño cuentan con módulos específicos de optimización topológica. En estos módulos se permite la definición de múltiples variables para tener en cuenta en el diseño como las cargas y restricciones, el material o las regiones a conservar.

En la siguiente tabla se muestran las plataformas de diseño más relevantes que incorporan el módulo de optimización topológica:

| <i>Software</i>            | <i>Algoritmo</i>                       |
|----------------------------|----------------------------------------|
| <i>Solid Edge</i>          | <i>SIMP</i>                            |
| <i>Altair Inspire</i>      | <i>SIMP y evolución bi-direccional</i> |
| <i>ANSYS Workbench</i>     | <i>SIMP y métodos híbridos</i>         |
| <i>Autodesk Fusion 360</i> | <i>SIMP</i>                            |

Tabla 2: Software de optimización topológica. Fuente propia.



## 2.3 MÉTODOS DE ANÁLISIS POR ELEMENTOS FINITOS (FEM)

El método de elementos finitos (FEM) es una herramienta de numérica utilizada en ingeniería para la resolución de estructuras complejas. En este método, se parte de una estructura compleja y se divide en estructuras más simples, conocidas como elementos finitos, que se unen entre sí mediante nodos. Esta discretización permite transformar sistemas continuos, con infinitos grados de libertad y descritos por ecuaciones diferenciales, en sistemas discretos con un número finito de variables manejables mediante métodos matriciales.

En el análisis por elementos finitos, las incógnitas fundamentales son los desplazamientos de los nodos, los cuales determinan la deformación de la estructura bajo cargas externas. El comportamiento del sistema se evalúa estudiando el estado mecánico de cada elemento individual que lo compone. De esta forma, se puede obtener una estimación precisa del comportamiento de un modelo bajo unas condiciones de carga y contorno concretas.

El proceso de generación de una geometría a partir de elementos y nodos se denomina mallado. A continuación, se muestra una pieza mallada en Solid Edge. Se puede observar que la geometría se ha dividido en elementos triangulares unidos entre sí por nodos.

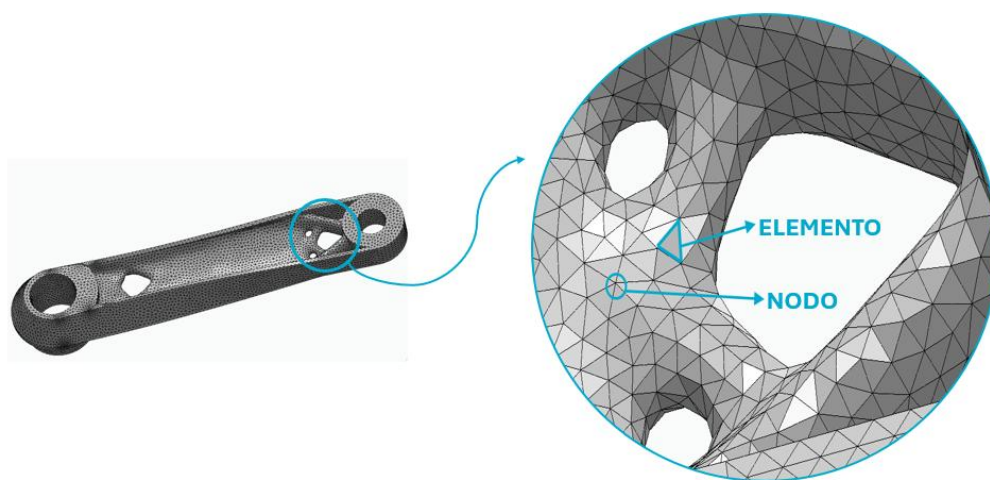


Ilustración 10: Elementos y nodos. Fuente propia.

Tras la resolución de la geometría mallada, los valores de desplazamiento de los nodos por los que se ha conformado el sistema pasan a ser conocidos. A partir de los valores de desplazamientos, se pueden determinar otras variables de interés como fuerzas, pares o tensiones.

El método de elementos finitos es una técnica de aproximación numérica. Para poder reducir la complejidad del problema continuo y transformarlo en uno discreto que pueda solucionarse, se basa en unas hipótesis fundamentales [14]. Estas hipótesis son las siguientes:

- Hipótesis de discretización. Para la discretización del dominio continuo se realiza una división de este en elementos finitos mediante un proceso de mallado. Cada elemento finito es una región geométrica que se conecta mediante nodos.
- Hipótesis de campo de desplazamientos. En cada elemento finito se aproximan los desplazamientos mediante funciones de interpolación. Se asume que el desplazamiento de cada punto del modelo depende lineal o polinómicamente de los desplazamientos en el nodo que lo define.
- Hipótesis de compatibilidad. La solución debe ser geoméricamente compatible, sin existir discontinuidades de desplazamientos entre elementos finitos adyacentes y encajando los elementos en los nodos comunes.
- Hipótesis de comportamiento del material. Los materiales se consideran lineales, elásticos e isótropos. Es decir, la relación entre las tensiones y las deformaciones del modelo sigue leyes constitutivas.
- Hipótesis de equilibrio. El sistema se encuentra en equilibrio mecánico bajo las cargas externas aplicadas.
- Hipótesis de pequeñas deformaciones. Las deformaciones y desplazamientos se consideran lo suficientemente pequeños como para aplicar formulaciones lineales.
- Hipótesis de solución aproximada. La solución obtenida mediante el método de elementos finitos es una aproximación. La precisión de dicha aproximación depende del tamaño y tipo de elementos, de la calidad del mallado y de las funciones de interpolación utilizadas.

### **2.3.1 FASES DEL ANÁLISIS POR ELEMENTOS FINITOS**

El proceso de análisis por elementos finitos implica una secuencia ordenada de fases a seguir para lograr resultados válidos.

#### ***2.3.1.1 Preparación de la geometría***

El primer paso en el análisis por elementos finitos es realizar una simplificación del modelo, es decir, se eliminan los elementos innecesarios que no afecten de manera significativa al comportamiento estructural. Estos elementos suelen ser logos, redondeos o chaflanes decorativos o patrones.

Además, en algunos casos es beneficioso realizar una limpieza del modelo. Esta limpieza consiste en eliminar aquellos problemas que puedan dificultar el proceso de mallado, tales como bordes irregulares, discontinuidades o superposiciones en la superficie, o sólidos solapados entre sí. La eliminación de este tipo de problemas facilita la buena calidad del estudio y la obtención de resultados precisos de desplazamientos o tensiones internas de la pieza.

#### ***2.3.1.2 Definición de parámetros***

La fase siguiente es la definición de los parámetros del problema. Estos parámetros son la geometría, el material, las cargas y las restricciones.

#### ***2.3.1.3 Mallado del dominio***

Esta etapa consiste en la división del modelo en formas geométricas, denominadas elementos finitos, mediante una malla. Para garantizar la precisión de los resultados, se debe utilizar una malla óptima para el problema, teniendo en cuenta factores como el número de elementos finitos en los que se divide o la geometría de dichos elementos.

##### **2.3.1.3.1 Tamaño de mallado**

El tamaño de mallado es un factor fundamental para tener en cuenta en el análisis por elementos finitos. Según el tamaño de mallado utilizado se obtiene mejor o peor calidad y precisión de resultados.

El uso de un mallado grueso implica un menor número de elementos finitos. Esto se traduce en un cálculo más rápido y sencillo. Sin embargo, un mallado demasiado grueso conlleva una pérdida de precisión, especialmente en zonas donde el campo de tensiones tiene variaciones súbitas o existen discontinuidades geométricas.

El uso de un mallado fino mejora la calidad del modelo, ya que se logra capturar las concentraciones de los esfuerzos con mayor detalle. A pesar de la mejora de calidad, un mallado demasiado fino implica un aumento significativo de grados de libertad y del tiempo de simulación, disminuyendo la eficiencia del proceso.

Para conseguir un mallado óptimo, se debe encontrar el equilibrio entre calidad y tiempo de simulación.

#### **2.3.1.3.2 Geometría de mallado**

La geometría de mallado es otro factor clave en la calidad de los resultados obtenidos. La elección de la malla utilizada depende de la complejidad de la pieza y del tipo de análisis que se vaya a realizar. Según el tipo de geometría empleada en el mallado de la superficie, el tiempo de computación del análisis varía y el ajuste al modelo estudiado es de mayor o menor precisión.

Las mallas se pueden clasificar en dos tipos: mallas estructuradas y no estructuradas [14]:

- Las mallas estructuradas son aquellas en las que los elementos y nodos se disponen de forma regular y ordenada. La conectividad entre los nodos en este tipo de malla es predecible, lo cual permite la optimización numérica. Este tipo de mallas es ideal para geometrías simples.
- A diferencia de las mallas estructuradas, las no estructuradas tienen sus elementos y nodos dispuestos sin seguir un patrón regular. Generalmente se emplean triángulos para geometría en 2D o tetraedros para 3D. Este tipo de mallas se adapta a geometrías complejas, permitiendo un refinamiento localizado. A pesar de sus ventajas, el coste de almacenamiento y procesamiento de los datos es superior que el correspondiente

a las mallas estructuradas, y los algoritmos de generación y análisis que requieren son más complejos.

Existen distintos métodos de generación de malla que se pueden utilizar para discretizar geometrías continuas en elementos geométricos más pequeños. Los métodos de generación de mallas más relevantes son:

- **Método algebraico.** Este método utiliza interpolaciones matemáticas entre las curvas o regiones límite de la geometría para generar la malla. El método algebraico se puede dividir en dos técnicas: mapping e interpolación transfinita. La primera consiste en transformar un dominio físico complejo en uno computacional regular. Un ejemplo sería el paso de una región curva a un cuadrado o cubo. Después se genera la malla en dicho dominio regular y se remapea al dominio físico. La segunda técnica es la interpolación física, que consiste en interpolar nodos en el interior del dominio usando las curvas y superficies de los bordes.
- **Métodos basados en EDPs (Ecuaciones de Derivadas Parciales).** En estos métodos se utilizan ecuaciones de derivadas parciales para definir la distribución de los nodos. Se utiliza como condiciones de contorno el borde del dominio que se malla. Según la ecuación diferencial elegida, la calidad de la malla varía. La ecuación de Laplace proporciona mallas uniformes y la ecuación de Poisson mallas de densidad variable.
- **Método de Superposición de Retícula y Ajuste de Contorno.** Este método se superpone una retícula estructurada rectangular sobre la geometría física real del dominio. Posteriormente se ajustan los nodos y elementos de la malla que intersecan el contorno del modelo. Así, la malla se adapta a la frontera real de la geometría.
- **Método de Delaunay.** Se basa en la triangulación de Delaunay, que busca la distribución óptima de triángulos.
- **Método de frente de avance.** En este caso, la malla se genera de manera progresiva desde la frontera hacia el interior. Según se insertan los elementos, el frente de nodos activos avanza hasta llenar el dominio.

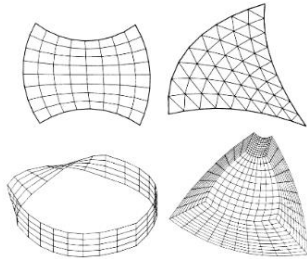


Ilustración 11: método algebraico [15].

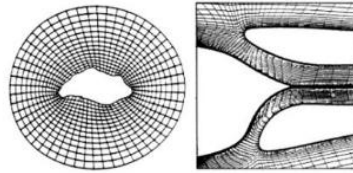


Ilustración 12: EDPs [15].

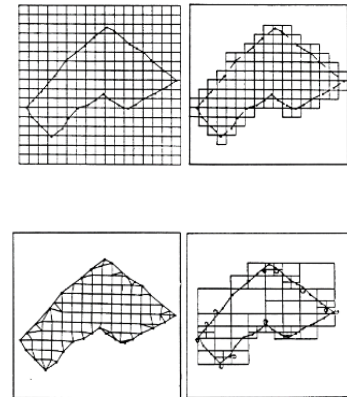


Ilustración 13: Superposición de retícula y ajuste de contorno [15].

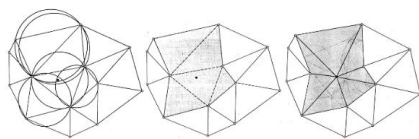


Ilustración 14: Triangulación de Delaunai [15].



Ilustración 15: Frente de avance [15].

## 2.4 FABRICACIÓN ADITIVA

### 2.4.1 FUNDAMENTOS

La fabricación aditiva, popularmente conocida como impresión 3D, engloba aquellas tecnologías de producción capaces de crear objetos en tres dimensiones mediante adición controlada de capas de un material, partiendo de un modelo digitalizado.

Este método de fabricación permite fabricar piezas desde cero sin necesidad de utilizar moldes ni utillaje, a diferencia de los métodos de fabricación convencionales. Por ello, es útil para las primeras etapas de diseño del producto y para la validación de este. También es especialmente útil en aplicaciones que requieren personalización, en producción de series

cortas o en geometrías muy complejas, como es el caso de piezas obtenidas mediante diseño generativo.

La fabricación aditiva consiste en fragmentar un modelo CAD en capas horizontales, mediante el proceso de “slicing” o “laminado” y depositar el material capa a capa. El proceso se rige por las instrucciones del software de laminación mediante el cual se convierte el modelo 3D en un conjunto de trayectorias de movimiento que se transmiten a la impresora.

Existen numerosas técnicas de fabricación aditiva según el tipo de material o el mecanismo de solidificación utilizado. Las tecnologías de fabricación clasificadas según el material se dividen en: tecnologías basadas en polímeros, tecnologías basadas en metales y tecnologías para modelos desechables.

### **Tecnologías basadas en polímeros**

Este conjunto incluye procesos en los que se utiliza materiales termoplásticos o resinas fotosensibles para la impresión 3D. Son las tecnologías más accesibles, ya que permiten la fabricación de piezas con un coste bajo, buena resolución y sin necesidad de postprocesado de alta complejidad. Las tecnologías basadas en polímeros son las siguientes:

- FDM (Fused Deposition Modeling). Tal y como indica su nombre, la FDM es una tecnología de fabricación aditiva en la que se calienta un filamento termoplástico (como PLA o ABS) hasta su punto de fusión y se expulsa por extrusión a través de una boquilla. Generalmente se utiliza para la fabricación de prototipos o modelos de validación.
- SLA/DLP (Esterlitografía / Procesado por luz digital). Esta tecnología de impresión 3D se basa en la solidificación de una resina líquida fotosensible mediante un láser o proyector. Es utilizada para la fabricación de componentes que requieren una alta precisión.
- SLS (Selective Laser Sintering). La tecnología SLS permite fabricar piezas sin estructuras de soporte a través del sinterizado de polvo de polímero mediante un láser. Es ideal para la fabricación de piezas que presentan una geometría interna compleja.

### **Tecnologías basadas en metales**

Este grupo emplea polvos metálicos finos que se funden o sinterizan mediante un láser o aglutinante. El uso de estas tecnologías permite la obtención de modelos funcionales de gran resistencia mecánica. Sin embargo, el coste es elevado y se requiere el uso de equipos especializados. Las principales tecnologías basadas en metales son:

- SLM/DMLS (Selective Laser Melting / Direct Material Laser Sintering). Esta tecnología proporciona piezas metálicas funcionales metálicas mediante la fusión completa o sinterizado de polvo metálico con láser.
- BJ (Binder Jetting). Es una tecnología que imprime un aglutinante sobre polvo metálico. Posteriormente, se sinteriza térmicamente en un horno para densificar la pieza.

### **Tecnologías para modelos desechables**

Las tecnologías de fabricación aditiva, además de utilizarse para obtener un modelo final son útiles para la obtención de modelos desechables utilizados en procesos de fabricación por fundición.

En la fabricación de modelos desechables se utilizan tecnologías convencionales como impresoras FDM o SLA, pero con materiales específicos. Estos materiales deben estar formulados para eliminarse por completo a lo largo de un ciclo térmico. Los materiales más habituales son filamentos como Moldlay o Polycast y resinas calcinables, aunque también se puede utilizar PLA.

## **2.4.2 APLICACIONES EN DISEÑO GENERATIVO**

Para la fabricación de piezas creadas mediante diseño generativo, la fabricación aditiva ha sido una herramienta clave. Las geometrías generadas por los algoritmos de optimización topológica y diseño generativo generalmente son de alta complejidad e imposibles de fabricar utilizando métodos tradicionales. Sin embargo, mediante el uso de la impresión 3D para la fabricación de piezas generadas por diseño generativo se consigue:



- Fabricar prototipos de los diseños optimizados. Esto permite evaluar las dimensiones reales del diseño y comprobar su compatibilidad con otras piezas del conjunto.
- Validar físicamente, y no únicamente mediante simulaciones, las piezas obtenidas por diseño generativo sin simplificar. Permite realizar ensayos de carga y validar regiones críticas con galgas extensiométricas.
- Obtener modelos patrón en materiales aptos para procesos de fundición como es el caso de fundición al modelo perdido. Gracias al uso de la fabricación aditiva se elimina la necesidad de utilizar moldes mecanizados.

### **2.4.3 VENTAJAS Y LIMITACIONES**

La fabricación aditiva ha revolucionado la industria tal y como se conocía hasta el momento. Este método de fabricación ha introducido un nuevo enfoque respecto a la forma en la que se diseñan y fabrican las piezas. Las ventajas más relevantes que proporciona son:

- Fabricación de piezas con una geometría compleja. Permite la fabricación de piezas complejas imposibles de fabricar por métodos tradicionales.
- Fabricación sin utillaje. No es necesario el uso de moldes ni herramientas específicas más allá de la impresora 3D.
- Bajo coste para fabricación de prototipos. Permite la validación y ajuste de diseños de una forma rápida.
- Personalización de los modelos sin coste significativo. Uno de los usos más destacados es la fabricación de implantes personalizados en el ámbito de la medicina.
- Optimización del uso de material. Se reduce el uso de material innecesario al ser innecesario el mecanizado posterior en la gran mayoría de los casos.

A pesar de las ventajas que presenta la fabricación aditiva, también tiene limitaciones que se deben tener en cuenta. Las limitaciones principales de la fabricación aditiva son:

- Limitación de tamaño. El tamaño de fabricación está limitado al volumen de la impresora. La fabricación de piezas de gran tamaño mediante impresión 3D a

menudo no es una opción y se tiene que recurrir a impresión por partes y ensamblaje posterior.

- Velocidad de impresión baja. Es un proceso lento en comparación con métodos de fabricación convencionales.
- Elevado coste de tecnologías de impresión metálica.
- Propiedades mecánicas anisotrópicas. En muchos procesos de impresión 3D la fabricación de las piezas se realiza capa a capa, generándose zonas de unión entre capas. Estas zonas de unión no tienen la misma resistencia que el interior continuo del material, ya que depende de la adhesión entre las capas.
- Acabado superficial rugoso. Muchas de las tecnologías de fabricación aditiva proporcionan piezas que necesitan un pulido posterior para cumplir con los estándares funcionales y estéticos establecidos.
- Necesidad de soportes. Algunas de las impresoras necesitan generar estructuras de soporte para poder imprimir ciertas geometrías. El uso de soportes aumenta el tiempo de fabricación y suele involucrar un lijado posterior para eliminar posibles marcas.

## **2.5 FUNDICIÓN AL MODELO PERDIDO**

### **2.5.1 ORÍGENES Y EVOLUCIÓN**

La fundición al modelo perdido es un método de fabricación para la obtención de piezas metálicas utilizando un molde cerámico creado alrededor de un modelo desechable, generalmente de cera o material polimérico. Una vez obtenido el molde, se elimina el modelo aplicando calor, el cual deja una cavidad con la forma del modelo en la que se vierte el metal fundido para obtener la pieza metálica.

Este proceso es una de las técnicas de fabricación de mayor tradición histórica, remontándose a varias civilizaciones antiguas. Los primeros registros arqueológicos del uso de esta técnica son joyas y figuras decorativas provenientes de Mesopotamia, el Antiguo Egipto y China, y que datan alrededor del tercer milenio antes de Cristo.

Durante la Edad Media, el proceso evolucionó, especialmente en Europa, siendo utilizado para la fabricación de campanas o esculturas en bronce. El uso de este método a gran escala se consolidó en el siglo XIX con la nueva necesidad de producir piezas metálicas de alta precisión. La aparición de nuevos materiales cerámicos, de la cera sintética y de nuevas aleaciones metálicas supuso la expansión de este proceso a sectores industriales como la automoción, la aeronáutica y la medicina, en los cuales la precisión es un factor clave.

En la actualidad, los avances tecnológicos han supuesto un aumento del uso del proceso de fabricación por fundición al modelo perdido. La creación de piezas por diseño asistido por ordenador (CAD) y la fabricación aditiva de los modelos, han hecho posible el aumento de la precisión del proceso, a la vez que lograr una reducción de costes y tiempos de producción.

### **2.5.2 FASES DEL PROCESO**

Las etapas del proceso de fabricación por fundición al modelo perdido en la industria se han estandarizado [16] y son las siguientes:

1. Diseño de la pieza por diseño asistido por ordenador (CAD).
2. Fabricación del modelo. El modelo debe evaporarse al someterse a altas temperaturas, por lo que se suele fabricar en cera o en materiales moldeables con punto de fusión no demasiado elevado. Actualmente, la fabricación del modelo se suele realizar por impresión 3D, aunque siguen utilizándose otros métodos como el moldeo por inyección o el mecanizado. En el modelo se debe incluir bebederos y respiraderos.
3. Ensamblaje en árbol. Generalmente, se fabrican varias piezas simultáneamente. Por ello, para poder conseguir múltiples piezas en una sola colada, se ensamblan en un árbol o racimo.
4. Recubrimiento cerámico. Se le aplica un recubrimiento cerámico al árbol, que se solidifica, dando lugar a un molde cerámico que resiste las altas temperaturas.
5. Eliminación del modelo. Mediante un calentamiento controlado en un horno, se derrite el modelo de cera, que deja una cavidad en el molde con la forma de la pieza diseñada.

6. Cocción del molde. Con el objetivo de aumentar la resistencia mecánica y térmica del molde cerámico, se cuece a altas temperaturas para que pueda soportar la colada.
7. Colada. Es la fase de vertido del metal fundido en el interior del molde cerámico.
8. Enfriamiento del molde. Después del vertido, se deja reposar hasta que solidifique. El tiempo de solidificación depende del material, de la geometría y del tamaño de la pieza.
9. Desmoldado. Tras finalizar el tiempo de enfriamiento, se procede a la extracción de la pieza. Para extraerla, se destruye el molde desechable.
10. Acabado final. Es el último paso del proceso, en el cual se eliminan los canales de alimentación y evaporación, se limpia y pule la pieza y se deja lista para los posibles procesos posteriores de mecanizado o tratamientos térmicos.

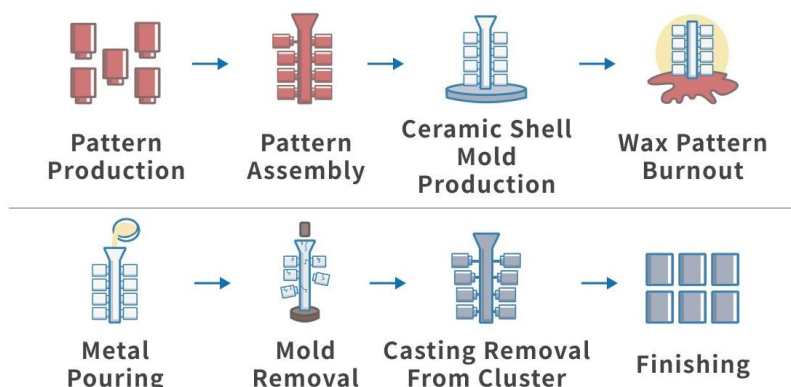


Ilustración 16: Proceso de fundición al modelo perdido [17].

### 2.5.3 VENTAJAS E INCONVENIENTES

Las ventajas que brinda la fundición al modelo perdido son las siguientes:

- Posibilidad de obtención de geometrías muy complejas sin necesidad de mecanizado posterior.
- Alta precisión dimensional.
- Excelente acabado superficial.
- Desperdicios de material mínimos.
- Compatible con diseños creados por diseño generativo.

A pesar de existir muchas ventajas, también tiene inconvenientes como:

- Limitaciones para piezas de gran tamaño o de sección gruesa.
- Proceso relativamente lento.
- Coste elevado, aunque menor que la impresión 3D metálica.

## Capítulo 3. METODOLOGÍA

El flujo de trabajo que se sigue a lo largo del proyecto es el mostrado a continuación.

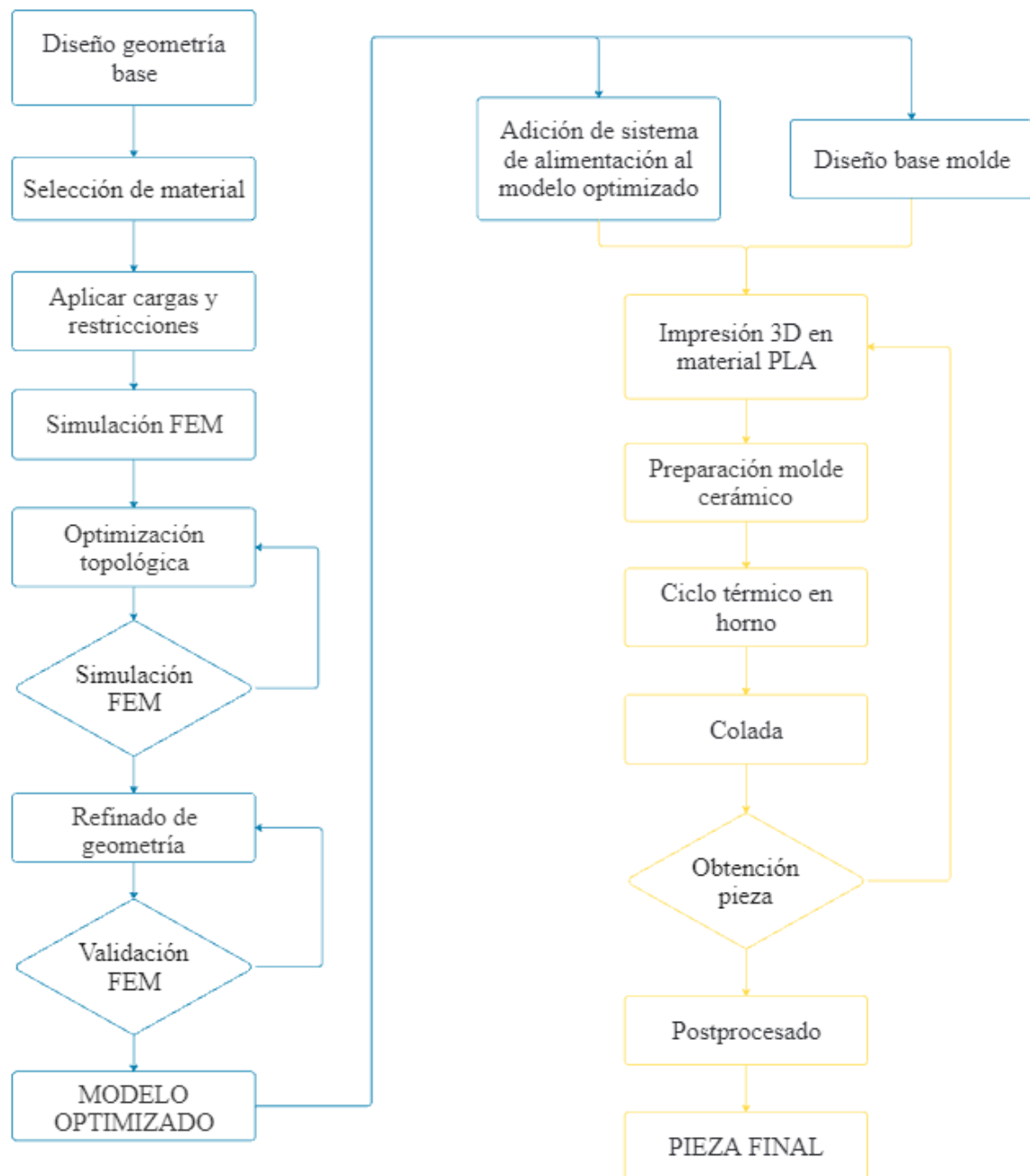


Figura 5: Flujo de trabajo del proceso de diseño y fabricación. Fuente propia.

### 3.1 GEOMETRÍA BASE

Para la elaboración del modelo inicial del que se parte para realizar la optimización topológica, se ha recopilado información sobre las dimensiones estándar de las bielas disponibles en el mercado. A continuación, se ha diseñado el modelo mostrado a continuación, utilizando medidas características de este tipo de pieza.

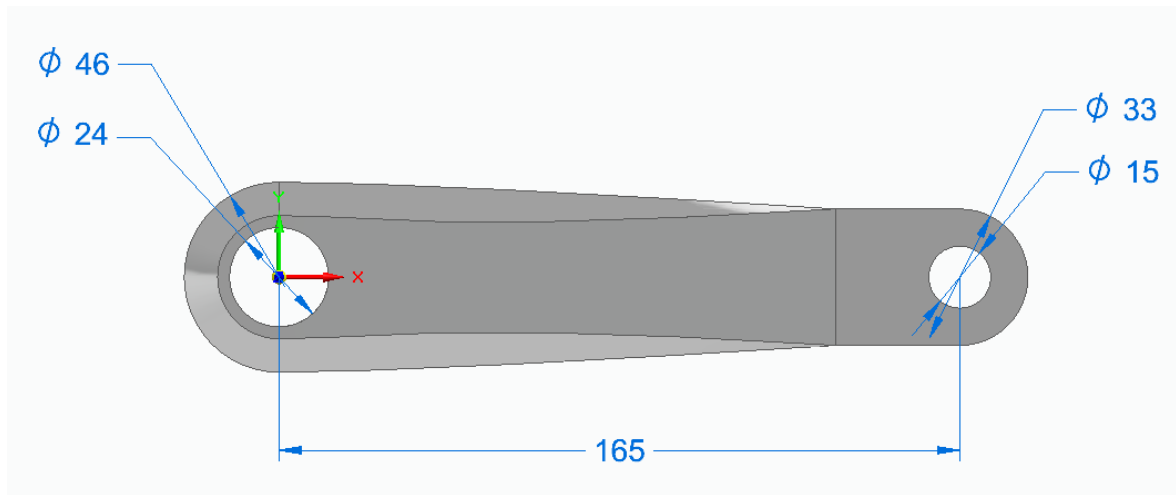


Ilustración 17: Planta de la geometría base. Fuente propia.



Ilustración 18: Sección del alzado de la geometría base. Fuente propia.

### 3.2 SELECCIÓN DE MATERIALES

Las bielas de las bicicletas pueden fabricarse de distintos materiales, dependiendo del tipo de bicicleta, la calidad y el uso al que estén destinadas.

A continuación, se valoran los criterios a tener en cuenta en la selección de material para la biela:

- Resistencia mecánica y rigidez. El material debe ser capaz de soportar los esfuerzos generados por el pedaleo.
- Resistencia a fatiga. Es imprescindible que el material resista a fatiga, debido a que las cargas a las que se somete a las bielas son cíclicas.
- Resistencia a corrosión. Las bicicletas son utilizadas en el exterior, y por lo tanto se debe cumplir la resistencia a la corrosión, especialmente si se utilizan en ambientes húmedos.
- Peso. La minimización del peso de la bicicleta es el objetivo principal del proyecto, y la razón principal por la que se utiliza la optimización topológica, por lo tanto, es esencial que el peso del material no sea elevado.
- Adecuado para método de fabricación seleccionado. El material seleccionado debe ser apto para utilizarse en fabricación por fundición al modelo perdido.
- Coste y disponibilidad. A pesar de buscar el mejor rendimiento posible, el coste es uno de los factores más importantes a tener en cuenta en la elaboración del producto. Además, se debe tener en cuenta la disponibilidad del material elegido.
- Estética. Las bielas de bicicletas son elementos expuestos a la vista, siendo importante que el material que se seleccione permita buenos acabados superficiales, buenos pulidos y pintados de cierta calidad.

Los materiales más habituales para la fabricación de bielas de bicicletas son el aluminio, la fibra de carbono, el acero y el titanio. Siguiendo los criterios mencionados anteriormente, el material que mejor se ajusta a los requisitos impuestos es el aluminio. Por ello, para la elaboración del proyecto, se ha elegido el Aluminio 6061-T6.



| Physical Properties                                                                                   | Metric                                     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|
| Density                                                                                               | 2.70 g/cc                                  |
| Mechanical Properties                                                                                 | Metric                                     |
| Hardness, Brinell                                                                                     | 95                                         |
| Hardness, Knoop                                                                                       | 120                                        |
| Hardness, Rockwell A                                                                                  | 40                                         |
| Hardness, Rockwell B                                                                                  | 60                                         |
| Hardness, Vickers                                                                                     | 107                                        |
| Tensile Strength, Ultimate                                                                            | 310 MPa                                    |
| Tensile Strength, Yield                                                                               | 276 MPa                                    |
| Elongation at Break  | 17 %<br>@Temperature -28.0 °C              |
| Modulus of Elasticity                                                                                 | 68.9 GPa                                   |
| Notched Tensile Strength                                                                              | 324 MPa                                    |
| Ultimate Bearing Strength                                                                             | 607 MPa                                    |
| Bearing Yield Strength                                                                                | 386 MPa                                    |
| Poissons Ratio                                                                                        | 0.33                                       |
| Fatigue Strength                                                                                      | 96.5 MPa<br>@# of Cycles 5.00e+8           |
| Fracture Toughness                                                                                    | 29.0 MPa-m <sup>1/2</sup>                  |
| Machinability                                                                                         | 50 %                                       |
| Shear Modulus                                                                                         | 26.0 GPa                                   |
| Shear Strength                                                                                        | 207 MPa                                    |
| Electrical Properties                                                                                 | Metric                                     |
| Electrical Resistivity                                                                                | 0.00000399 ohm-cm<br>@Temperature 20.0 °C  |
| Thermal Properties                                                                                    | Metric                                     |
| CTE, linear        | 23.6 µm/m-°C<br>@Temperature 20.0 - 100 °C |
|                                                                                                       | 25.2 µm/m-°C<br>@Temperature 20.0 - 300 °C |
| Specific Heat Capacity                                                                                | 0.896 J/g-°C                               |
| Thermal Conductivity                                                                                  | 167 W/m-K                                  |
| Melting Point                                                                                         | 582 - 651.7 °C                             |
| Solidus                                                                                               | 582 °C                                     |
| Liquidus                                                                                              | 651.7 °C                                   |
| Processing Properties                                                                                 | Metric                                     |
| Solution Temperature                                                                                  | 529 °C                                     |
| Aging Temperature                                                                                     | 160 °C                                     |
|                                                                                                       | 177 °C                                     |
| Component Elements Properties                                                                         | Metric                                     |
| Aluminum, Al                                                                                          | 95.8 - 98.6 %                              |
| Chromium, Cr                                                                                          | 0.04 - 0.35 %                              |
| Copper, Cu                                                                                            | 0.15 - 0.40 %                              |
| Iron, Fe                                                                                              | <= 0.70 %                                  |
| Magnesium, Mg                                                                                         | 0.80 - 1.2 %                               |
| Manganese, Mn                                                                                         | <= 0.15 %                                  |
| Other, each                                                                                           | <= 0.05 %                                  |
| Other, total                                                                                          | <= 0.15 %                                  |
| Silicon, Si                                                                                           | 0.40 - 0.80 %                              |
| Titanium, Ti                                                                                          | <= 0.15 %                                  |
| Zinc, Zn                                                                                              | <= 0.25 %                                  |

Ilustración 19: Tabla propiedades Aluminio 6061-T6 [18]

### 3.3 ANÁLISIS DE CARGAS SEGÚN ÁNGULO DE PEDALEO Y CONDICIONES DE CONTORNO

Para llevar a cabo la optimización topológica se debe llevar a cabo un estudio de las cargas que actúan sobre la biela y establecer unas condiciones de contorno.

La carga aplicada cambia a lo largo del recorrido de pedaleo, ya que la fuerza ejercida por el ciclista sobre el pedal varía en función del ángulo de pedaleo. En este proyecto se han utilizado los siguientes datos obtenidos de forma experimental.

| Ángulo de la biela | 30°  | 45°  | 60°  | 90°  | 120° | 135° | 150° |
|--------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| Fuerza [N]         | 1300 | 1625 | 2250 | 2750 | 2250 | 2125 | 1900 |

Tabla 3: Distribución de cargas en función del ángulo de pedaleo [19].

Utilizando la 2ª Ley de Newton, ecuación de equilibrio de momentos, al analizar el conjunto de la cadena y del pedal-biela, se obtiene:

$$M_{cadena} = M_{pedal}$$

También se puede escribir la ecuación de equilibrio en función de las fuerzas del pedal y la cadena:

$$F_{cadena} * R_{cadena} = F_{pedal} * L_{biela} * \cos \theta_{biela}$$

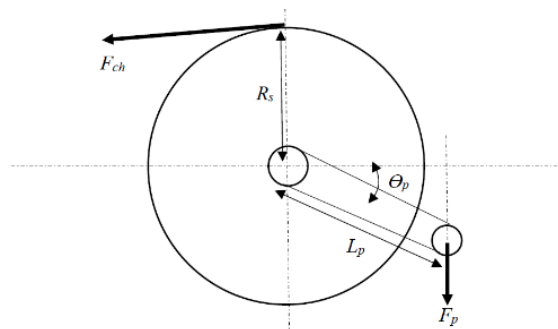


Ilustración 20: Esquema de pedaleo [19].

Para llevar a cabo la optimización topológica, se elige la carga que transmite mayor par a la biela, y consiguientemente a la cadena. En este caso, la carga que provoca el par más elevado en la biela es la fuerza aplicada a 90° de 2750 N. Por ello, se considera esta condición de carga como caso límite.

Con el objetivo de simular de la forma más realista el movimiento que realiza la biela, se considera que el agujero de unión de la biela con el pedalier se encuentra fijo, es decir, no se pueden producir desplazamientos en ninguno de los ejes.

### **3.4 ESTUDIO DE ITERACIONES DE OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA**

La optimización topológica de la biela se ha realizado mediante un algoritmo iterativo, en el que se redistribuye el material y se eliminan las zonas cuya contribución a la resistencia estructural no es necesaria, mientras se mantienen las regiones necesarias para el funcionamiento de la pieza.

Para garantizar la integridad de la estructura se establece un coeficiente de seguridad de 1,5, debido a que la biela es una pieza que se somete a esfuerzos cíclicos. En este proyecto, se ha seleccionado el aluminio 6061-T6, el cual tiene un límite elástico  $\sigma_e = 276 \text{ MPa}$  [18]. Con el material y el coeficiente de seguridad seleccionados, se obtiene la máxima tensión admisible que puede soportar la pieza de una forma segura.

$$n = \frac{\sigma_e}{\sigma_{adm}} \rightarrow \sigma_{adm} = \frac{276 \text{ MPa}}{1,5} = 184 \text{ MPa}$$

El proceso de obtención del modelo óptimo se realiza comenzando con una reducción inicial de masa de un 10%, y realizando iteraciones con incrementos porcentuales del 10% hasta llegar a un valor superior a la máxima tensión admisible. Desde ese punto, se realizan decrementos del 1% hasta lograr el óptimo.

### 3.5 CRITERIOS DE IMPRESIÓN 3D

La impresión 3D se debe realizar siguiendo unos criterios concretos en función del uso final de los modelos. En este proyecto se han realizado las siguientes impresiones:

- Prototipo de biela inicial.
- Prototipo de biela optimizada y refinada.
- Modelo desechable con canales de alimentación.
- Base del molde.

#### 3.5.1 FORMATO .STL

Para poder llevar a cabo la impresión 3D es necesario pasar la pieza obtenida en Solid Edge a formato “.stl”. Para obtener un archivo con un mallado óptimo se deben especificar unas tolerancias concretas. Las tolerancias aplicadas son: tolerancia de cuerda de 0.01 y tolerancia angular de 3°. Además, se debe establecer las unidades en las que se exporta el archivo. En este caso se ha exportado en milímetros.

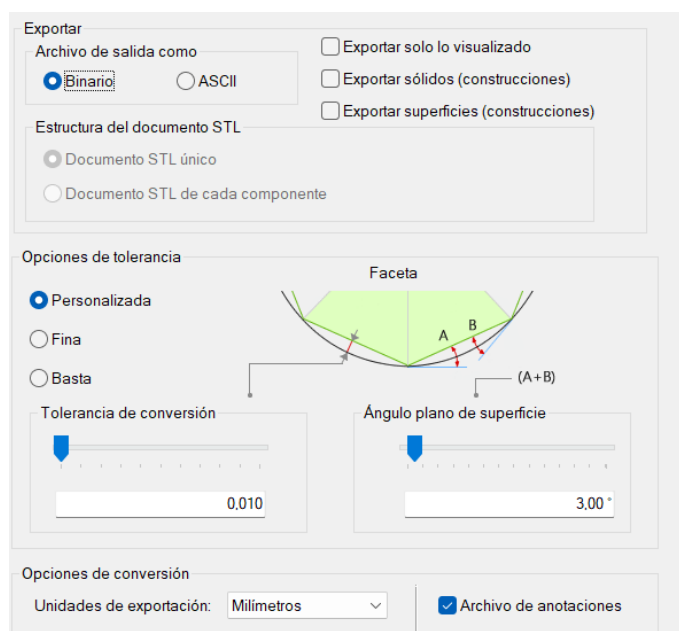


Ilustración 21: Exportación a formato .stl. Fuente propia.

### 3.5.2 SOFTWARE DE LAMINADO

El software de laminado, llamado slicer, es una herramienta fundamental en la fabricación aditiva. La función del slicer es convertir en instrucciones de impresión el modelo 3D. estas instrucciones se transmiten a la impresora para realizar los movimientos necesarios siguiendo los requisitos establecidos en las opciones de impresión. Para realizar el laminado de la pieza se ha utilizado el software Ultimaker Cura, ideal para impresión en FDM.

Las funciones principales del software son:

- Laminado del modelo. Divide el modelo en capas horizontales de una altura determinada.
- Control de parámetros de impresión. Permite la configuración de variables como temperatura, velocidad o tipo de relleno.
- Generación de trayectorias. Calcula el recorrido de la boquilla en cada capa.
- Generación de soportes. Permite la generación automática o manual de los soportes necesarios para la fabricación de la pieza.
- Vista previa. Muestra una simulación de cómo sería la impresión capa a capa para los parámetros definidos.

### 3.5.3 PARÁMETROS GENERALES DE IMPRESIÓN FDM

Los parámetros de impresión dependen del material utilizado. En este caso, se ha utilizado PLA para los prototipos, la base del molde y el primer modelo desechable, y PolyCast para el segundo modelo desechable.

| <i>Parámetro</i>                | <i>PLA</i>   | <i>POLYCAST</i>    |
|---------------------------------|--------------|--------------------|
| <i>Altura de capa</i>           | <i>0,2</i>   | <i>0,2</i>         |
| <i>Temperatura de extrusión</i> | <i>210°C</i> | <i>200°C-230°C</i> |
| <i>Temperatura de cama</i>      | <i>60°C</i>  | <i>30°C-70°C</i>   |

|                               |                                                              |                        |
|-------------------------------|--------------------------------------------------------------|------------------------|
| <i>Velocidad de impresión</i> | <i>40 mm/s-60 mm/s</i>                                       | <i>40 mm/s-90 mm/s</i> |
| <i>Infill</i>                 | <i>Prototipos: 20%</i><br><br><i>Modelo desechable: 100%</i> |                        |
| <i>Soportes</i>               | <i>Activado</i>                                              |                        |

Tabla 4: Parámetros generales de impresión FDM par PLA [20] y PolyCast [21].

### 3.6 CRITERIOS DE DISEÑO PARA FUNDICIÓN AL MODELO PERDIDO

La fabricación de piezas metálicas creadas mediante diseño generativo requiere el uso de métodos de fabricación aptos para geometrías complejas, como la fabricación aditiva o la fundición al modelo perdido. En el caso de este proyecto, se ha elegido la fabricación por fundición al modelo perdido.

Para garantizar la obtención del modelo deseado al utilizar el método de fundición al modelo perdido, se debe tener en cuenta los siguientes criterios de diseño:

- Grosor mínimo de la pieza. Para evitar deformaciones y falta de material se establece un mínimo de grosor de la pieza entre 2 y 5 milímetros.
- Bebederos y respiraderos. Se debe prever zonas en las que se pueda colocar un sistema de alimentación y otro de evacuación de gases. Estos sistemas son imprescindibles, ya que son los encargados de asegurar el llenado total del molde y de evitar defectos como porosidades.
- Redondeado de las aristas vivas. Es recomendable que los vértices y aristas vivas de las piezas se minimicen siempre que sea posible, reduciéndose la concentración de tensiones en estas zonas y facilitando el llenado del molde.
- Posible contracción del material. Durante el enfriamiento de la pieza se pueden producir contracciones del material, y, por consiguiente, se pueden reducir ligeramente las dimensiones originales.

## Capítulo 4. DESARROLLO DEL TRABAJO

### 4.1 MODELADO CAD DE LA GEOMETRÍA INICIAL

El primer paso llevado a cabo en el proyecto ha sido el diseño de la biela base de la que se parte en las iteraciones de optimización topológica. Para realizar el diseño, se ha utilizado el software de diseño CAD Solid Edge. A continuación, se muestra el diseño obtenido:

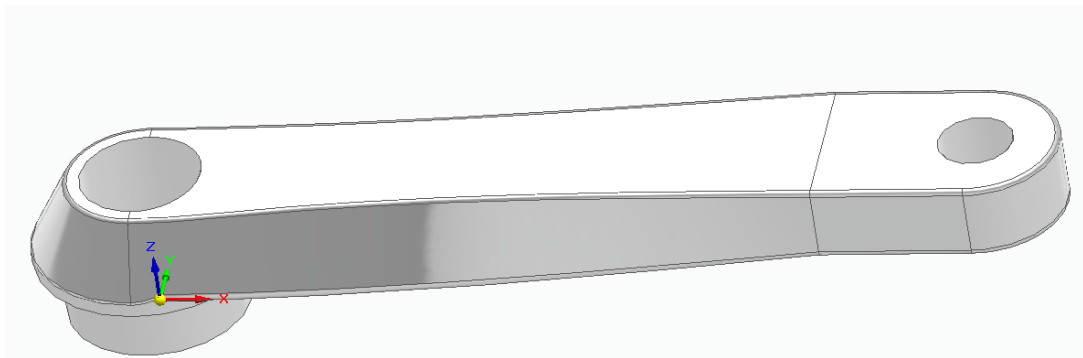


Ilustración 22: Biela base. Fuente propia.

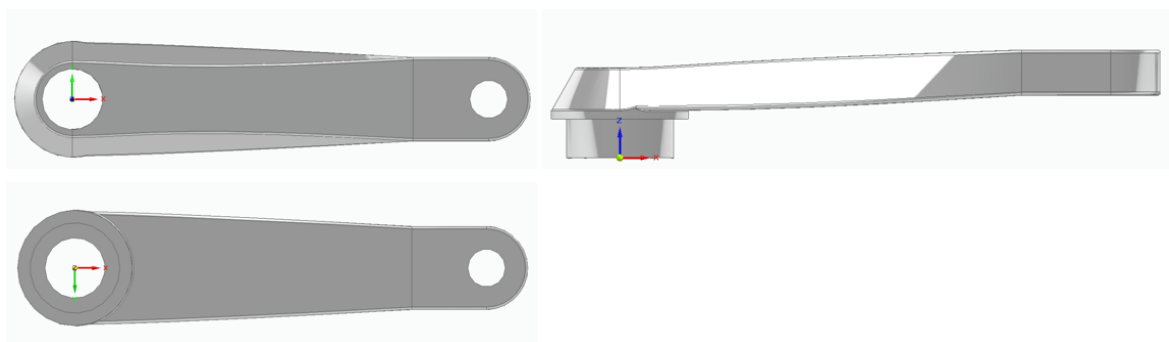


Ilustración 23: Vistas de la biela base. Fuente propia.

## 4.2 DEFINICIÓN DE MATERIALES

Tal y como se ha indicado en el capítulo anterior en el apartado de selección de materiales, el material utilizado para la fabricación del modelo es el Aluminio, 6061-T6.

Para asignar este material al modelo de Solid Edge, se selecciona en la tabla de materiales este aluminio sin necesidad un nuevo material, ya que se encuentra disponible en la galería.

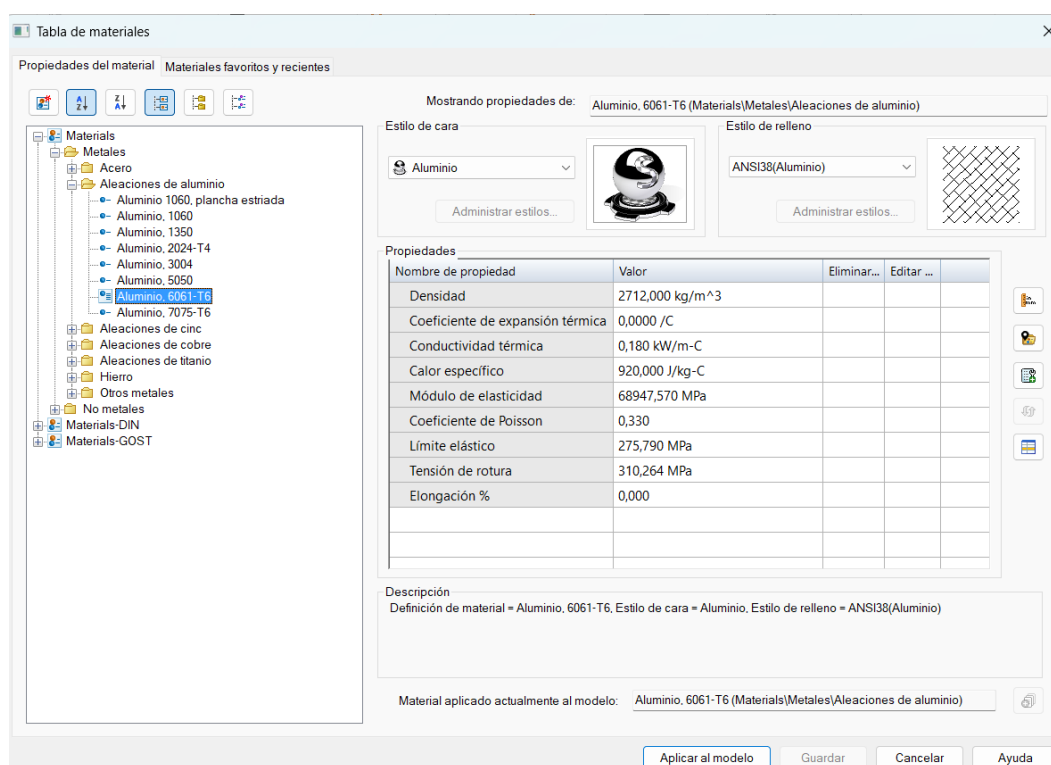


Ilustración 24: Asignación de material "Aluminio, 30361-T6". Fuente propia

## 4.3 DEFINICIÓN DE CARGAS Y RESTRICCIONES

A continuación, se aplican las cargas definidas en el capítulo anterior en el apartado 3.3. Como se ha explicado en este apartado, para optimización topológica de la biela se utiliza la carga de -90° respecto a la biela de valor 2750 N.

Primero se añade en el agujero de carga, correspondiente al agujero de la biela para el pedal, una carga negativa en el “eje y” de 2750 N.



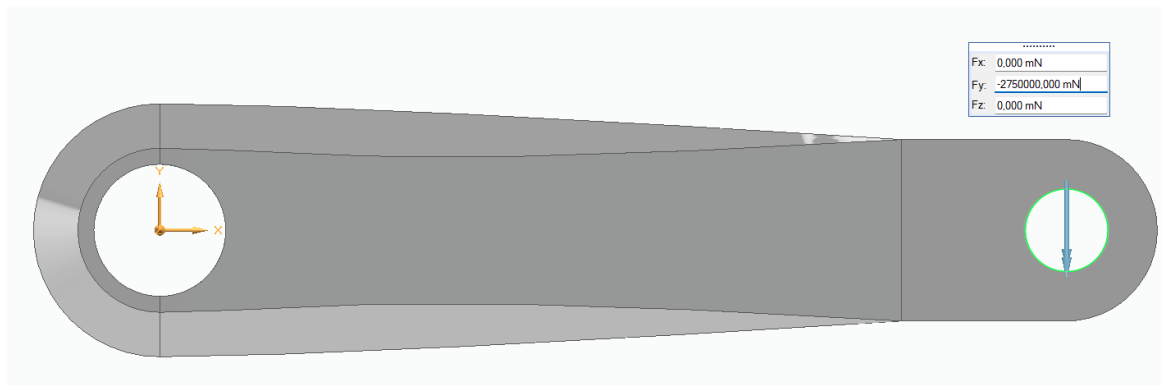


Ilustración 25: Asignación de carga crítica de 2750 N. Fuente propia.

Posteriormente, se asigna la restricción de desplazamientos en el agujero superior de la biela.

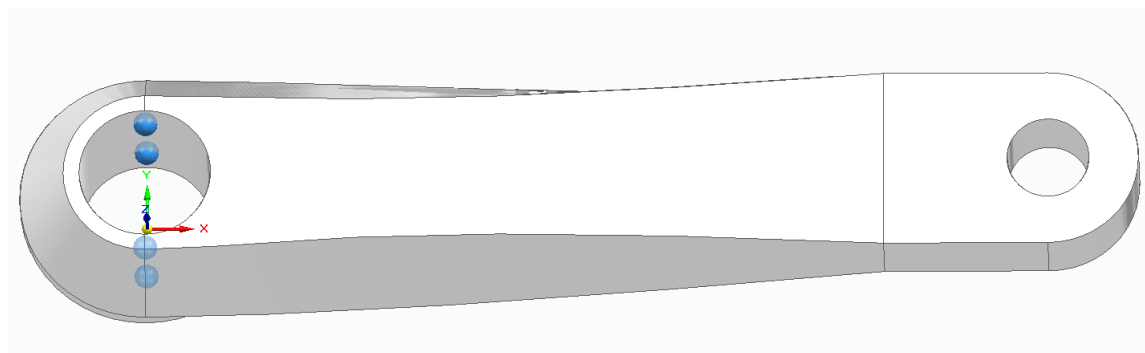


Ilustración 26: Aplicación de restricción fija. Fuente propia.

#### 4.4 *SIMULACIÓN FEM DEL CASO BASE*

Previamente a las iteraciones, se realiza un análisis estático de la pieza base, para comprobar que cumpla los requisitos de resistencia bajo las cargas impuestas. Para realizar la simulación del comportamiento de la biela con las cargas establecidas, primero se debe mallar la pieza.

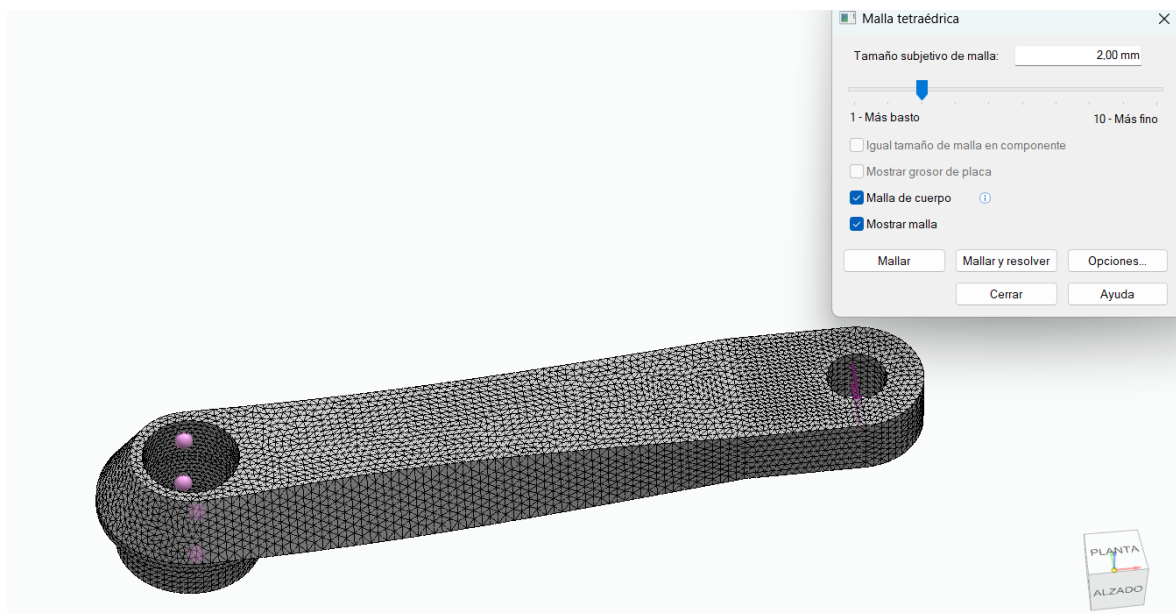


Ilustración 27: Mallado de la pieza base. Fuente propia.

A continuación, se resuelve la simulación para el caso crítico de 2750 N a 90° y se obtiene que el valor máximo de tensión de Von Mises a la que se somete la pieza es de 147 MPa. Como el límite elástico del material seleccionado es 276 MPa, se puede afirmar que la pieza base cumple a resistencia con las cargas aplicadas, es decir, no rompe ni supera el límite de seguridad establecido.

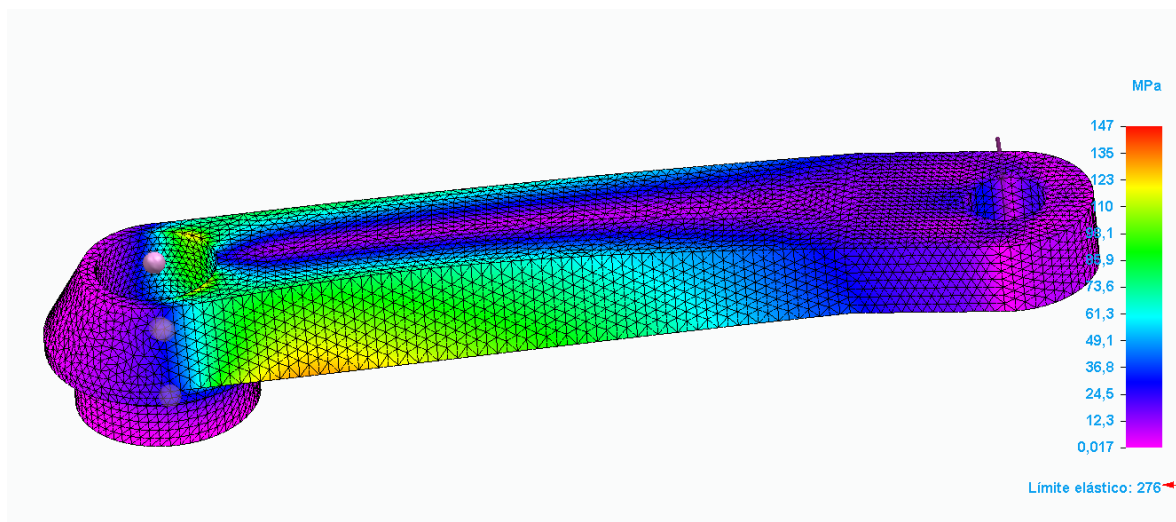


Ilustración 28: Simulación 2750 N a 90° del caso base. Fuente propia.

## 4.5 OPTIMIZACIÓN DEL MODELO

### 4.5.1 ITERACIONES CON CARGA CRÍTICA

Tras haber obtenido la simulación del caso base para la carga crítica y haber verificado que cumple a resistencia, se inicia el proceso de iteraciones de optimización topológica del modelo hasta conseguir uno óptimo, es decir, de masa mínima y que cumpla con los requisitos estructurales y condiciones impuestas.

Para llevar a cabo la optimización topológica de la pieza, se utiliza el área de trabajo de diseño generativo de Solid Edge.

De la misma forma que en el caso base, tal y como se ha explicado en los apartados anteriores del capítulo, se define la geometría, se asigna el material y se aplica las cargas y condiciones de contorno. A continuación, se debe indicar las regiones que se desea preservar. En este caso, para el correcto funcionamiento de la biela se debe preservar el área alrededor de los agujeros.

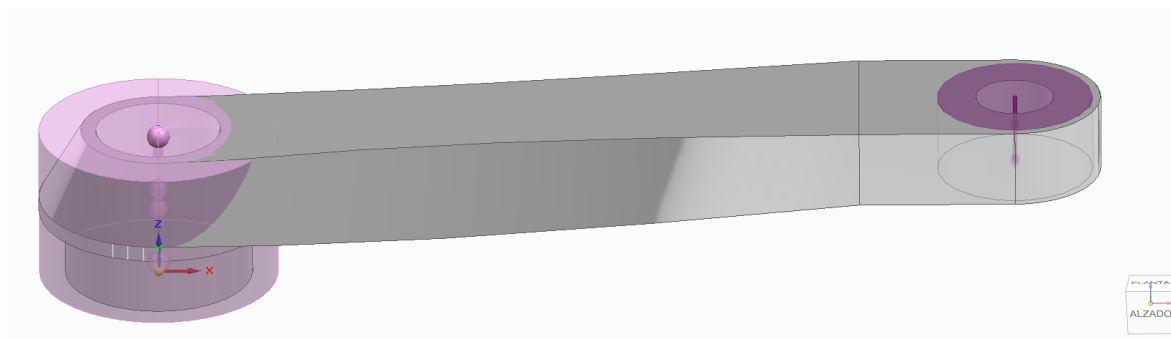


Ilustración 29: Preservación de regiones. Fuente propia.

Después, se inicia el proceso de iteraciones hasta llegar al modelo óptimo. La primera iteración se realiza con una reducción del 10% de la masa y se aumenta progresivamente el porcentaje de reducción de masa.

En cada iteración se realiza una validación mediante FEM para comprobar si el modelo generativo es capaz de soportar la carga impuesta.

#### 4.5.1.1 Iteración 1: reducción del 10% de masa

Esta iteración se ha ejecutado con una reducción del 10% de la masa con una calidad del estudio de 50. Al aplicar esta reducción de masa, la geometría obtenida es la siguiente:

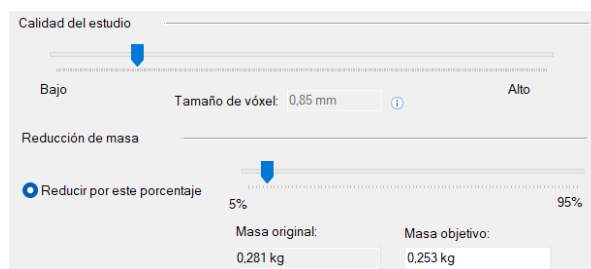


Ilustración 30: Reducción 10% masa con calidad 50. Fuente propia.

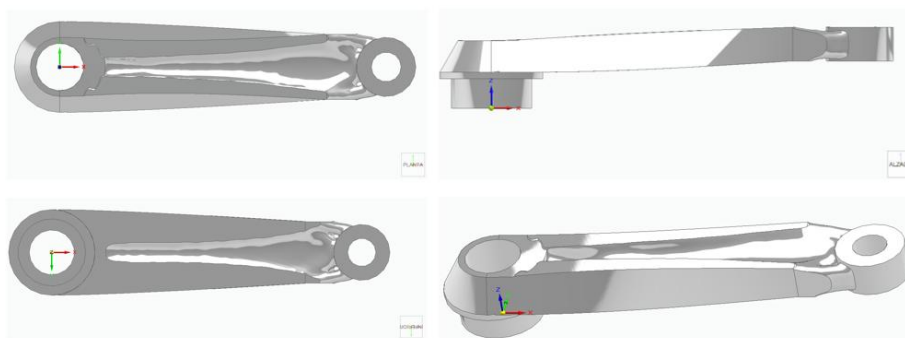


Ilustración 31: Optimización topológica reducción 10% masa. Fuente propia.

En la simulación de validación de la pieza obtenida, se observa que la pieza cumple a resistencia con un 90% de la masa inicial, siendo el valor máximo de tensión de 150 MPa frente a la tensión máxima admisible de 184 MPa. Por lo tanto, se puede seguir reduciendo la masa de la pieza.

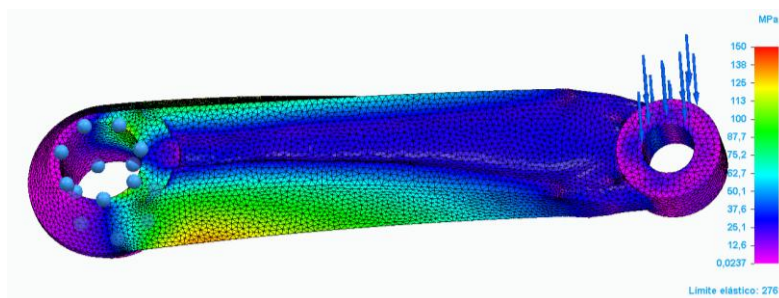


Ilustración 32: Simulación reducción 10% de masa. Fuente propia.

#### 4.5.1.2 Iteración 2: reducción del 20% de masa

Esta iteración se ha ejecutado con una reducción del 20% de la masa con una calidad del estudio de 50. Al aplicar esta reducción de masa, la geometría resultante es:

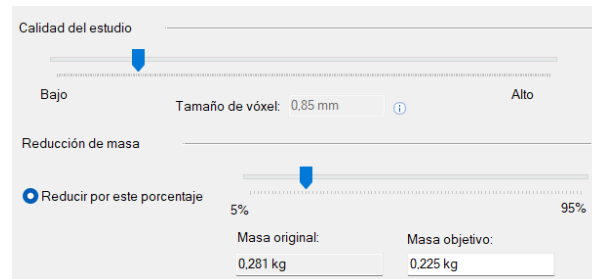


Ilustración 33: Reducción 20% masa con calidad 50. Fuente propia.

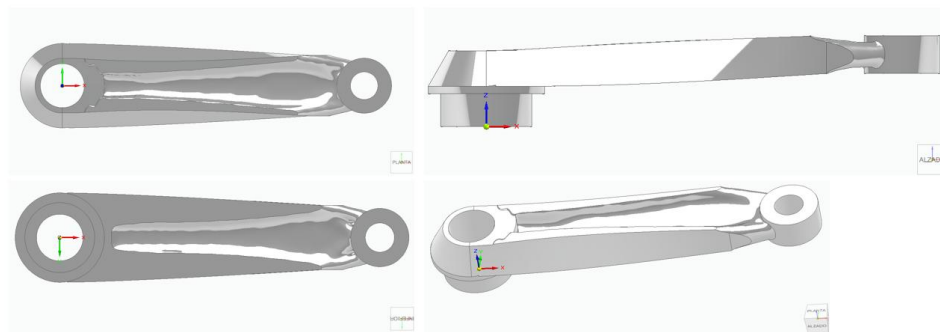


Ilustración 34: Optimización topológica reducción 20% masa. Fuente propia.

En esta simulación se observa que la pieza cumple a resistencia con un 80% de la masa inicial, siendo el valor máximo de tensión de 159 MPa frente al valor máximo de tensión admisible de 184 MPa. Por lo tanto, se puede seguir reduciendo la masa de la pieza.

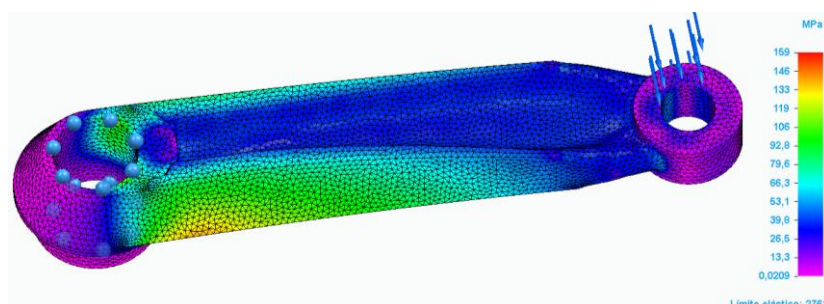


Ilustración 35: Simulación reducción 20% de masa. Fuente propia.

#### 4.5.1.3 Iteración 3: reducción del 30% de masa

Esta iteración se ha ejecutado con una reducción del 30% de la masa con una calidad del estudio de 50. El resultado obtenido para el 30% de reducción de masa es:

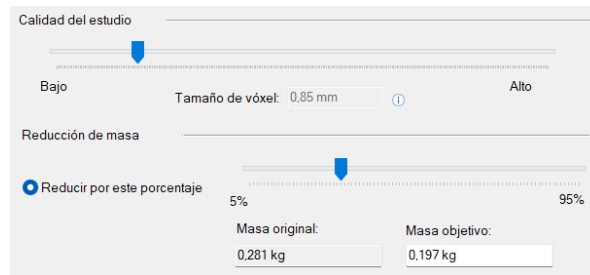


Ilustración 36: Reducción 30% masa con calidad 50. Fuente propia.

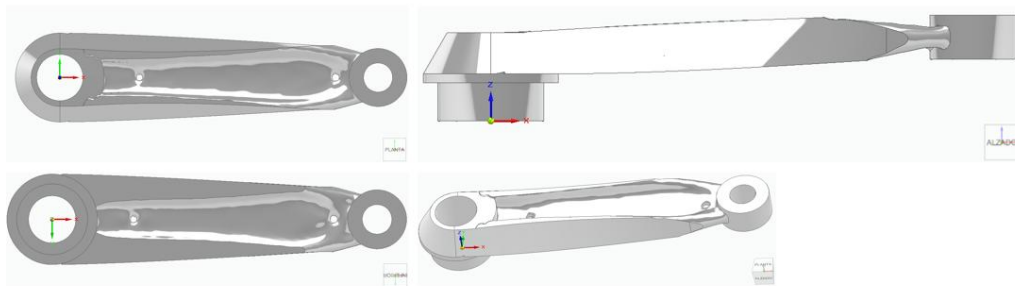


Ilustración 37: Optimización topológica reducción 30% masa. Fuente propia.

En esta simulación se observa que la pieza cumple a resistencia con un 70% de la masa inicial, siendo el valor máximo de tensión de 160 MPa frente a la tensión máxima admisible 184 MPa. Por lo tanto, se puede seguir reduciendo la masa de la pieza.

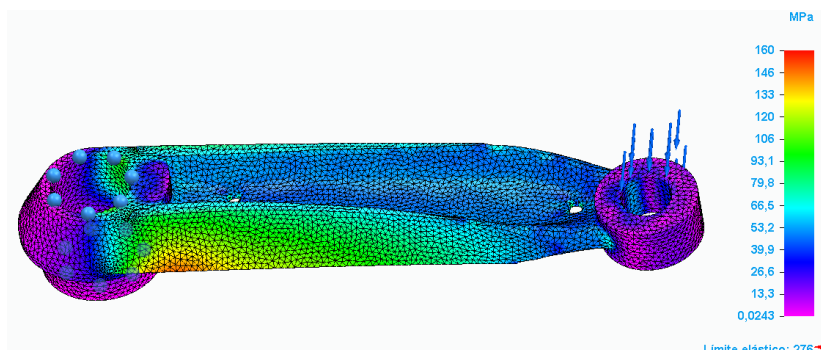


Ilustración 38: Simulación reducción 30% de masa. Fuente propia.

#### 4.5.1.4 Iteración 4: reducción del 40% de masa

Esta iteración se ha ejecutado con una reducción del 40% de la masa con una calidad del estudio de 50. Al aplicar la reducción del 40% de la masa, se obtiene el siguiente modelo:

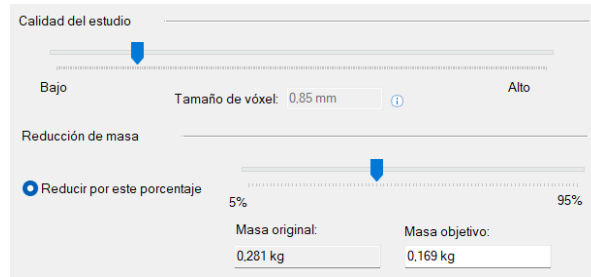


Ilustración 39: Reducción 40% masa con calidad 50. Fuente propia.

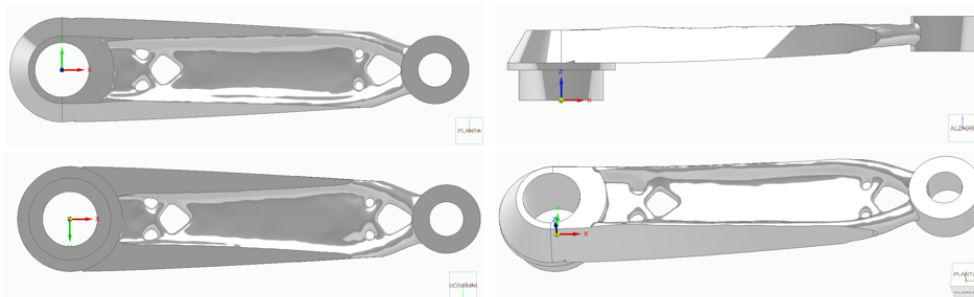


Ilustración 40: Optimización topológica reducción 40% masa. Fuente propia.

En esta simulación se observa que la pieza cumple a resistencia con un 60% de la masa inicial, siendo el valor máximo de tensión de 181 MPa frente a la tensión máxima admisible de 184 MPa. Este modelo se encuentra muy cercano al óptimo.

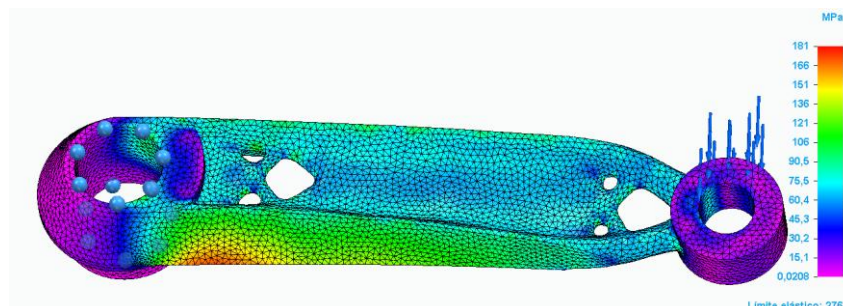


Ilustración 41: Simulación reducción 40% de masa. Fuente propia.



#### 4.5.1.5 Iteración 5: reducción del 50% de masa

Esta iteración se ha ejecutado con una reducción del 50% de la masa con una calidad del estudio de 50. A continuación, se muestran los resultados obtenidos con una reducción del 50% de la masa:

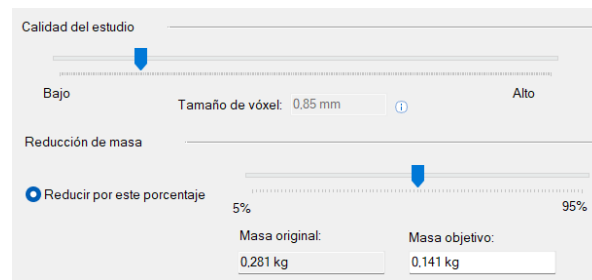


Ilustración 42: Reducción 50% masa con calidad 50. Fuente propia.

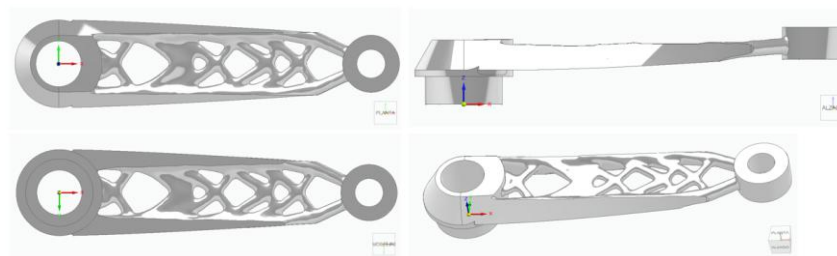


Ilustración 43: Optimización topológica reducción 50% masa. Fuente propia.

Se observa en la simulación que con una reducción del 50% de la masa inicial, la tensión máxima que sufre la pieza es de 230 MPa. A pesar de ser un valor inferior al límite elástico de 276 MPa, el coeficiente de seguridad con el que se estaría trabajando es de 1,2. Esto significa que el óptimo se encuentra entre el 40% y el 50% de reducción de masa.

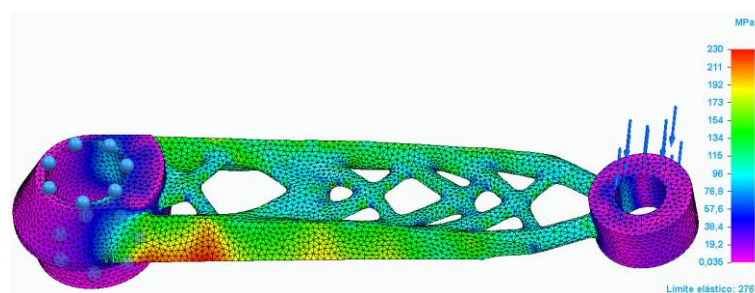


Ilustración 44: Simulación reducción 50% de masa. Fuente propia.



#### 4.5.1.6 Iteración 6: reducción del 49% de masa

Esta iteración se ha ejecutado con una reducción del 49% de la masa con una calidad del estudio de 50. La geometría obtenida con una reducción del 49% de masa es la siguiente:

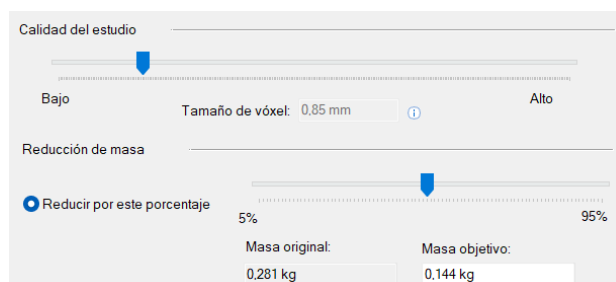


Ilustración 45: Reducción 49% masa con calidad 50. Fuente propia.

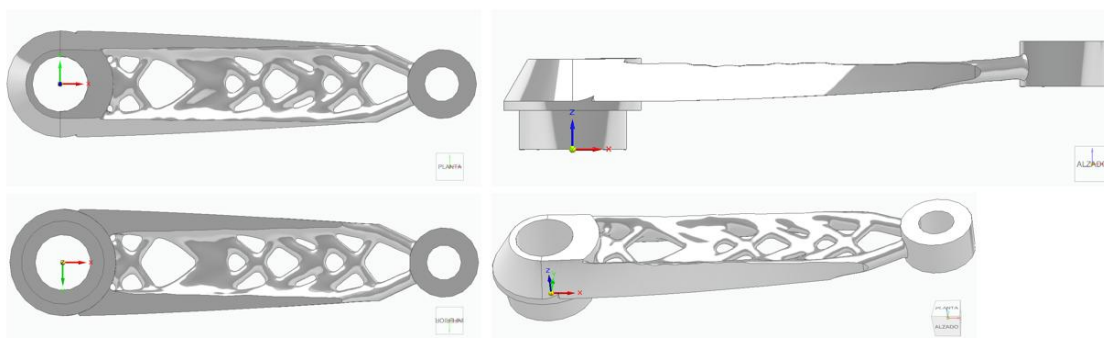


Ilustración 46: Optimización topológica reducción 49% masa. Fuente propia.

En la simulación se observa que la tensión máxima admisible sigue siendo superior a la tensión máxima admisible ( $227 \text{ MPa} > 184 \text{ MPa}$ ). Por lo tanto, se debe seguir aumentando el porcentaje de masa necesario para la pieza.

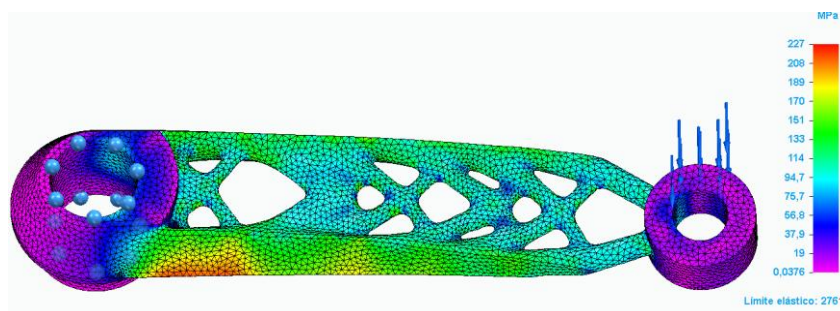


Ilustración 47: Simulación reducción 49% de masa. Fuente propia.

#### 4.5.1.7 Iteración 7: reducción del 48% de masa

Esta iteración se ha ejecutado con una reducción del 48% de la masa con una calidad del estudio de 50. El resultado que se obtiene con esta reducción de masa se muestra a continuación.

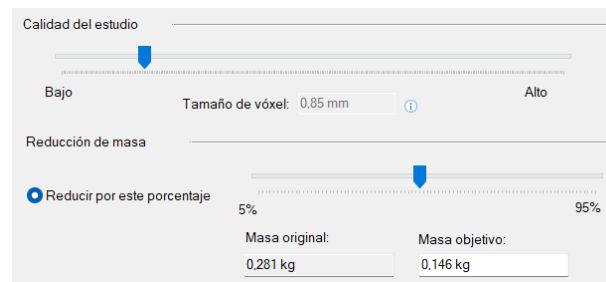


Ilustración 48: Reducción 48% masa con calidad 50. Fuente propia.

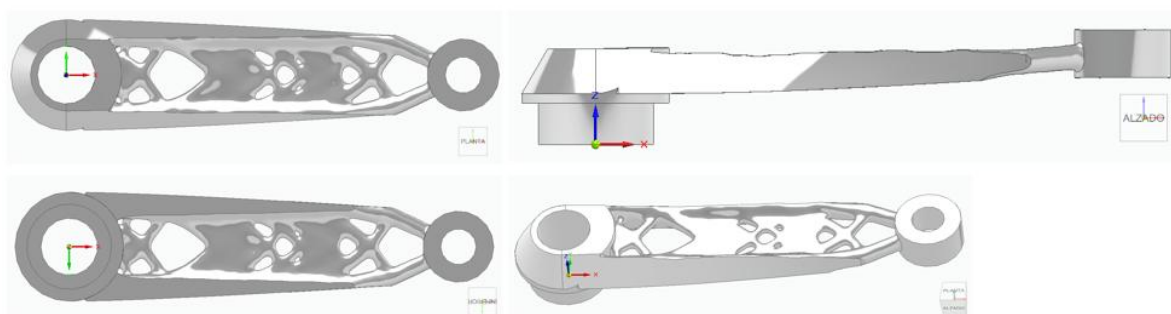


Ilustración 49: Optimización topológica reducción 48% masa. Fuente propia.

En la simulación con una reducción del 48% de la masa inicial de la pieza, se observa que la tensión máxima es de 217 MPa, frente a una tensión máxima admisible de 184 MPa. Por ello se debe continuar con las iteraciones.

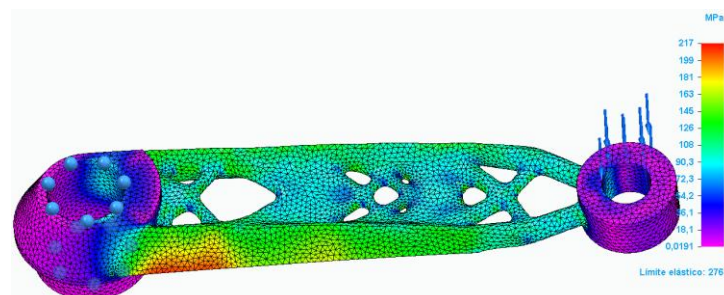


Ilustración 50: Simulación reducción 48% de masa. Fuente propia.

#### 4.5.1.8 Iteración 8: reducción del 47% de masa

Esta iteración se ha ejecutado con una reducción del 47% de la masa con una calidad del estudio de 50. Al aplicar la reducción del 47% de la masa, se obtiene el siguiente modelo:

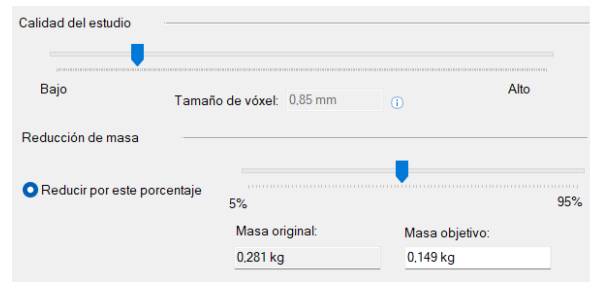


Ilustración 51: Reducción 47% masa con calidad 50. Fuente propia.

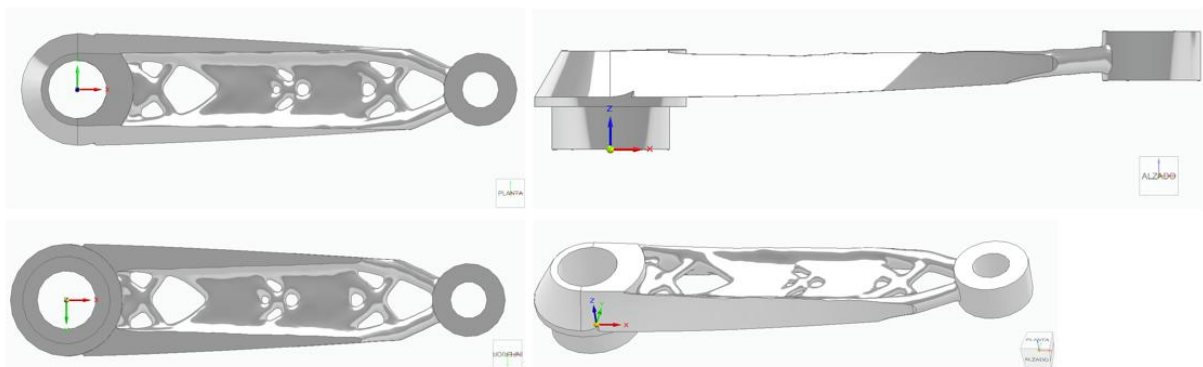


Ilustración 52: Optimización topológica reducción 47% masa. Fuente propia.

En esta simulación la tensión máxima de la pieza es de 212 MPa, es decir, el coeficiente de seguridad con el que se estaría trabajando sería de 1,3.

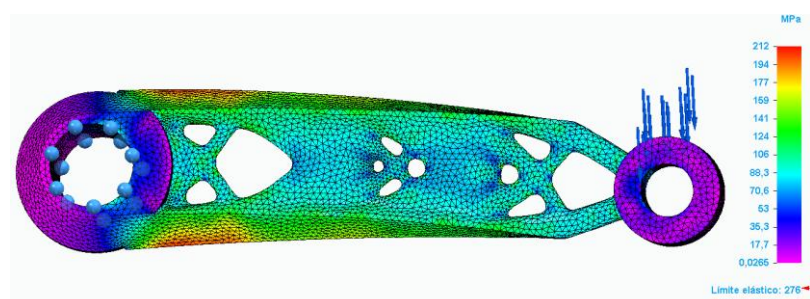


Ilustración 53: Simulación reducción 47% de masa. Fuente propia.

#### 4.5.1.9 Iteración 9: reducción del 46% de masa

Esta iteración se ha ejecutado con una reducción del 46% de la masa con una calidad del estudio de 50. Al aplicar la reducción de masa de un 46%, el modelo resultante es el siguiente:

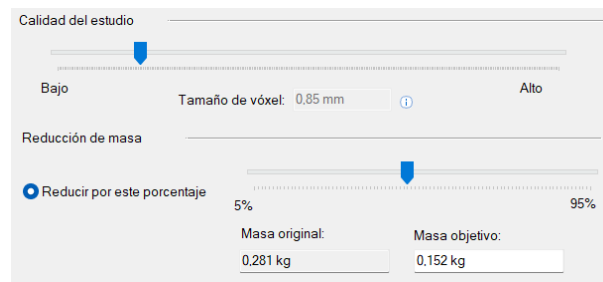


Ilustración 54: Reducción 46% masa con calidad 50. Fuente propia.

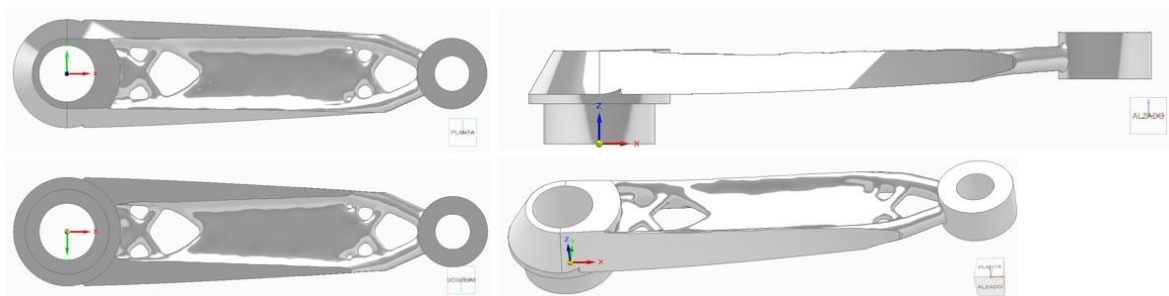


Ilustración 55: Optimización topológica reducción 46% masa. Fuente propia.

En esta simulación, la tensión máxima de la biela es de 211 MPa, por lo que aún se supera la tensión máxima admisible calculada.

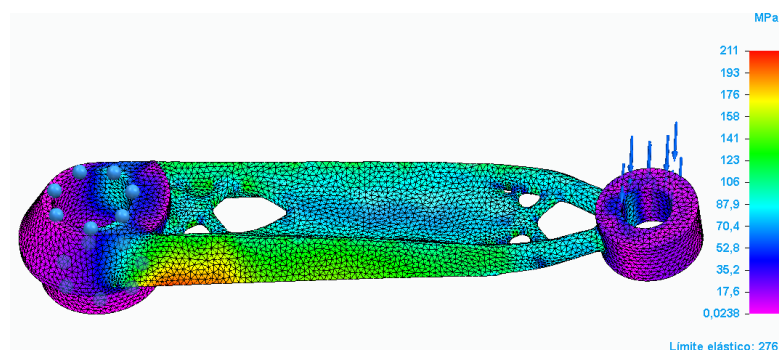


Ilustración 56: Simulación reducción 46% de masa. Fuente propia.

#### 4.5.1.10 Iteración 10: reducción del 45% de masa

Esta iteración se ha ejecutado con una reducción del 45% de la masa con una calidad del estudio de 50. Tras aplicar una reducción del 45% de la masa inicial, se obtiene el siguiente modelo:

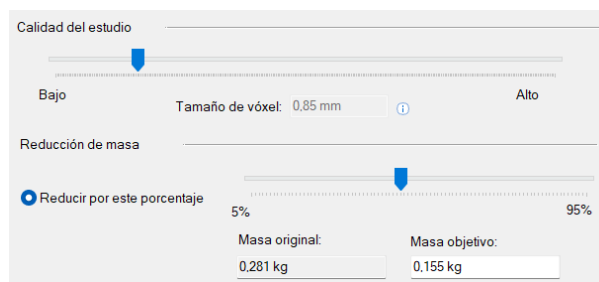


Ilustración 57: Reducción 45% masa con calidad 50

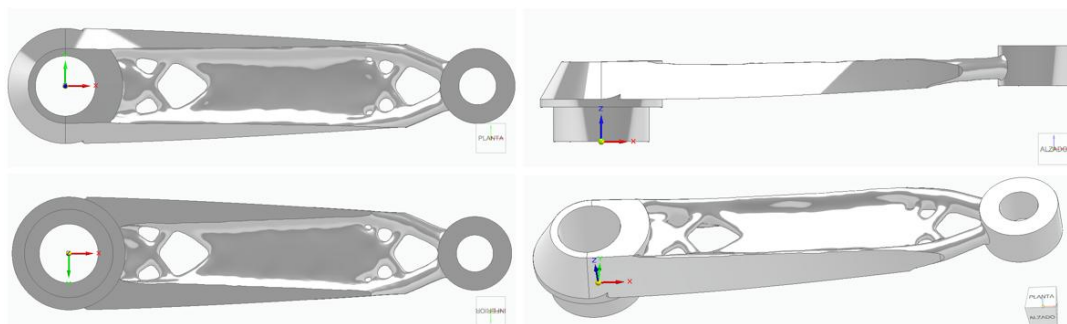


Ilustración 58: Optimización topológica reducción 45% masa. Fuente propia.

Se puede observar que la tensión máxima sigue siendo superior a la tensión máxima admisible ( $196 \text{ MPa} > 184 \text{ MPa}$ ), por lo que se sigue en búsqueda del óptimo.

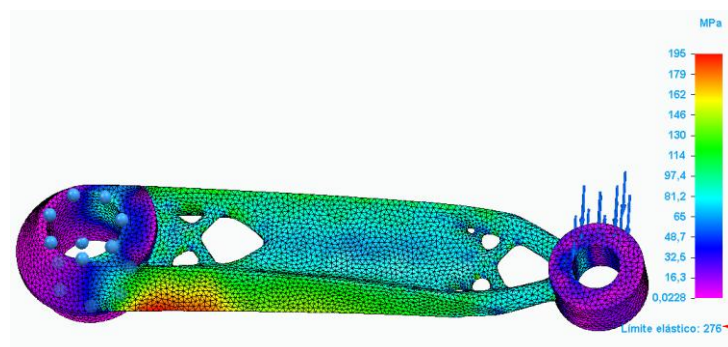


Ilustración 59: Simulación reducción 45% de masa. Fuente propia.

#### 4.5.1.11 Iteración 11: reducción del 44% de masa

Esta iteración se ha ejecutado con una reducción del 44% de la masa con una calidad del estudio de 50. A continuación, se muestra el resultado de reducir el 44% de la masa.

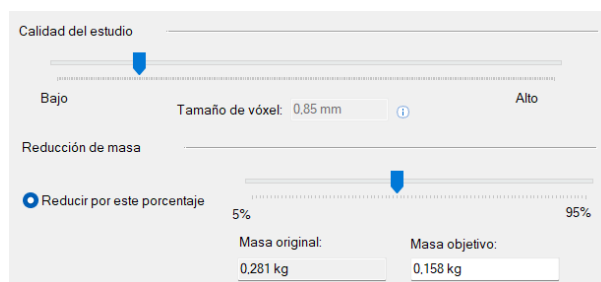


Ilustración 60: Reducción 44% masa con calidad 50. Fuente propia.

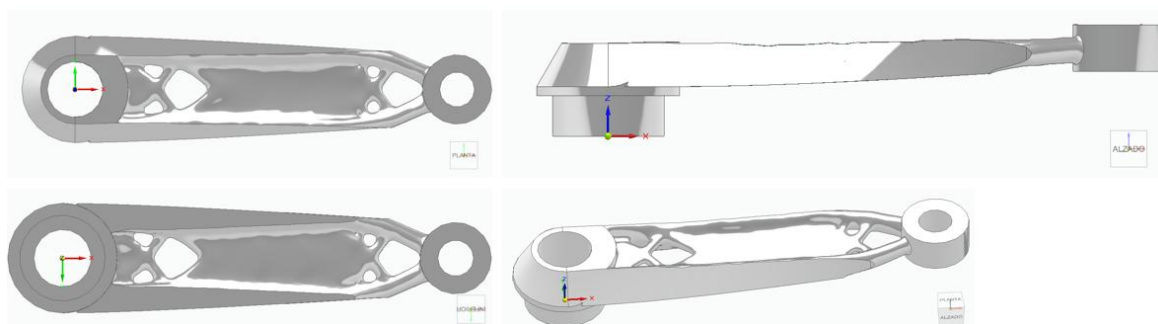


Ilustración 61: Optimización topológica reducción 44% masa. Fuente propia.

En la simulación realizada para este caso, se observa que el valor máximo de tensión que sufre la pieza es de 212 MPa. Este aumento de tensión respecto a la iteración anterior puede deberse a la acumulación de tensiones en zonas generadas en la optimización que no han sido refinadas aún.

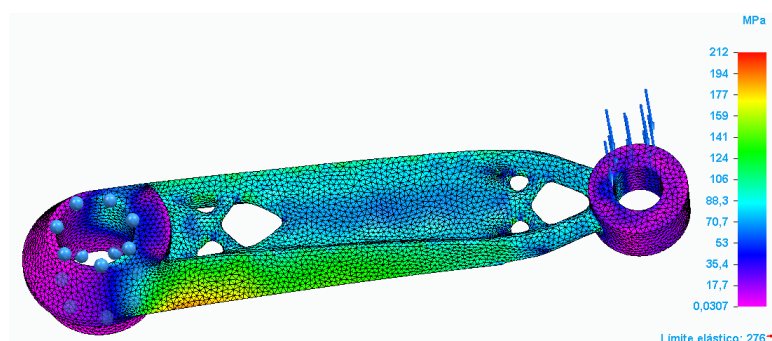


Ilustración 62: Simulación reducción 44% de masa. Fuente propia.



#### 4.5.1.12 Iteración 12: reducción del 43% de masa

Esta iteración se ha ejecutado con una reducción del 43% de la masa con una calidad del estudio de 50. Al reducir la masa en un 43% respecto al modelo inicial, se obtiene el modelo mostrado en las siguientes imágenes

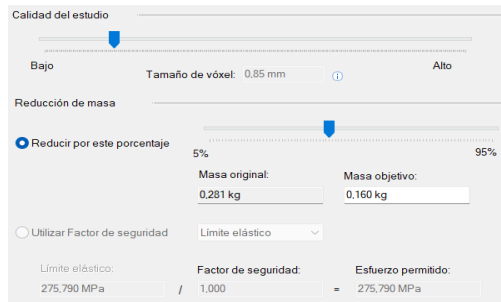


Ilustración 63: Reducción 43% masa con calidad 50. Fuente propia.

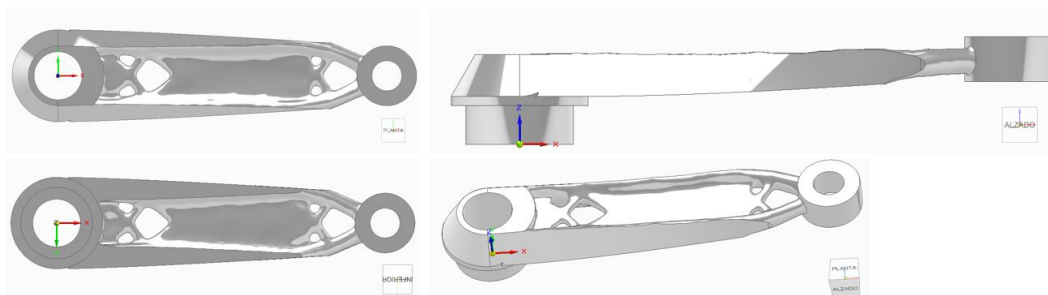


Ilustración 64: Optimización topológica reducción 43% masa. Fuente propia.

En la simulación se puede observar que el valor de la tensión máxima cada vez se aproxima más hacia el valor de la tensión máxima admisible. En este caso la tensión máxima tiene un valor de 190 MPa.

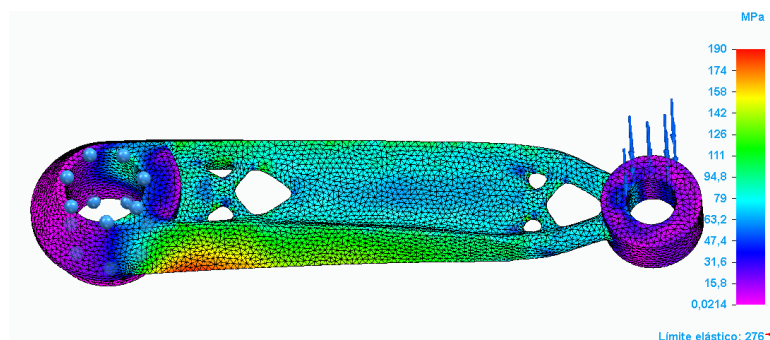


Ilustración 65: Simulación reducción 43% de masa. Fuente propia.

#### 4.5.1.13 Iteración 13: reducción del 42% de masa

Esta iteración se ha ejecutado con una reducción del 42% de la masa con una calidad del estudio de 50. El resultado de aplicar una reducción del 42% de masa al modelo inicial resulta en la siguiente geometría:

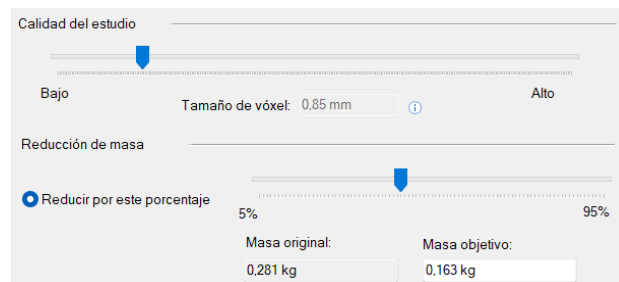


Ilustración 66: Reducción 42% masa con calidad 50. Fuente propia.

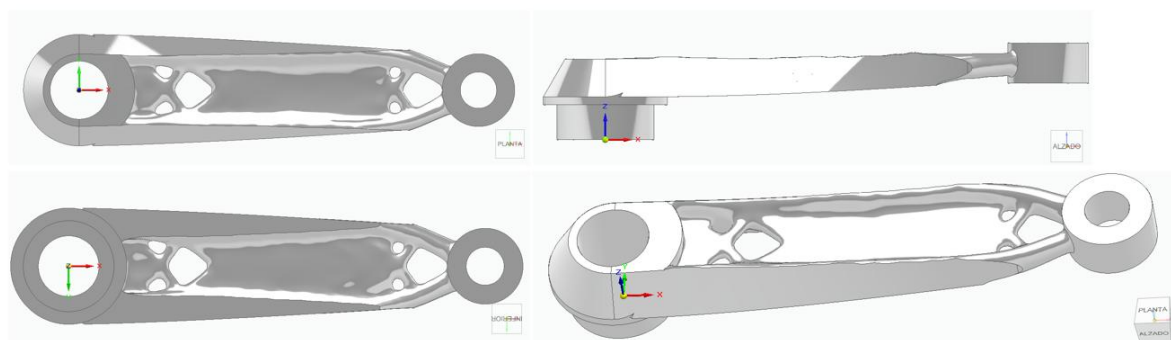


Ilustración 67: Optimización topológica reducción 42% masa. Fuente propia.

En este caso el valor de la tensión máxima es de 192 MPa, por lo que se continúa la búsqueda del óptimo.

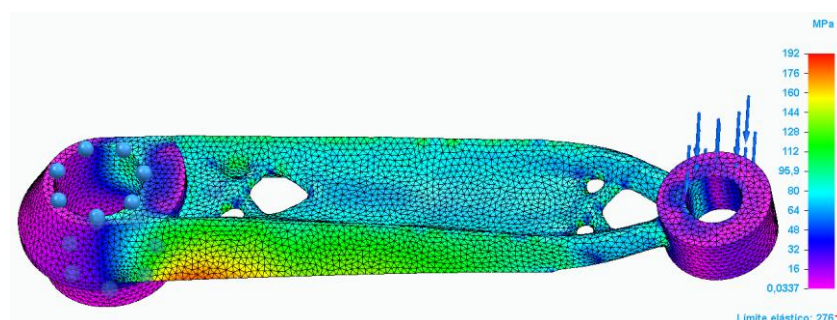


Ilustración 68: Simulación reducción 42% de masa. Fuente propia.



#### 4.5.1.14 Iteración 14: reducción del 41% de masa

Esta iteración se ha ejecutado con una reducción del 41% de la masa con una calidad del estudio de 50. La reducción del 41% de masa da lugar al siguiente modelo:

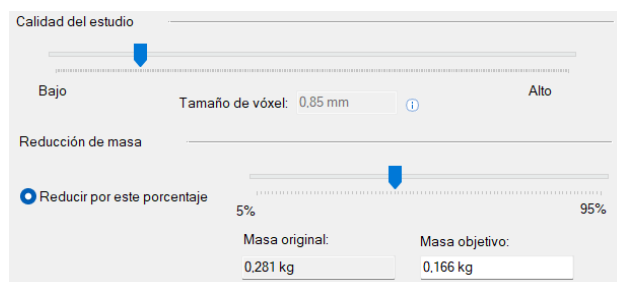


Ilustración 69: Reducción 41% masa con calidad 50. Fuente propia.

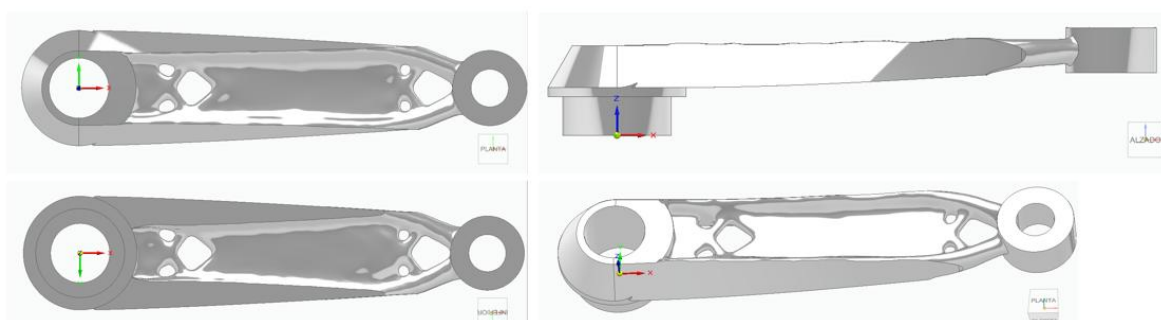


Ilustración 70: Optimización topológica reducción 41% masa. Fuente propia.

En esta simulación se observa que el valor de la tensión máxima es de 187 MPa. Esto significa que se trabaja con un coeficiente de seguridad de 1,48, el cual se aproxima al establecido en el apartado 3.4 como valor óptimo. Este modelo se toma como óptimo.

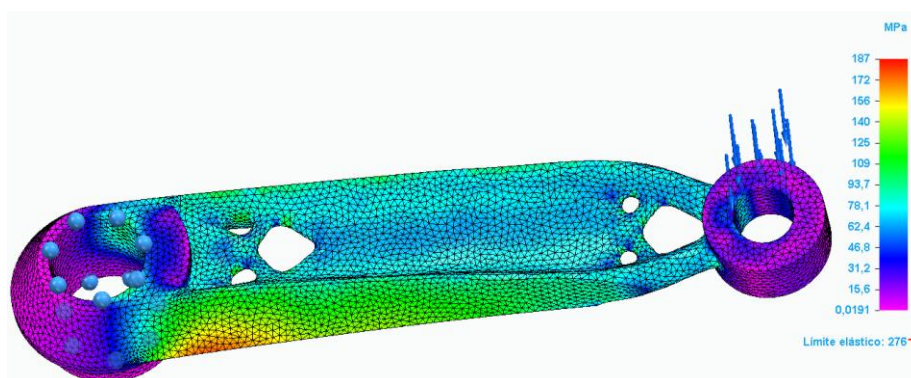


Ilustración 71: Simulación reducción 41% de masa. Fuente propia.

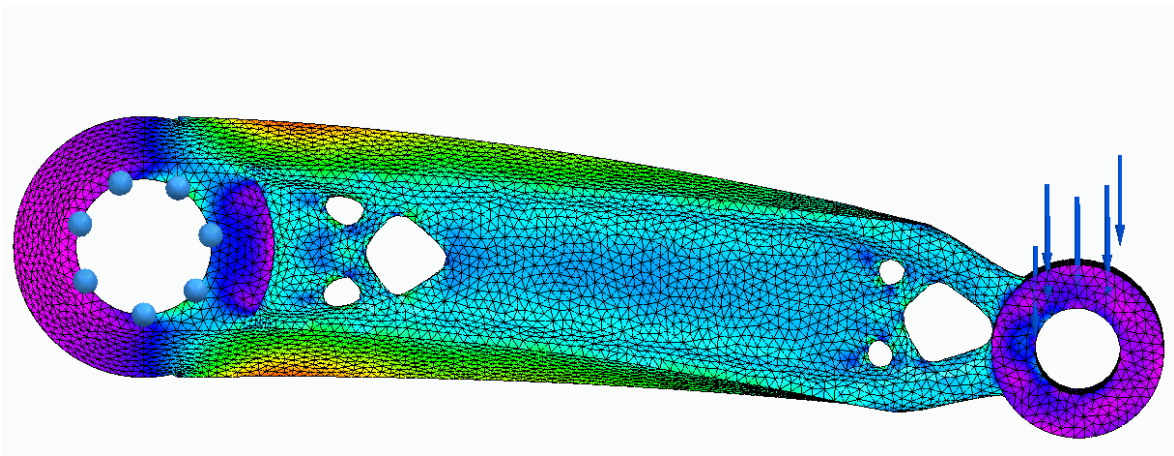


Ilustración 72: Planta superior de la pieza optimizada. Fuente propia.

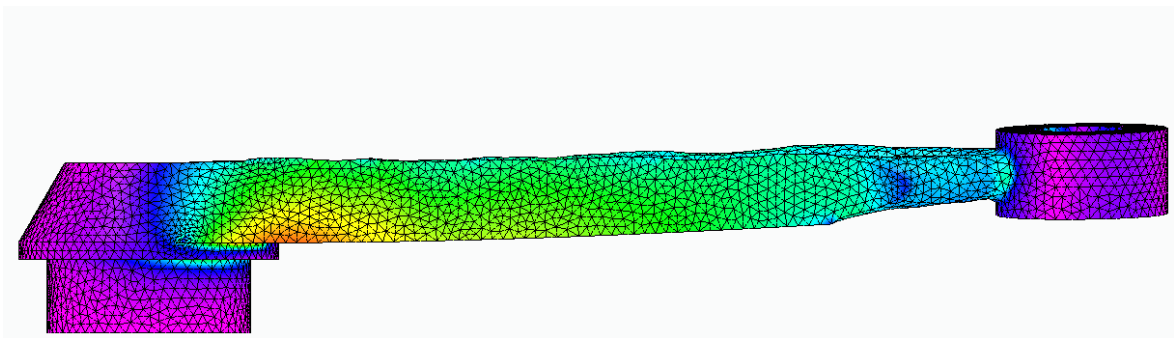


Ilustración 73: Alzado de la pieza optimizada. Fuente propia.

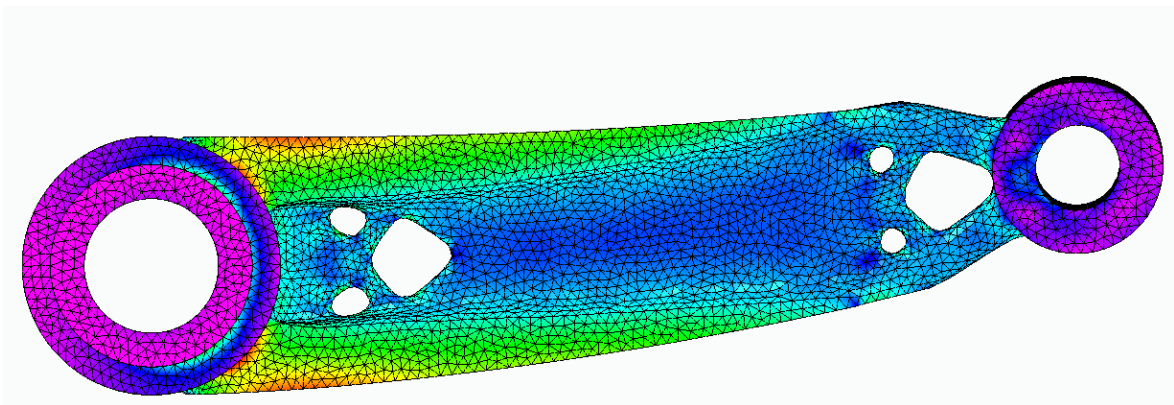


Ilustración 74: Planta inferior de la pieza optimizada. Fuente propia.

#### 4.5.2 ESTUDIO DE DISEÑO GENERATIVO CON REDUCCIÓN ÓPTIMA DE MASA EN FUNCIÓN DEL ÁNGULO DE PEDALEO

En el apartado anterior se ha demostrado que la reducción óptima de masa para el caso de carga crítica es un 41 %.

A continuación, se ha realizado un estudio de los distintos modelos obtenidos mediante diseño generativo para dicha reducción de masa al variar el ángulo de pedaleo.

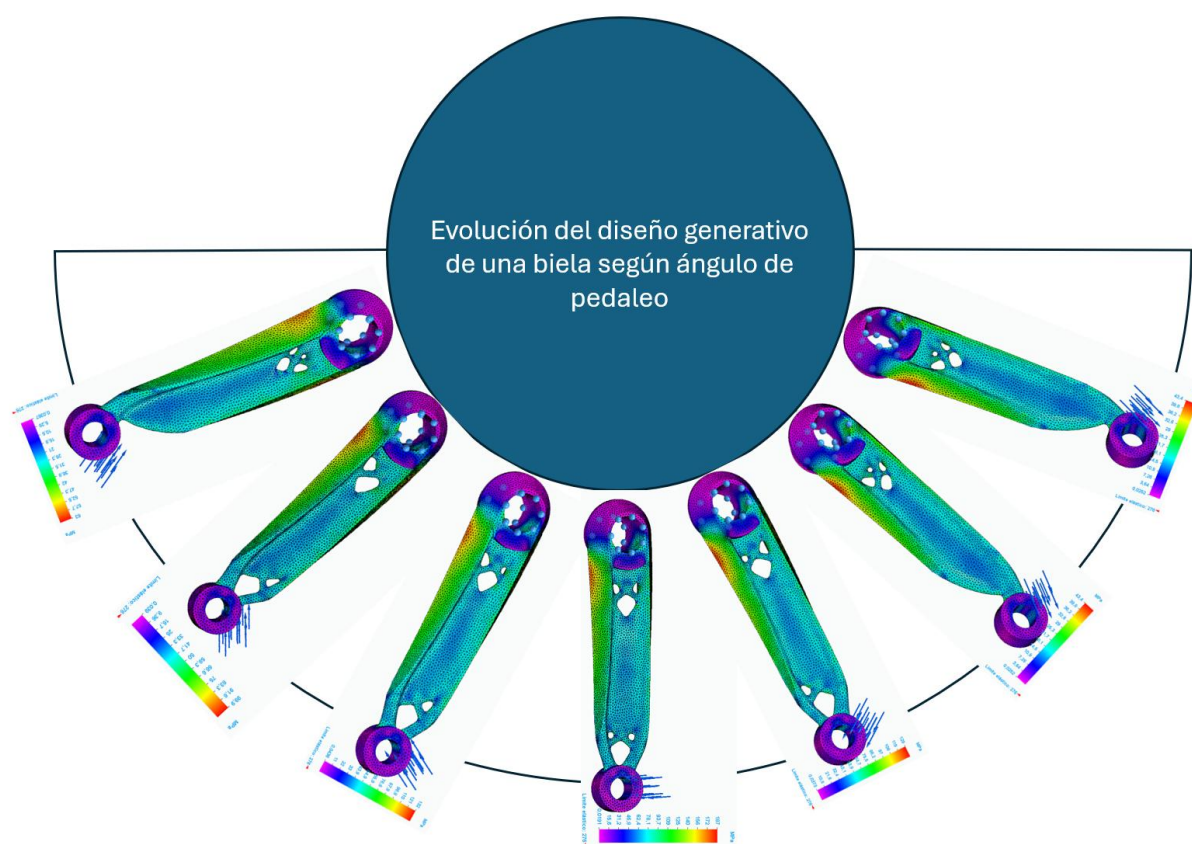


Ilustración 75: Variación del diseño generativo con una reducción del 41% de la masa según el ángulo de pedaleo. Fuente propia.

Se puede observar con claridad cómo el diseño generativo adapta la geometría para mantener la resistencia estructural optimizando el uso de material en cada fase del ciclo de pedaleo.

## 4.6 REFINADO GEOMÉTRICO DEL MODELO PARA LA FABRICACIÓN

Una vez finalizadas las iteraciones del proceso de optimización topológica, se obtiene un modelo óptimo de menor masa. Sin embargo, el modelo obtenido no es el modelo final, ya que presenta superficies irregulares y contornos poco definidos. Para obtener un modelo apto para fabricación por fundición al modelo perdido se ha llevado a cabo un proceso de refinado de geometría.

El refinado de geometría tiene como objetivos fundamentales:

- Suavizar la superficie y eliminar posibles discontinuidades.
- Definición de contornos.

En este proyecto se ha utilizado la herramienta Altair Inspire. Este software tiene un módulo de PolyNURBS, el cual permite reconstruir el modelo utilizando superficies suaves tipo NURBS a través de la división en polígonos de la geometría.

El objetivo principal es suavizar la geometría de la biela manteniendo ambos extremos lo más cercano posible al modelo original. Para ello, primero se ha suavizado la pieza con “Ajustar” y se ha combinado el brazo de la biela con los extremos de la biela sin optimizar utilizando “Booleano - Combinar”.



Ilustración 76: Herramienta Ajustar de Altair Inspire. Fuente propia.



Ilustración 77:Herramienta Booleano-Combinar de Altair Inspire. Fuente propia.

Al aplicar estas herramientas, el modelo obtenido es el siguiente:

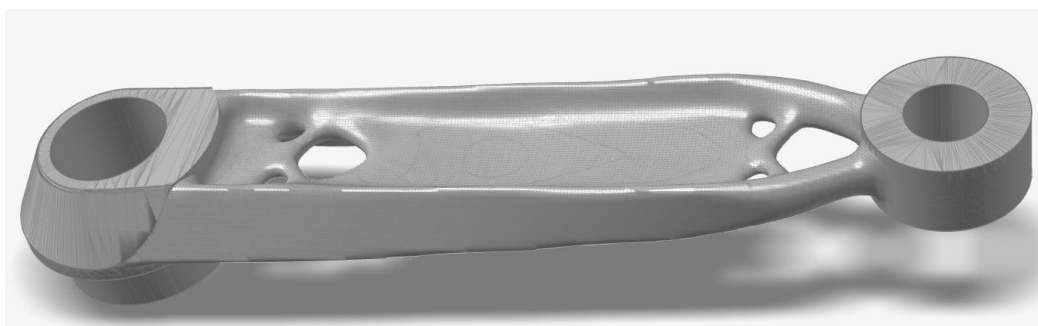


Ilustración 78: Geometría tras aplicar herramienta de Ajustar. Fuente propia.

Se puede observar que las uniones del extremo izquierdo con el brazo de la biela no son suaves en algunas zonas. Para obtener un modelo final suavizado, se vuelve a aplicar la herramienta ajustar, pero en este caso con un mayor número de caras polyNURBS, para conservar de la mejor forma posible la geometría de los extremos.

El resultado final del refinado de la geometría se muestra a continuación:

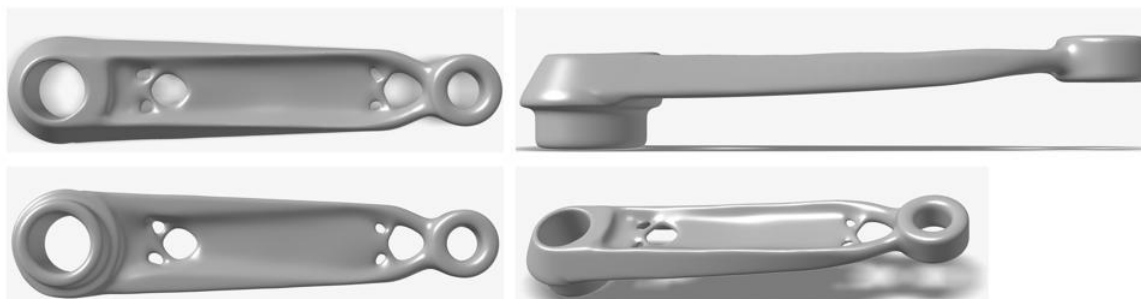


Ilustración 79: Geometría refinada final. Fuente propia.



## 4.7 VALIDACIÓN MEDIANTE FEM

Previamente a la fabricación del modelo, se debe realizar una validación mediante el método de elementos finitos (FEM) de la geometría refinada. Para ello, se vuelve a aplicar las mismas cargas y restricciones utilizadas en las iteraciones de optimización topológica. De esta forma se obtiene el siguiente resultado:

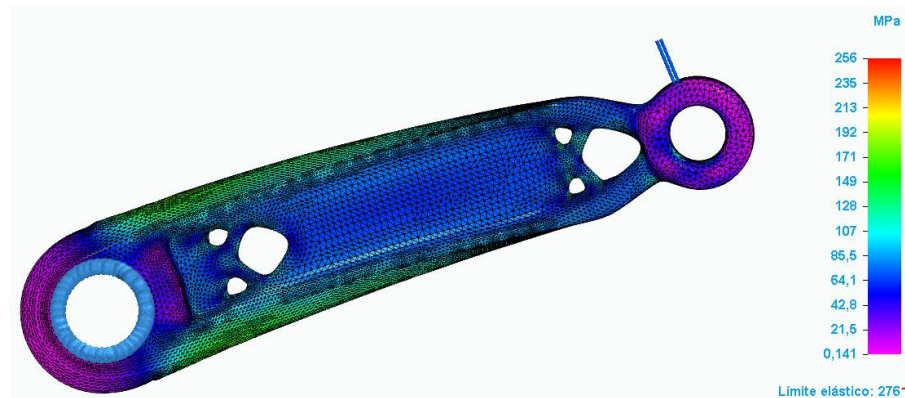


Ilustración 80: Validación FEM. Fuente propia.

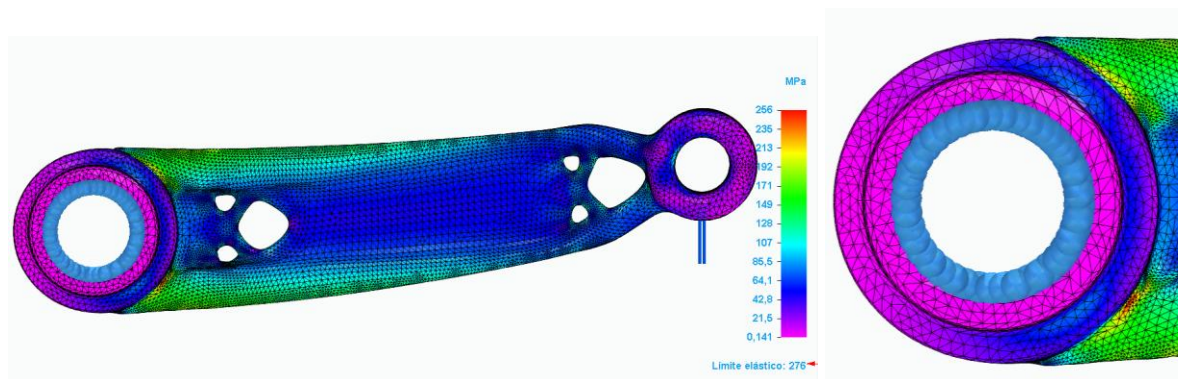


Ilustración 81: Vista inferior validación FEM y vista ampliada de zona de máxima tensión. Fuente propia.

Se observa que la tensión máxima es de 256 MPa, por lo que no se supera el límite elástico, pero no se cumple con el coeficiente de seguridad establecido. Sin embargo, la tensión máxima se encuentra localizada en una región reducida de la pieza. Esto puede deberse a un error en el mallado. A pesar de esto, el resto de la geometría no supera los 200 MPa, tensión cercana a la máxima admisible calculada.

## 4.8 *FABRICACIÓN DEL PROTOTIPO*

En el proyecto realizado se han empleado dos métodos de fabricación: la fabricación aditiva y la fundición al modelo perdido. Ambos métodos son aptos para la fabricación de piezas obtenidas mediante diseño generativo, ya que permiten crear geometrías complejas.

La fabricación aditiva se ha utilizado tanto para conseguir prototipos funcionales como para obtener el modelo desechable y la base del molde que se utilizan en la fundición al modelo perdido.

### 4.8.1 FABRICACIÓN ADITIVA

#### 4.8.1.1 *Fabricación aditiva del prototipo sin optimizar*

Para el proceso de fabricación aditiva se utiliza el software UltiMaker Cura.

Inicialmente, se selecciona la impresora y el material que se va a utilizar para la impresión 3D del prototipo sin optimizar: Prusa I3KS/MK3S+ en PLA genérico. A continuación, se importa el prototipo y se orienta de forma que el material de soporte utilizado sea el menor posible.

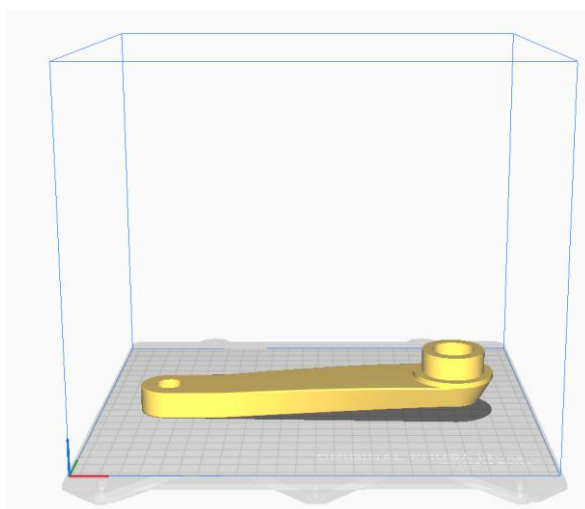


Ilustración 82: Orientación pieza en Cura. Fuente propia.

Posteriormente se especifican los ajustes para la impresión de la pieza, teniendo en cuenta las especificaciones de temperatura del material utilizado.

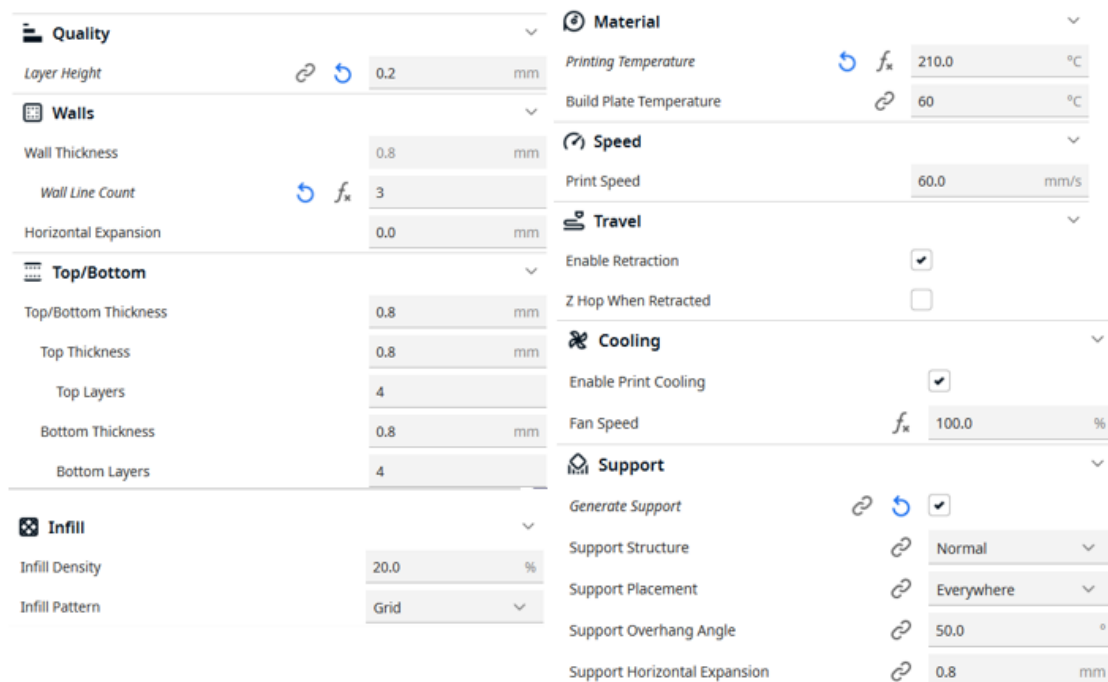


Ilustración 83: Ajustes impresión prototipo sin optimizar. Fuente propia.

Con estos ajustes se obtienen los resultados de simulación de impresión 3D que se muestran a continuación:

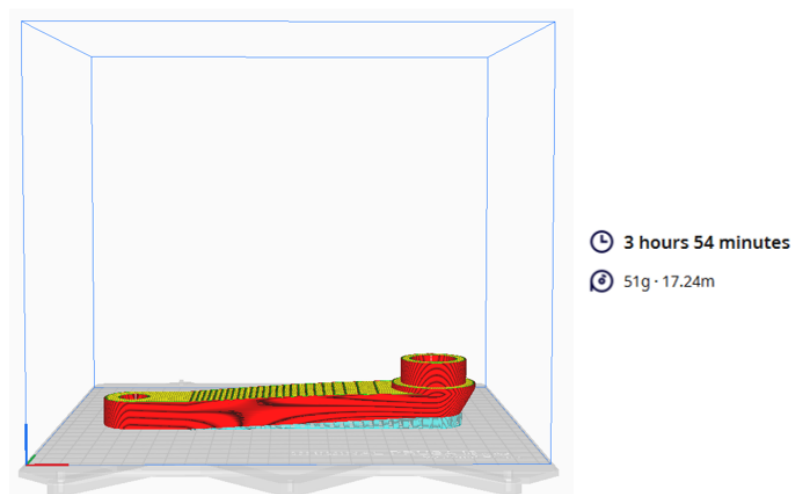


Ilustración 84: Simulación de impresión 3D del prototipo sin optimizar. Fuente propia.



El resultado obtenido tras la impresión es el siguiente:



Ilustración 85: Resultado impresión 3D biela sin optimizar. Fuente propia.

#### ***4.8.1.2 Fabricación aditiva del modelo optimizado y refinado***

También se ha impreso un prototipo de la biela optimizada. Los ajustes de impresión utilizados son los mismos que en el caso de la biela sin optimizar.

Al realizar la simulación se ha estimado que el tiempo de impresión es de aproximadamente 4 horas.

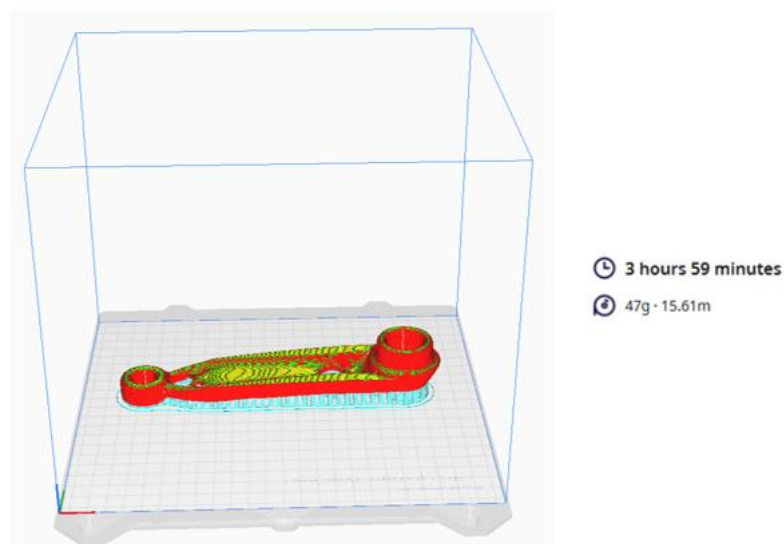


Ilustración 86: Simulación de impresión 3D en PLA del prototipo optimizado. Fuente propia.

El resultado obtenido tras la impresión en PLA de la biela optimizada topológicamente se muestra en las siguientes imágenes:

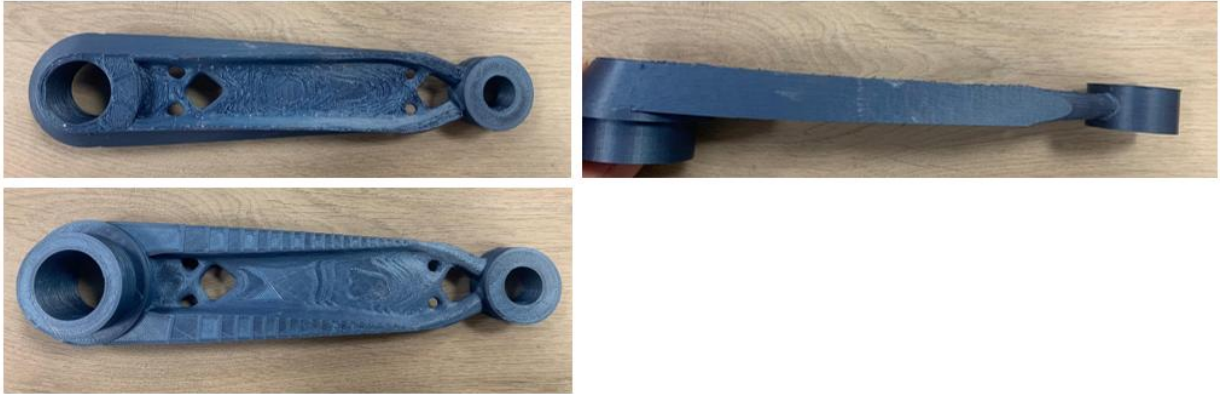


Ilustración 87: Resultado impresión 3D en PLA de biela optimizada topológicamente. Fuente propia.

Se puede observar que el acabado superficial del modelo tiene rugosidades e imperfecciones. Por ello, se ha decidido realizar la impresión del mismo modelo empleando una tecnología diferente: impresión por fusión de lecho de polvo. En este caso, el software utilizado es Autodesk Netfab.

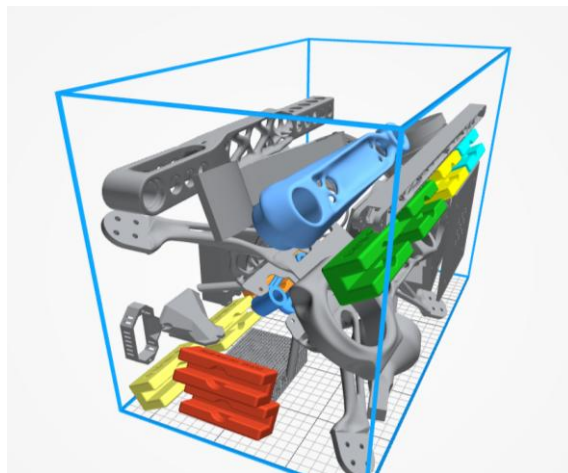


Ilustración 88: Pieza dentro de zona de impresión Autodesk Netfab. Fuente propia.

De esta forma, se observa que los resultados obtenidos utilizando la impresión en polvo tienen un acabado superficial mejor.



Ilustración 89: Resultado impresión 3D en polvo de biela optimizada topológicamente. Fuente propia.

#### ***4.8.1.3 Fabricación aditiva del modelo desechable***

El modelo desechable se ha impreso en la impresora 3D Prusa I3KS/MK3S+. En este caso se han realizado dos impresiones en distintos materiales: en PLA y el Moldlay.

La orientación que se ha seleccionado para minimizar el material de soporte es la mostrada a continuación.

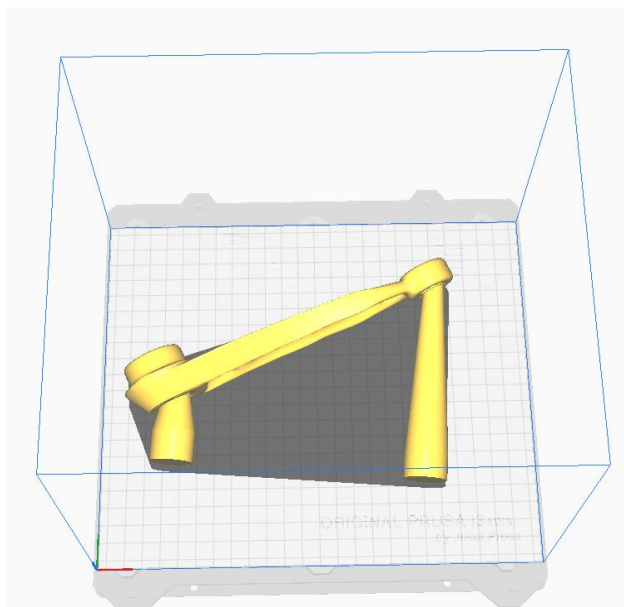
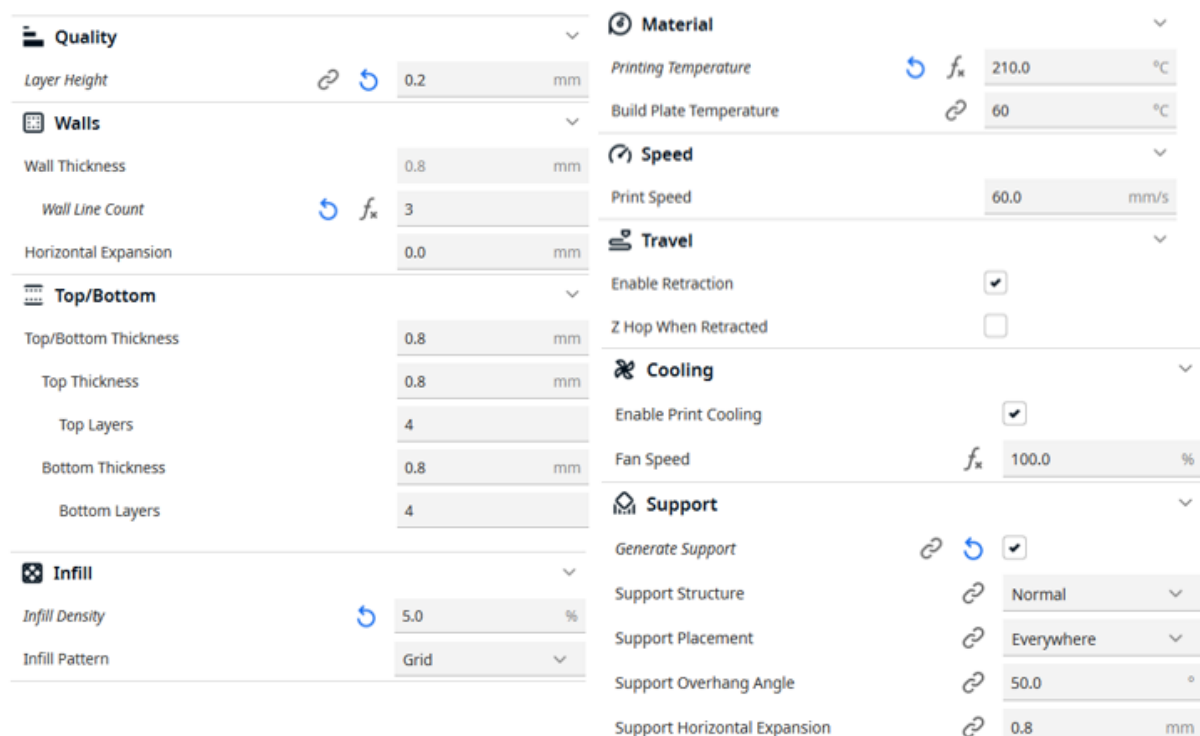


Ilustración 90: Orientación de modelo desechable. Fuente propia.

Los ajustes de impresión seleccionados son distintos según el material utilizado.

En el caso de fabricación con PLA el único parámetro modificado ha sido el “Infill”. En los prototipos este parámetro se ha ajustado al 20%, sin embargo, para el modelo desechable se ha ajustado al 5%.

En la impresión con Moldlay además de ajustar el Infill a un 5% se ha disminuido la velocidad del ventilador a un 70% para mejorar la adhesión entre capas.



| Section       | Parameter                    | Value                               | Unit |
|---------------|------------------------------|-------------------------------------|------|
| Quality       | Layer Height                 | 0.2                                 | mm   |
|               | Wall Thickness               | 0.8                                 | mm   |
|               | Wall Line Count              | 3                                   |      |
|               | Horizontal Expansion         | 0.0                                 | mm   |
| Top/Bottom    | Top/Bottom Thickness         | 0.8                                 | mm   |
|               | Top Thickness                | 0.8                                 | mm   |
|               | Top Layers                   | 4                                   |      |
|               | Bottom Thickness             | 0.8                                 | mm   |
| Bottom Layers | Bottom Layers                | 4                                   |      |
|               | Infill Density               | 5.0                                 | %    |
| Infill        | Infill Pattern               | Grid                                |      |
|               | Printing Temperature         | 210.0                               | °C   |
| Material      | Build Plate Temperature      | 60                                  | °C   |
|               | Print Speed                  | 60.0                                | mm/s |
| Speed         | Enable Retraction            | <input checked="" type="checkbox"/> |      |
|               | Z Hop When Retracted         | <input type="checkbox"/>            |      |
| Travel        | Enable Print Cooling         | <input checked="" type="checkbox"/> |      |
|               | Fan Speed                    | 100.0                               | %    |
| Cooling       | Generate Support             | <input checked="" type="checkbox"/> |      |
|               | Support Structure            | Normal                              |      |
|               | Support Placement            | Everywhere                          |      |
|               | Support Overhang Angle       | 50.0                                | °    |
|               | Support Horizontal Expansion | 0.8                                 | mm   |

Ilustración 91: Ajustes impresión modelo desechable en PLA. Fuente propia.

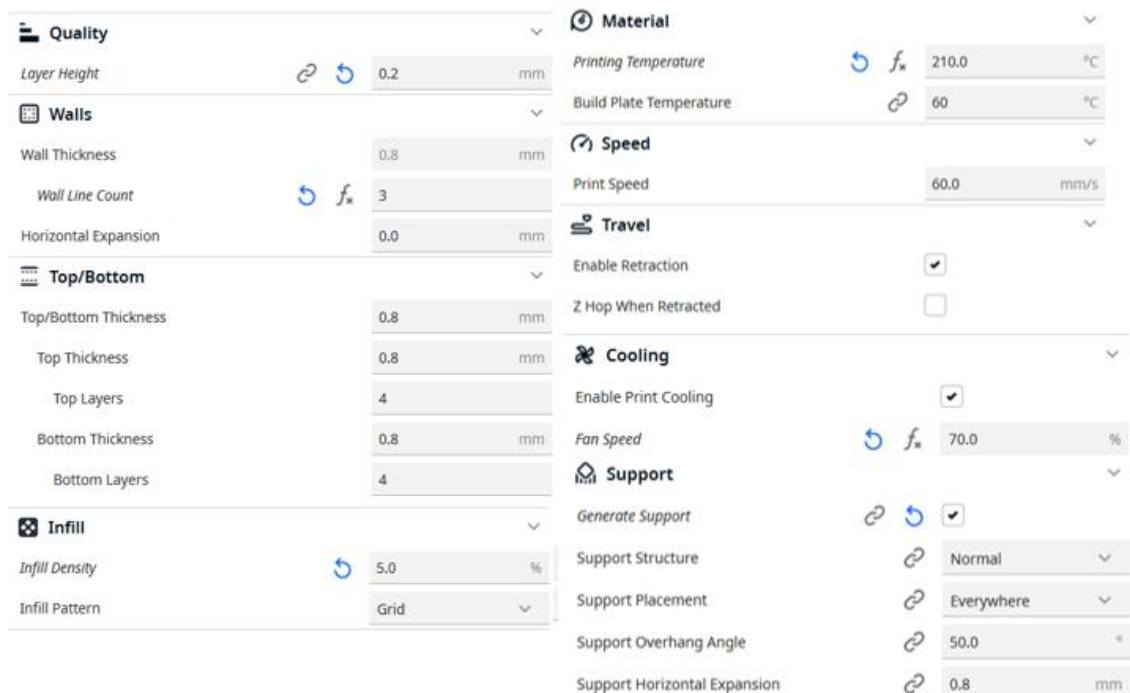


Ilustración 92: Ajustes impresión modelo desechable en Moldlay. Fuente propia.

Con los parámetros establecidos se ha realizado la simulación de impresión obteniéndose los siguientes resultados:

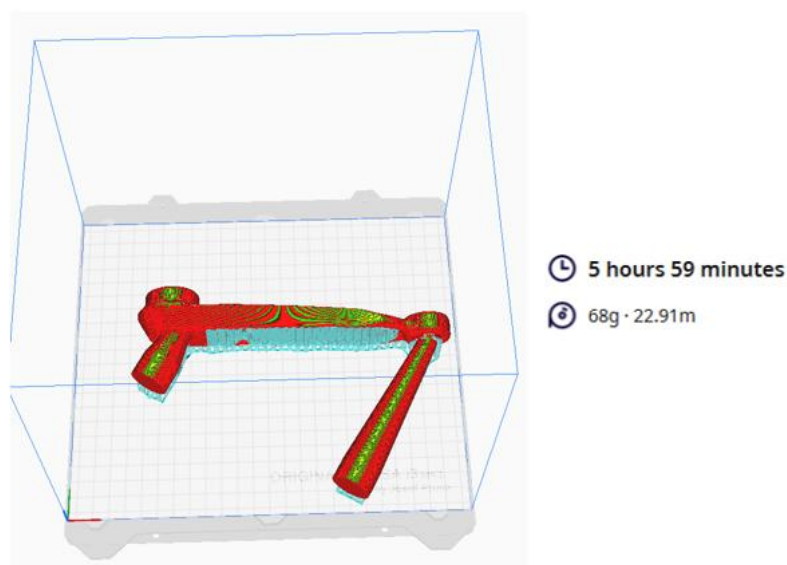


Ilustración 93: Impresión 3D en PLA del modelo desechable. Fuente propia.

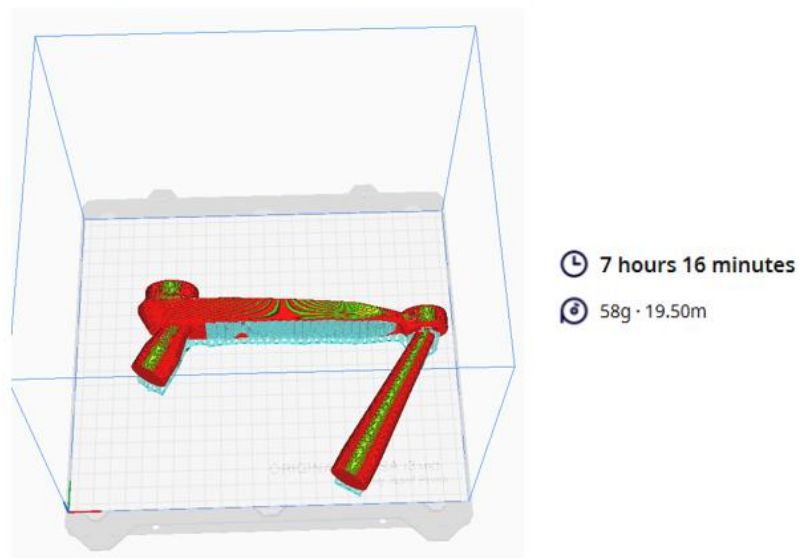


Ilustración 94: Impresión 3D en Moldlay del modelo desechable. Fuente propia.

Los resultados de la impresión se muestran en las fotografías a continuación.



Ilustración 95: Resultado impresión 3D del modelo desechable en PLA. Fuente propia.





Ilustración 96: Resultado impresión 3D del modelo desechable en Moldlay. Fuente propia.

#### ***4.8.1.4 Fabricación aditiva de la base del molde***

Para el proceso de fundición al modelo perdido es necesario diseñar e imprimir una base que actúe como soporte del molde. Es necesario que esta base cuente con unos soportes para los bebederos del modelo desechable.

Se selecciona la impresora y el material que se va a utilizar para la impresión 3D de la base del molde: Prusa I3KS/MK3S+ en PLA genérico. Además, se seleccionan los siguientes ajustes de impresión:

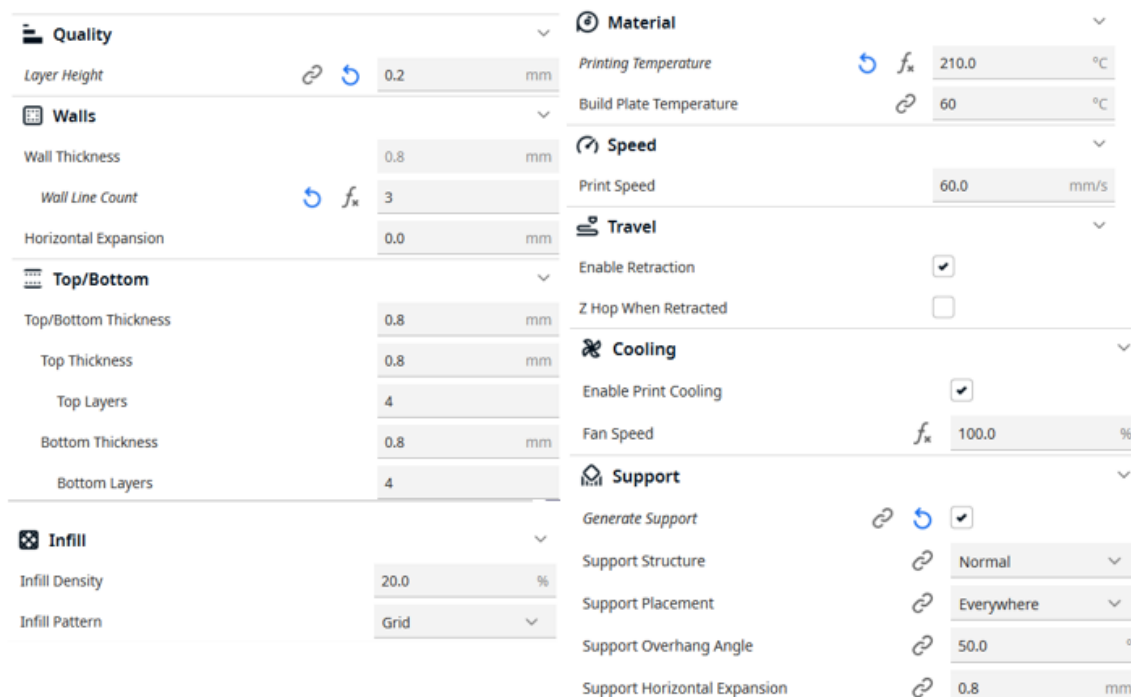


Ilustración 97: Ajustes impresión tapa del molde. Fuente propia.

Con dichos ajustes el resultado de simulación de impresión 3D obtenido es el siguiente:

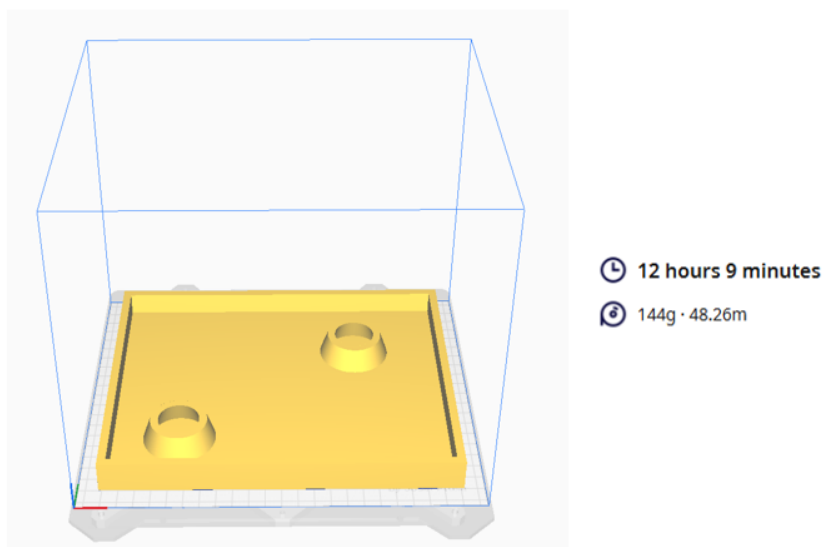


Ilustración 98: Impresión 3D de la base. Fuente propia.



A continuación, se muestra el modelo obtenido al realizar la impresión:



Ilustración 99: Resultado impresión 3D de la base del molde. Fuente propia.

## 4.8.2 FUNDICIÓN AL MODELO PERDIDO

### 4.8.2.1 Aplicación del revestimiento cerámico

Una vez conseguidos el modelo con bebedero y respiradero, y la base con los soportes mediante impresión 3D en PLA, se aplica un revestimiento cerámico para crear un molde.

Los pasos seguidos para la aplicación del revestimiento cerámico son:

1. Introducir el bebedero y respiradero en los soportes de la base, encajar la jaula metálica en la base y forrarla con cinta. Se debe asegurar que haya cierto margen de distancia entre el modelo y la jaula para que el molde cerámico no se parta. Además, se forra el conjunto con cinta para asegurar que la mezcla acuosa quede contenida hasta secarse.



Ilustración 100: Jaula forrada de cinta. Fuente propia.

2. Mezclar el revestimiento cerámico con agua. Se ha utilizado el revestimiento ARGENTUM investment siguiendo las cantidades especificadas por el fabricante. En este caso, la jaula utilizada tiene dimensiones 17x21x14 cm por lo que se ha mezclado 6,25 kg de polvo con 2,5 litros de agua. Se ha mezclado durante unos minutos hasta asegurar que la mezcla era homogénea y sin burbujas.

**PIEZAS DE FUNDICIÓN GRANDES = 39/100 WP (anillos para hombres o piezas con partes gruesas)**

[Volumen (cm<sup>3</sup>) x 1,25 gr]/1000 = \_\_\_\_\_ kgs. de polvo    Volumen x 0,488 ml = \_\_\_\_\_ ml. de agua

**PIEZAS DE FUNDICIÓN NORMALES = 40/100 WP (anillos para mujeres)**

[Volumen (cm<sup>3</sup>) x 1,23 gr]/1000 = \_\_\_\_\_ kgs. de polvo    Volumen x 0,494 ml = \_\_\_\_\_ ml. de agua

**PIEZAS DE FUNDICIÓN DELICADAS = 42/100 WP (piezas pequeñas y filigranas)**

[Volumen (cm<sup>3</sup>) x 1,20 gr]/1000 = \_\_\_\_\_ kgs. de polvo    Volumen x 0,506 ml = \_\_\_\_\_ ml. de agua

Ilustración 101: cantidades de polvo y agua para revestimiento cerámico ARGENTUM investment [22].

3. Verter la mezcla cerámica en la jaula. Se ha vertido la mezcla sobre el modelo hasta llenar por completo el molde. A continuación, el molde se guarda durante 24 horas para asegurar que se seque por completo.

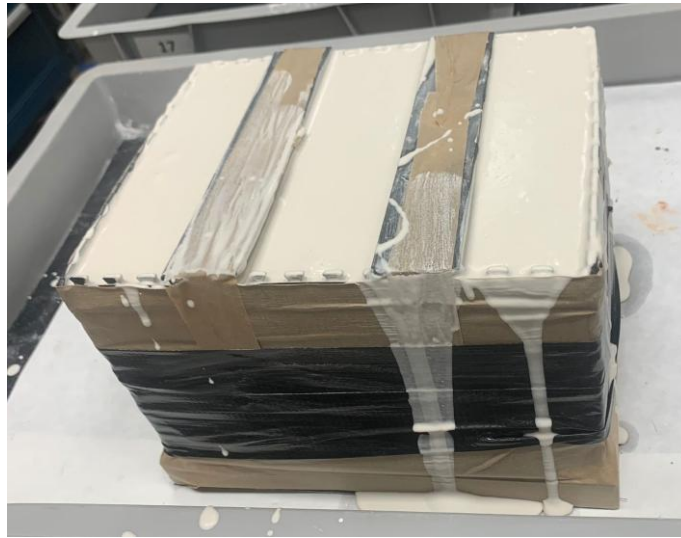


Ilustración 102: Vertido de revestimiento cerámico. Fuente propia.

#### ***4.8.2.2 Compactación y secado en el horno***

Al día siguiente, una vez seco el molde, se ha retirado la tapa y se ha introducido la jaula y cerámica en el horno. Para permitir la salida del material del modelo volatilizado se orienta con el bebedero y respiradero hacia abajo.

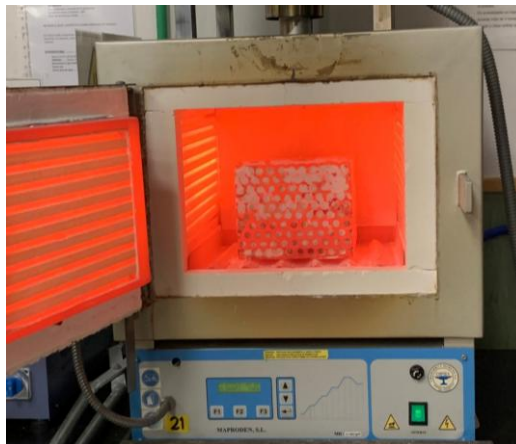


Ilustración 103: Molde cerámico en el horno. Fuente propia.

En el horno, se aplica una rampa de temperatura concreta para garantizar la correcta eliminación del material del modelo y la disminución del choque térmico al realizar la colada de aluminio.

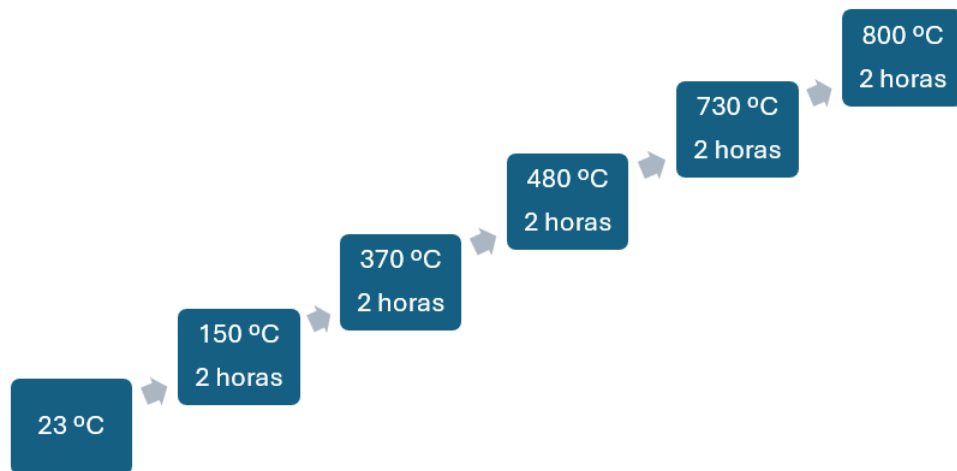


Figura 6: Rampa de temperaturas. Fuente propia.

Finalmente, se saca el molde del horno y se comprueba que no quede material del modelo en su interior. En caso de quedar restos de material en el interior se puede aplicar aire en presión tras unos minutos de enfriamiento.



Ilustración 104: Molde cerámico tras rampa de temperatura. Fuente propia.

#### 4.8.2.3 Colada

Tras obtener el molde cerámico con la cavidad correspondiente al modelo, se prepara el aluminio para la fundición. Se introducen lingotes de aluminio en el horno y se eleva la temperatura hasta alcanzar su punto de fusión. En este caso, a pesar de tener un punto de



fusión de 660°C se ha aplicado una temperatura de 800°C para evitar un enfriamiento demasiado rápido.

Al sacar el aluminio fundido del molde, se eliminan las impurezas y se vierte por el bebedero hasta que rebose. Se ha elegido como bebedero el que llega más abajo con el objetivo de que el metal líquido llegue con la mayor velocidad posible facilitando el llenado del molde.



Ilustración 105: Colada. Fuente propia.

Después de realizar la colada, se espera hasta que el metal fundido se enfríe. Además, se ha utilizado una cámara térmica para vigilar el proceso de enfriamiento.



Ilustración 106: Enfriamiento de la colada. Fuente propia.

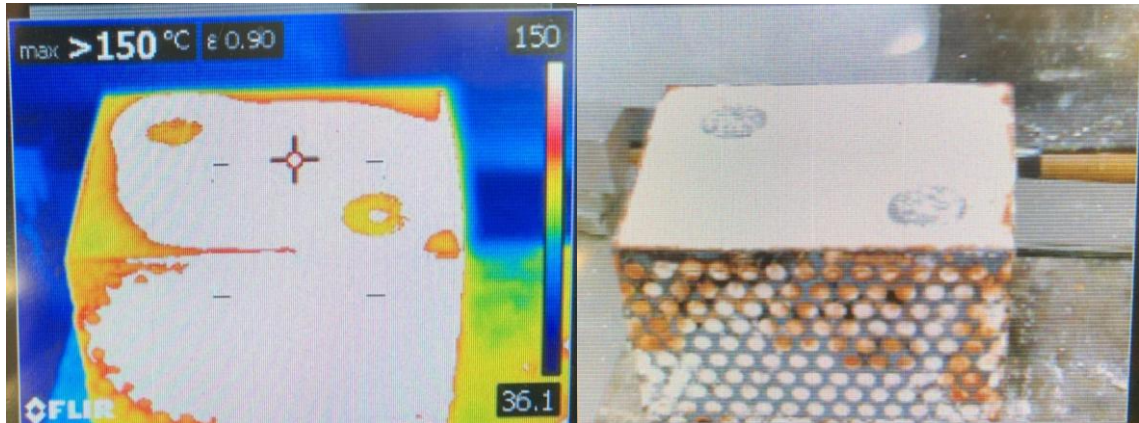


Ilustración 107: Enfriamiento visto desde cámara térmica. Fuente propia.

El último paso es la ruptura del molde. Para ello, se introduce el molde en un cubo con agua y debido al choque térmico se deshace quedando la pieza de aluminio liberada.



Ilustración 108: Eliminación de molde cerámico. Fuente propia.

La pieza obtenida es la siguiente:



Ilustración 109: Pieza obtenida por fundición al modelo perdido. Fuente propia.

#### ***4.8.2.4 Recorte de bebederos y limpieza de la pieza***

Como se puede observar en la Ilustración 109, la pieza que se obtiene incluye el bebedero y respiradero. Estos canales de alimentación se deben eliminar, ya que no forman parte de la geometría final de la pieza. Para ello se puede utilizar una sierra para el corte de los bebederos y una lija para pulir las rugosidades restantes. Además, se debe realizar un taladrado de los agujeros en ambos extremos de la biela, ya que han quedado tapados por los canales de alimentación.

## Capítulo 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 5.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS Y COMPARATIVA

En la Ilustración 110 se muestran los resultados obtenidos antes y después de la optimización topológica, y los resultados de la fundición al modelo perdido de la biela optimizada.



Ilustración 110: Comparativa biela original, optimizada y fundida. Fuente propia.

La biela antes de la optimización tenía una masa de 281g. Después del proceso de optimización topológica su masa se reduce en un 41%, es decir, pasa a tener una masa de 166g y sigue cumpliendo con los requisitos estructurales establecidos.

Además, después de realizar la optimización topológica se ha llevado a cabo un proceso de fundición al modelo perdido para buscar una alternativa más económica frente a la impresión 3D metálica.

La geometría general se ha obtenido correctamente, ya que se han mantenido la forma y el volumen previstos y las dimensiones prácticamente no se han visto modificadas. Además, la fundición del metal es buena, ya que no hay grietas en la pieza. También destaca la precisión en los detalles en uno de los extremos de la biela.





Ilustración 111: Detalle de precisión de la fundición. Fuente propia.

Sin embargo, también presenta defectos como rugosidades provocadas por el molde cerámico y la falta de llenado en la zona interior de uno de los extremos.



Ilustración 112: Detalle de rugosidad y falta de llenado. Fuente propia.

## 5.2 ESTUDIO DE VIABILIDAD ECONÓMICA DEL PROYECTO

En este proyecto se pretende encontrar una alternativa más económica a la impresión 3D metálica. En el análisis económico del proyecto se analizarán los costes de prototipado, los costes de impresión 3D metálica y los costes de fabricación por fundición al modelo perdido.

### 5.2.1 COSTES DE PROTOTIPADO

En el proyecto se han fabricado dos prototipos: el prototipo de la biela sin optimizar y el prototipo de la biela optimizada y refinada.

| 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)                             |                   | <b>0,48</b>      |
| Precio Hora venta-público (€/h)                                    |                   | <b>0,72</b>      |
| 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)           |                   | 25               |
| PIEZA pedal-biela sin optimizar - Orientación HORIZONTAL           |                   |                  |
| CONCEPTOS PRESUPUESTADOS                                           | Opción Sólido     | Costes parciales |
| Material modelo (g)                                                | <b>51,00</b>      | 1,24 €/ud        |
| Soporte modelo (g)                                                 | <b>0,00</b>       | 0,00 €/ud        |
| Tiempo modelo (h)                                                  | <b>3,90</b>       | 2,82 €/ud        |
| Piezas por bandeja (ud)                                            | <b>1,00</b>       | 0,20 €/ud        |
| Tiempo técnico-analista (h)                                        | <b>0,50</b>       | 12,50 €          |
| Cantidad de piezas                                                 | <b>1,00</b>       |                  |
| <b>Coste unitario (€) en ICAI + IVA</b>                            | <b>16,76 €/Ud</b> |                  |
| <b>Coste total (€) en ICAI + IVA</b>                               | <b>16,76 €</b>    |                  |

Tabla 5: Análisis de costes de impresión 3D de biela sin optimizar. Fuente propia.

| 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)           | 25            |                  |
| PIEZA pedal-biela optimizada y refinada- Orientación HORIZONTAL    |               |                  |
| CONCEPTOS PRESUPUESTADOS                                           | Opción Sólido | Costes parciales |
| Material modelo (g)                                                | 47,00         | 1,14 €/ud        |
| Soporte modelo (g)                                                 | 0,00          | 0,00 €/ud        |
| Tiempo modelo (h)                                                  | 3,98          | 2,88 €/ud        |
| Piezas por bandeja (ud)                                            | 1,00          | 0,20 €/ud        |
| Tiempo técnico-analista (h)                                        | 0,50          | 12,50 €          |
| Cantidad de piezas                                                 | 1,00          |                  |
| Coste unitario (€) en ICAI + IVA                                   | 16,73 €/Ud    |                  |
| Coste total (€) en ICAI + IVA                                      | 16,73 €       |                  |

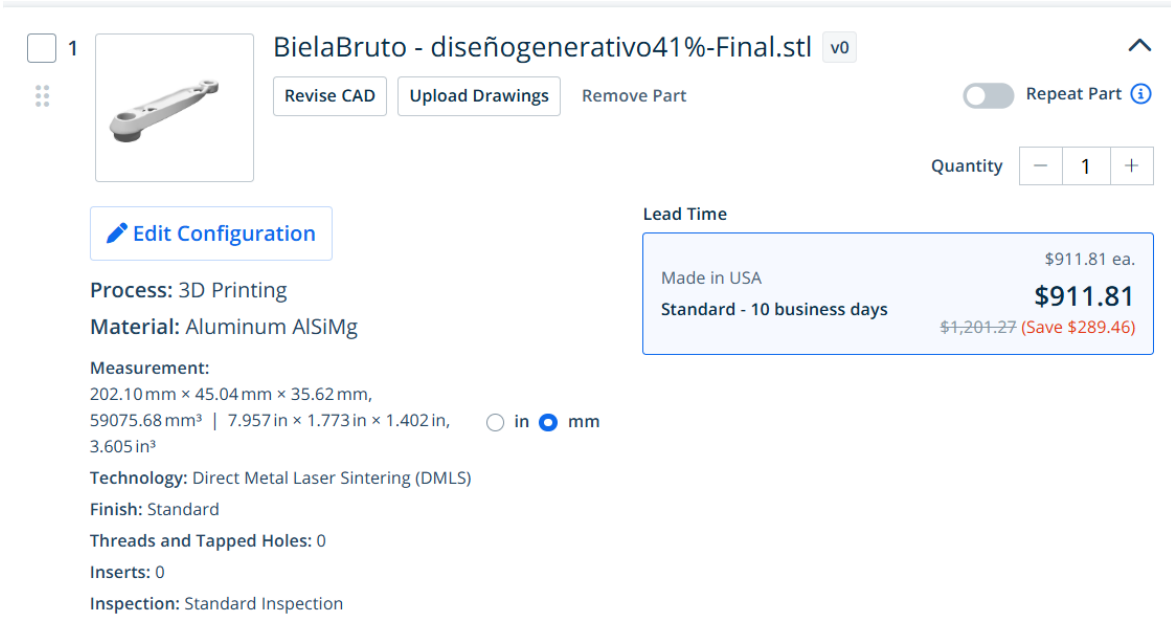
Tabla 6: Análisis de costes de impresión 3D FDM de biela optimizada. Fuente propia.

| ANALISIS DE COSTES PARA PROTOTIPADO DE PIEZAS EN IMPRESORA 3D -HP 580 |               |                  |
|-----------------------------------------------------------------------|---------------|------------------|
| DATOS AMORTIZACIÓN MÁQUINA                                            |               |                  |
| Precio máquina (€)                                                    | 80.000        |                  |
| Coste mantenimiento anual (€)                                         | 2.000         |                  |
| Años de amortización                                                  | 5             |                  |
| Días impresión/año                                                    | 48            |                  |
| Impresiones/día                                                       | 0,5           |                  |
| Precio impresión (€)                                                  | 765,31        |                  |
| Precio Impresión venta-público (€)                                    | 765,31        |                  |
| DATOS COSTE MATERIAL                                                  |               |                  |
| Coste material: (€/kg)                                                | 141,00        |                  |
| Coste material: (€/cc)                                                | 0,15          |                  |
| Volumen Total (cc)                                                    | 1560,00       |                  |
| Densidad de Empaquetado                                               | 10,00%        |                  |
| DATOS COSTE TÉCNICO ANALISTA                                          |               |                  |
| Coste técnico analista del modelo - inc. limpieza (€/h)               | 20            |                  |
| PIEZA pedal-biela optimizada y refinada - Orientación HORIZONTAL      |               |                  |
| CONCEPTOS PRESUPUESTADOS                                              | Opción Solido | Costes parciales |
| Material modelo (cc)                                                  | 113,91        | 16,91 €/ud       |
| Impresión                                                             | -             | 558,82 €/ud      |
| Tiempo técnico-analista (h)                                           | 0,50          | 10,00 €/ud       |
| Tiempo Limpieza (h)                                                   | 0,50          | 10,00 €/ud       |
| Cantidad de piezas                                                    | 1,00          |                  |
| Coste unitario (€) en ICAI + IVA                                      | 595,72 €/Ud   |                  |
| Coste total (€) en ICAI + IVA                                         | 595,72 €      |                  |

Tabla 7: Análisis de costes de impresión 3D fusión en lecho de polvo de biela optimizada. Fuente propia.

## 5.2.2 COSTES DE FABRICACIÓN POR IMPRESIÓN 3D METÁLICA

Para la estimación de los costes de impresión 3D metálica del modelo optimizado se ha utilizado Xometry [23].



The screenshot displays the Xometry interface for a 3D printing job. The part is named "BielaBruto - diseñogenerativo41%-Final.stl" (v0). It is a 3D model of a mechanical part. The interface includes buttons for "Revise CAD", "Upload Drawings", and "Remove Part". A "Repeat Part" toggle is set to "Off". The quantity is set to 1. The process is "3D Printing" and the material is "Aluminum AlSiMg". The measurement is 202.10 mm x 45.04 mm x 35.62 mm, 59075.68 mm³, 7.957 in x 1.773 in x 1.402 in. 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 lead time is "Standard - 10 business days". The cost is \$911.81 ea. (Save \$289.46).

Ilustración 113: Estimación de coste de impresión 3D metálica de biela optimizada y refinada. Fuente propia.

Al realizar el cambio de moneda a euros, el coste de la impresión 3D metálica resulta en 782,97€.

## 5.2.3 COSTES DE FABRICACIÓN POR FUNDICIÓN AL MODELO PERDIDO

En este proyecto se ha empleado la fundición al modelo perdido como alternativa más económica frente a la impresión 3D metálica.

Primero se ha realizado un análisis de los costes de impresión del modelo desechable y de la base del molde, y posteriormente se ha analizado el coste del proceso completo de fundición.

### 5.2.3.1 Costes de impresión 3D

| ANÁLISIS DE COSTES PARA FABRICACIÓN 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)           | 25            |                  |
| PIEZA pedal-biela modelo desechable - Orientación HORIZONTAL       |               |                  |
| CONCEPTOS PRESUPUESTADOS                                           | Opción Sólido | Costes parciales |
| Material modelo (g)                                                | 68,00         | 1,65 €/ud        |
| Soporte modelo (g)                                                 | 0,00          | 0,00 €/ud        |
| Tiempo modelo (h)                                                  | 5,98          | 4,33 €/ud        |
| Piezas por bandeja (ud)                                            | 1,00          | 0,20 €/ud        |
| Tiempo técnico-analista (h)                                        | 0,50          | 12,50 €          |
| Cantidad de piezas                                                 | 1,00          |                  |
| Coste unitario (€) en ICAI + IVA                                   | 18,68 €/Ud    |                  |
| Coste total (€) en ICAI + IVA                                      | 18,68 €       |                  |

Tabla 8: Análisis de costes de impresión 3D en PLA de modelo desechable de biela. Fuente propia.

| ANÁLISIS DE COSTES PARA FABRICACIÓN 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)                             |                   | <b>0,48</b>      |
| Precio Hora venta-público (€/h)                                    |                   | <b>0,72</b>      |
| 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)           |                   | 25               |
| PIEZA Tapa Fundición Marta - Orientación HORIZONTAL                |                   |                  |
| CONCEPTOS PRESUPUESTADOS                                           | Opción Sólido     | Costes parciales |
| Material modelo (g)                                                | 144,00            | 3,49 €/ud        |
| Soporte modelo (g)                                                 | 0,00              | 0,00 €/ud        |
| Tiempo modelo (h)                                                  | 12,15             | 8,80 €/ud        |
| Piezas por bandeja (ud)                                            | 1,00              | 0,20 €/ud        |
| Tiempo técnico-analista (h)                                        | 0,50              | 12,50 €          |
| Cantidad de piezas                                                 | 1,00              |                  |
| <b>Coste unitario (€) en ICAI + IVA</b>                            | <b>24,99 €/Ud</b> |                  |
| <b>Coste total (€) en ICAI + IVA</b>                               | <b>24,99 €</b>    |                  |

Tabla 9: Análisis de costes de impresión 3D en PLA de base del molde. Fuente propia.

### 5.2.3.2 Costes de fundición al modelo perdido

| ANÁLISIS DE COSTES PARA PROTOTIPADO DE PIEZAS POR FUNDICIÓN AL MODELO PERDIDO |                 |                |                |
|-------------------------------------------------------------------------------|-----------------|----------------|----------------|
|                                                                               | Unidad          | Coste unitario | Coste estimado |
| IMPRESIÓN 3D                                                                  |                 |                |                |
| Impresión modelo biela (ud)                                                   | 1               | 18,68 €        | 18,68 €        |
| Impresión tapa fundición (ud)                                                 | 1               | 24,99 €        | 24,99 €        |
| FUNDICIÓN AL MODELO PERDIDO                                                   |                 |                |                |
| Revestimiento ARGENTUM investment (kg)                                        | 6,25            | 2,10 €         | 13,13 €        |
| Aluminio 6061-T6 (kg)                                                         | 0,24            | 5,00 €         | 1,20 €         |
| Horno (KWh)                                                                   | 26,25           | 0,20 €         | 5,25 €         |
| Mano de obra (colada y limpieza) (h)                                          | 12              | 15,00 €        | 180,00 €       |
| <b>COSTE UNITARIO</b>                                                         | <b>243,26 €</b> |                |                |
| <b>COSTE TOTAL</b>                                                            | <b>243,26 €</b> |                |                |

Tabla 10: Análisis de costes de fundición al modelo perdido de la biela optimizada. Fuente propia.

## Capítulo 6. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

### 6.1 CONCLUSIONES DEL PROYECTO

En este proyecto se ha realizado un proceso completo de optimización topológica de una biela, desde su concepción mediante diseño generativo hasta su fabricación mediante fundición al modelo perdido. A continuación, se presentan las conclusiones sacadas del proyecto:

- La optimización topológica ha permitido reducir la masa de una biela convencional, logrando un diseño un 41% más ligero sin comprometer su resistencia estructural.
- El diseño generativo permite una redistribución más eficiente del material dentro de un volumen establecido.
- La preservación de regiones en el proceso de diseño generativo es imprescindible. Es necesario designar las zonas que se quieren conservar, en este caso el área alrededor de los agujeros, para asegurar que no se elimina material de esas regiones durante las iteraciones.
- El refinado de la geometría minimiza la concentración de tensiones con el suavizado de aristas y de saltos súbitos en la pieza. Es un proceso que ayuda a eliminar las irregularidades obtenidas tras la creación de una pieza por diseño generativo.
- La geometría de los bebederos y la posición en la que se sitúan es fundamental para obtener una calidad óptima en el proceso de fundición. El posicionamiento de la pieza de manera inclinada para la creación del molde ha facilitado el llenado de las zonas más complejas.
- La fabricación aditiva es una herramienta útil para la fabricación de prototipos y de modelos para fundición.
- El uso de materiales que se volatilicen a altas temperaturas ha asegurado la obtención de un molde limpio, sin restos del modelo, tras la rampa de temperatura.



- El uso de soportes en la impresión 3D es necesario para imprimir geometrías que contengan voladizos. La correcta eliminación de estos soportes tras la impresión aporta calidad a la pieza.
- La tapa diseñada para la fundición al modelo perdido debe encajar perfectamente con los bebederos y con la jaula metálica. Esto permite la contención de la mezcla cerámica acuosa y la obtención de un molde preciso.
- Para realizar la colada la mejor opción es seleccionar el bebedero que se encuentre más abajo, para que el fluido gane velocidad.

Finalmente, después de realizar el proyecto, se puede afirmar que la fundición al modelo perdido es una alternativa de fabricación válida frente a la impresión 3D metálica. La fundición al modelo perdido permite la obtención de geometrías complejas de manera precisa y a un coste inferior que la impresión 3D metálica, siendo el coste de estas 241,30€ y 782,97€ respectivamente.

## **6.2 LIMITACIONES ENCONTRADAS**

Las limitaciones encontradas a lo largo del proyecto son las siguientes:

- La fundición al modelo perdido presenta muchos factores que tener en cuenta que hace que los resultados puedan ser imprevisibles.
- Las dimensiones de la pieza han hecho que sólo se pueda fabricar una pieza por cada molde.
- Tiempo de fabricación elevado. La impresión 3D y la fundición al modelo perdido requieren largos tiempos de fabricación.

## **6.3 PROPUESTAS PARA TRABAJOS FUTUROS**

A partir de los resultados obtenidos en este proyecto se proponen las siguientes mejoras para mejorar el proceso y los resultados:

- En este proyecto la fabricación del modelo desechable se ha realizado en PLA. Se propone la impresión 3D en materiales castables como el Moldlay o el PolyCast. Estos reducirían el riesgo de porosidades en la pieza obtenida por fundición.
- Estudiar configuraciones alternativas de los canales de alimentación y del posicionamiento del modelo para la creación del molde.

## Capítulo 7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, «Objetivos de Desarrollo Sostenible». [En línea]. Disponible en: <https://www.undp.org/es/sustainable-development-goals>
- [2] J. C. Maxwell, «L. *On the calculation of the equilibrium and stiffness of frames*», *Lond. Edinb. Dublin Philos. Mag. J. Sci.*, vol. 27, n.º 182, pp. 294-299, abr. 1864, doi: 10.1080/14786446408643668.
- [3] A. G. M. Michell, «LVIII. *The limits of economy of material in frame-structures*», *Lond. Edinb. Dublin Philos. Mag. J. Sci.*, vol. 8, n.º 47, pp. 589-597, nov. 1904, doi: 10.1080/14786440409463229.
- [4] M. P. Bendsøe y N. Kikuchi, «Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method», *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, vol. 71, n.º 2, pp. 197-224, nov. 1988, doi: 10.1016/0045-7825(88)90086-2.
- [5] «Generative Design - CampusParty2012», 2012. [En línea]. Disponible en: [https://vimeo.com/48858267?embedded=true&source=vimeo\\_logo&owner=40097](https://vimeo.com/48858267?embedded=true&source=vimeo_logo&owner=40097)
- [6] «Personalized Cranio-Maxillofacial Solutions | Materialise». Accedido: 1 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.materialise.com/en/healthcare/personalized-solutions>
- [7] «Heydar Aliyev Centre – Zaha Hadid Architects». Accedido: 1 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.zaha-hadid.com/architecture/heydar-aliyev-centre/>
- [8] «Collection | Earthrise | Haute Couture», Iris van Herpen. Accedido: 1 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.irisvanherpen.com:443/collections/earthrise/collection>
- [9] «Synflux - A Speculative Fashion Laboratory based in Tokyo», Synflux - A Speculative Fashion Laboratory based in Tokyo. Accedido: 1 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: [https://synflux.io/projects/ac\\_beta](https://synflux.io/projects/ac_beta)
- [10] «General Motors | Generative Design in Car Manufacturing | Autodesk». Accedido: 1 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.autodesk.com/customer-stories/general-motors-generative-design>
- [11] Behance, «ROCKRIDER BABEL\_ //Master Thesis - Mathieu Petot», Behance. Accedido: 1 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: [https://www.behance.net/gallery/182419975/ROCKRIDER-BABEL\\_-Master-Thesis](https://www.behance.net/gallery/182419975/ROCKRIDER-BABEL_-Master-Thesis)
- [12] M. P. Bendsøe y O. Sigmund, *Topology optimization: theory, methods and applications*, Nouv. ed. révisée et augm. Berlin: Springer, 2003.
- [13] FormLabs, «Topology Optimization 101: How to Use Algorithmic Models to Create Lightweight Design». [En línea]. Disponible en: <https://formlabs.com/blog/topology-optimization/>
- [14] O. C. Zienkiewicz, R. L. Taylor, y J. Z. Zhu, *The finite element method: its basis and fundamentals*, 6th ed. Burlington (Mass.): Elsevier/Butterworth-Heinemann, 2005.
- [15] A. B. Díaz Morcillo, «Meshing methods and adaptive algorithms in two and three dimensions for solving closed electromagnetic problems by means of the finite element method», Universidad Politécnica de Valencia, 2009. doi: 10.31428/10317/772.

- [16] Groover, Mikell P., *Fundamentals of modern manufacturing : materials, processes, and systems*, 5th ed. 1939.
- [17] «What is Investment Casting: Process, Materials & Applications», TEAMSWORLD. Accedido: 15 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://teamsworld.com/news/market-insight/investment-casting>
- [18] «Aluminium 6061-T6», MatWeb. [En línea]. Disponible en: <https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=b8d536e0b9b54bd7b69e4124d8f1d20a&ckck=1>
- [19] A. Y. Ismail, G. Na, y B. Koo, «Topology and Response Surface Optimization of a Bicycle Crank Arm with Multiple Load Cases», *Appl. Sci.*, vol. 10, n.º 6, p. 2201, mar. 2020, doi: 10.3390/app10062201.
- [20] impresoras3d.com, «▷ Guía de Uso: Filamento PLA para impresoras 3D», impresoras3d.com. Accedido: 15 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.impresoras3d.com/filamento-pla-consejos-caracteristicas-y-mucho-mas/>
- [21] «PolyCast™», Polymaker. Accedido: 15 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://polymaker.com/product/polycast/>
- [22] «Ransom & Randolph | ARGENTUM investments», ransom-randolph 2022. Accedido: 15 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.ransom-randolph.com/argentum-investments>
- [23] «Custom Online 3D Printing Services - 3D Printing Quote». Accedido: 15 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.xometry.com/capabilities/3d-printing-service/>

### Ficha técnica PLA:

- Propiedades destacadas**
  - 
**Temperatura de impresión**  
**190 - 210 °C**
  - 
**Diámetro de filamento**  
**1.75 / 2.85 mm**
  - 
**Densidad**  
**1,24 g/cm³**

## Ficha técnica Moldlay:

### Información general

|                         |                                                                                                                               |
|-------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Material                | PLA                                                                                                                           |
| Formato                 | 50 g / 250 g / 750 g                                                                                                          |
| Densidad                | 1.18 g/cm <sup>3</sup>                                                                                                        |
| Diámetro de filamento   | 1.75 / 2.85 mm                                                                                                                |
| Tolerancia de filamento | ± 0.1 mm                                                                                                                      |
| Longitud filamento      | (Ø1.75 mm, 0.25 kg) ±88.1 m /<br>(Ø2.85 mm, 0.25 kg) ±33.2 m /<br>(Ø1.75 mm, 0.75 kg) ±264.2 m /<br>(Ø2.85 mm, 0.75 kg) ±99.6 |

### Propiedades de impresión

|                                    |              |
|------------------------------------|--------------|
| Temperatura de impresión           | 200 - 220 °C |
| Temperatura de base/cama           | 20 °C        |
| Temperatura de cámara              | X            |
| Ventilador de capa                 | ✓            |
| Velocidad de impresión recomendada | - mm/s       |

### Propiedades mecánicas

|                           |          |
|---------------------------|----------|
| Alargamiento a la rotura  | 20 %     |
| Resistencia a la tracción | 42 MPa   |
| Módulo de tracción        | 1950 MPa |
| Resistencia a la flexión  | - MPa    |
| Módulo de flexión         | - MPa    |
| Dureza superficial        | -        |

### Propiedades térmicas

|                                 |        |
|---------------------------------|--------|
| Temperatura de fusión           | 170 °C |
| Temperatura de reblandecimiento | - °C   |
| Temperatura de reblandecimiento | 55 °C  |

### Propiedades específicas

|               |   |
|---------------|---|
| Transparencia | X |
|---------------|---|

### Otras

|                            |        |
|----------------------------|--------|
| HS Code                    | 3916.9 |
| Diámetro bobina (exterior) | 200 mm |
| Diámetro bobina (interior) | 125 mm |
| Ancho bobina               | 30 mm  |

### Propiedades destacadas



Temperatura de impresión  
200 - 220 °C



Diámetro de filamento  
1.75 / 2.85 mm



Densidad  
1.18 g/cm<sup>3</sup>

Prusa I3KS-MK3S+:

**PRUSA I3KS – MK3S+**



**PARÁMETROS TÉCNICOS**

|                                                 |                                                                                                                                                                                                          |
|-------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Volumen de Impresión</b>                     | 25×21×21 cm (9.84"×8.3"×8.3")                                                                                                                                                                            |
| <b>Altura de capa</b>                           | 0.05 - 0.35 mm                                                                                                                                                                                           |
| <b>Nozzle</b>                                   | 0.4mm por defecto, amplia gama de otros diámetros/boquillas compatibles                                                                                                                                  |
| <b>Diámetro del filamento</b>                   | 1.75 mm                                                                                                                                                                                                  |
| <b>Materiales compatibles</b>                   | Amplia gama de termoplásticos, incluyendo PLA, PETG, ASA, ABS, PC (Policarbonato), CPE, PVA/BVOH, PVB, HIPS, PP (Polipropileno), Flex, nGen, Nylon, Carbon filled, Woodfill y otros materiales rellenos. |
| <b>Velocidad máxima de desplazamiento</b>       | 200+ mm/s                                                                                                                                                                                                |
| <b>Temperatura máxima de la boquilla</b>        | 300 °C / 572 °F                                                                                                                                                                                          |
| <b>Temperatura máxima de la base</b>            | 120 °C / 248 °F                                                                                                                                                                                          |
| <b>Extrusor</b>                                 | Accionamiento directo, engranajes Bondtech, hotend E3D V6                                                                                                                                                |
| <b>Superficie de impresión</b>                  | Láminas de acero magnético desmontables(*) con diferentes acabados de superficie, base calefactable con compensación de esquinas frías                                                                   |
| <b>Dimensiones de la impresora (sin bobina)</b> | 7 kg, 50×55×40 cm; 19.6×21.6×15.7 in (X×Y×Z)                                                                                                                                                             |
| <b>Consumo de energía</b>                       | Ajustes PLA: 80W / Ajustes ABS: 120W                                                                                                                                                                     |

\* Piezas consumibles, como las láminas de PEI (lisas, texturizadas, etc.) no están cubiertas por la garantía, ya que los recubrimientos están diseñados para disminuir con el tiempo a menos que se haya producido un fallo debido a un defecto en los materiales o la mano de obra. El daño cosmético, que incluye, entre otros, rasguños, abolladuras, grietas, u otros daños cosméticos tampoco está cubierto por la garantía. Solo las láminas defectuosas a la llegada están cubiertas por la garantía.

HP 580 C:

## HP 580C



### Información técnica

#### Impresora 3D HP Jet Fusion 580 Color

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



Aleaciones de aluminio para fundición:

### ALEACIONES DE ALUMINIO PARA FUNDICIÓN

| Designación Corta                         |                                    | L-2520       | L-2521        | L-2530       | L-2551       | L-2560       | L-2561          | L-2570       | L-2610       | L-2620       | L-2630         | L-2631        | L-2640         | L-2651       |
|-------------------------------------------|------------------------------------|--------------|---------------|--------------|--------------|--------------|-----------------|--------------|--------------|--------------|----------------|---------------|----------------|--------------|
| Densidad a 20 °C                          | Kg / dm <sup>3</sup>               | 2,65         | 2,63          | 2,67         | 2,7          | 2,68         | 2,65            | 2,68         | 2,75         | 2,79         | 2,75           | 2,70          | 2,67           | 2,68         |
| Intervalo de fusión                       | °C                                 | 575 a 585    | 570 a 585     | 570 a 590    | 535 a 565    | 555 a 590    | 555 a 585       | 555 a 625    | 515 a 615    | 515 a 610    | 510 a 610      | 510 a 610     | 525 a 580      | 555 a 615    |
| Contracción al solidificar                | %                                  | 1,1          | 1,1           | 1,1          | 1,2          | 1,2          | 1,2             | 1,3          | 1,3          | 1,3          | 1,2            | 1,2           | 1,1            | 1,2          |
| Coefficiente de dilatación                | x 10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> | 20,0         | 20,5          | 20,0         | 19,5         | 20,0         | 21,0            | 23,0         | 21,0         | 21,5         | 21,5           | 21,5          | 20,0           | 21,5         |
| Conductividad térmica                     | W / m x K                          | 146 a 167    | 125           | 146 a 163    | 117 a 154    | 138 a 159    | 125             | 146 a 180    | 125 a 159    | 113 a 125    | 109            | 109           | 138            | 151 a 167    |
| Conductividad eléctrica                   | mW x cm <sup>2</sup> / cm          | 4,5 a 5,0    | 5,5           | 4,4 a 5,0    | 5,0 a 6,0    | 4,5 a 5,0    | 5,5             | 4,5 a 5,3    | 4,5 a 6,0    | 5,5 a 6,5    | 7,5            | 7,5           | 5,2            | 4,0 a 4,8    |
| Resistencia a la tracción, R <sub>m</sub> | N / mm <sup>2</sup>                | 150 a 170    | 170           | 150 a 170    | 190 a 270    | 160 a 250    | 180             | 125 a 250    | 130 a 280    | 145 a 160    | 170            | 170           | 180            | 140 a 260    |
| Límite elástico, R <sub>p0,2</sub>        | N / mm <sup>2</sup>                | 70 a 80      | -             | 80 a 90      | -            | 80 a 200     | -               | 80 a 180     | 70 a 230     | 80 a 90      | 100            | 100           | -              | 80 a 220     |
| Módulo elástico                           | N / mm <sup>2</sup>                | 75.000       | 75.000        | 75.000       | 76.000       | 75.000       | 75.000          | 72.000       | 72.000       | 72.000       | 72.500         | 72.500        | 76.000         | 72.600       |
| Alargamiento                              | %                                  | 4 a 5        | 2             | 1 a 2        | -            | 2 a 3,5      | 1               | 1 a 2        | 1 a 2        | 1            | 1              | 1             | 1              | 1 a 2,5      |
| Dureza Brinell                            | -                                  | 50 a 55      | -             | 50 a 55      | 80 a 125     | 60 a 90      | -               | 55 a 95      | 65 a 100     | 70 a 75      | 75             | 75            | -              | 50 a 90      |
| Designación simbólica                     |                                    | Al-12Si      | Al-12SiCuFe   | Al-12SiCu    | Al-10SiNi    | Al-12SiMg    | Al-10SiMgFe     | Al-5SiMg     | Al-5Si3Cu    | Al-6Si4Cu    | Al-9Si3Cu3ZnFe | Al-9Si3CuZnFe | Al-12Si2Cu     | Al-7SiMg     |
| Si                                        | %                                  | 13,5<br>10,5 | 13,5<br>11,0  | 13,5<br>10,5 | 13,0<br>11,0 | 10,5<br>9,0  | 11,0<br>9,0     | 5,5<br>4,0   | 6,0<br>4,0   | 7,5<br>5,5   | 11,0<br>8,0    | 11,0<br>8,0   | 13,0<br>11,0   | 7,5<br>6,5   |
| Fe                                        | %                                  | 0,65         | 1,3           | 0,80         | 0,80         | 0,60         | 1,0             | 0,60         | 0,80         | 1,3          | 1,3            | 1,3           | 1,0            | 0,55         |
| Cu                                        | %                                  | 0,15         | 1,0           | 1,0          | 0,50<br>1,50 | 0,10         | 0,10            | 0,10         | 2,0<br>4,0   | 3,0<br>5,0   | 2,0<br>4,0     | 2,0<br>4,0    | 1,75<br>2,50   | 0,20         |
| Mn                                        | %                                  | 0,55         | 0,50          | 0,05<br>0,55 | 0,3          | 0,30<br>0,50 | 0,55            | 0,60         | 0,30<br>0,70 | 0,20<br>0,60 | 0,55           | 0,55          | 0,50           | 0,35         |
| Mg                                        | %                                  | 0,10         | 0,20          | 0,35         | 0,70<br>1,50 | 0,20<br>0,40 | 0,20<br>0,50    | 0,50<br>0,80 | 0,15         | 0,10<br>0,30 | 0,05<br>0,55   | 0,05<br>0,55  | 0,30           | 0,20<br>0,65 |
| Ni                                        | %                                  | 0,10         | 0,50          | 0,30         | 0,50<br>1,50 | 0,10         | 0,15            | 0,10         | 0,30         | 0,30         | 0,55           | 0,55          | 0,30           | 0,15         |
| Zn                                        | %                                  | 0,15         | 0,50          | 0,55         | 0,20         | 0,10         | 0,15            | 0,10         | 0,50         | 2,00         | 3,00           | 1,20          | 1,50           | 0,15         |
| Ti                                        | %                                  | 0,20         | 0,20          | 0,20         | 0,20         | 0,10         | 0,20            | 0,20         | 0,20         | 0,20         | 0,25           | 0,25          | 0,10           | 0,05<br>0,25 |
| Pb                                        | %                                  | 0,10         | 0,15          | 0,20         | 0,10         | 0,05         | 0,15            | 0,10         | 0,10         | 0,20         | 0,35           | 0,35          | 0,15           | 0,15         |
| Sn                                        | %                                  | 0,05         | 0,10          | 0,10         | 0,10         | 0,05         | 0,05            | 0,05         | 0,05         | 0,10         | 0,25           | 0,25          | 0,10           | 0,05         |
| Al                                        | %                                  | Resto        | Resto         | Resto        | Resto        | Resto        | Resto           | Resto        | Resto        | Resto        | Resto          | Resto         | Resto          | Resto        |
| Gran Bretaña (BS) ,                       |                                    | LM 6         | -             | LM 20        | LM 13        | LM 2         | -               | LM 8         | LM 4         | LM 21        | LM 24          | -             | -              | LM 25        |
| Francia (NF) ,                            |                                    | A-S 13-Y     | -             | A-S 12-1     | A 12 UN      | A-S 10 G     | AS 10 G-Y4      | A-SAG-Y      | A-S5 U       | A-S5UZ       | AS9U3          | A-S9U3        | -              | A-S7G        |
| Alemania (DIN) ,                          |                                    | GD-ALSi12    | GD-ALSi12(Cu) | -            | -            | G-ALSi 10 Mg | GD-ALSi 10 (Cu) | G-ALSi 5 Mg  | -            | G-ALSi6Cu4   | G-ALSi9Cu3     | -             | -              | -            |
| España (UNE) , 1706-98                    |                                    | EN AC-44100  | EN AC-47100   | EN AC-47000  | EN AC-48000  | EN AC-43000  | EN AC-43400     | -            | EN AC-45200  | EN AC-45000  | EN AC-46500    | EN AC-46000   | -              | EN AC-42000  |
| (JIS) ,                                   |                                    | AC3A         | ADC 1         | AD1.1        | AC8A         | AC4A         | -               | -            | -            | AC2B         | ADC10          | ADC12         | -              | AC4C         |
| Italia (UNI) ,                            |                                    | -            | -             | -            | -            | -            | -               | -            | -            | -            | -              | -             | GD-ALSi12Cu2Fe | -            |
| Noruega (NS) ,                            |                                    | -            | -             | -            | -            | -            | -               | -            | -            | -            | -              | -             | -              | -            |
| Suecia (SIS) ,                            |                                    | -            | -             | -            | -            | -            | -               | -            | -            | -            | -              | -             | -              | -            |
| Portugal (NP) ,                           |                                    | -            | -             | -            | -            | -            | -               | -            | -            | -            | -              | -             | -              | -            |
| EEUU (AA) ,                               |                                    | 413          | -             | A413.1       | -            | -            | -               | -            | -            | -            | 380            | 383           | -              | -            |
| EEUU (ASTM) ,                             |                                    | -            | -             | -            | -            | -            | -               | -            | -            | -            | -              | -             | -              | -            |

ARGENTUM investment recubrimiento cerámico:

## ARGENTUM™ INVESTMENT



### An Economical Alternative for Casting Silver, Brass, and Bronze

ARGENTUM investment provides jewelry casters with an economical investment that reduces excess metal and watermarking defects for dependable casting results and maximum profits.

Available from Europe.

### Typical Material Properties\*

| Water/Powder Ratio                           | Water Temperature | Working Time    | Setting Time | Slump     |
|----------------------------------------------|-------------------|-----------------|--------------|-----------|
| 38 parts water to 100 parts powder by weight | 72-73°F (22-23°C) | 11-11.5 minutes | <22 minutes  | 111-117mm |

\*These results are based on the testing methods, frequency and procedures of Ransom & Randolph or its approved suppliers. The levels referenced herein are only for general guidance and do not constitute a firm specification.

### Application Instructions

1. Weigh the required amount of ARGENTUM investment. To determine the proper amount of water and powder to use per flask, use the online flask calculator located at [www.ransom-randolph.com](http://www.ransom-randolph.com) or calculate the volume of your flask ( $V = \pi r^2 h$ ) and multiply by the appropriate factor in the chart below.

|                          | W:P 38/100                 |                            | W:P 39/100                 |                            | W:P 40/100                 |                            | W:P 41/100                 |                            | W:P 42/100                 |                            |
|--------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
|                          | Per In <sup>3</sup> volume | Per cm <sup>3</sup> volume | Per In <sup>3</sup> volume | Per cm <sup>3</sup> volume | Per In <sup>3</sup> volume | Per cm <sup>3</sup> volume | Per In <sup>3</sup> volume | Per cm <sup>3</sup> volume | Per In <sup>3</sup> volume | Per cm <sup>3</sup> volume |
| <b>Investment Needed</b> |                            |                            |                            |                            |                            |                            |                            |                            |                            |                            |
| Grams                    | 21.0                       | 1.28                       | 20.7                       | 1.26                       | 20.4                       | 1.25                       | 20.1                       | 1.23                       | 19.8                       | 1.21                       |
| Pounds                   | 0.05                       |                            | 0.05                       |                            | 0.04                       |                            | 0.04                       |                            | 0.04                       |                            |
| Ounces (Weight)          | 0.74                       |                            | 0.73                       |                            | 0.72                       |                            | 0.71                       |                            | 0.70                       |                            |
| <b>Water Needed</b>      |                            |                            |                            |                            |                            |                            |                            |                            |                            |                            |
| Grams                    | 8.00                       | 0.49                       | 8.10                       | 0.49                       | 8.20                       | 0.50                       | 8.20                       | 0.50                       | 8.30                       | 0.51                       |
| Pounds                   | 0.02                       |                            | 0.02                       |                            | 0.02                       |                            | 0.02                       |                            | 0.02                       |                            |
| Fluid Ounces             | 0.28                       |                            | 0.29                       |                            | 0.29                       |                            | 0.29                       |                            | 0.29                       |                            |

2. Measure or weigh the required amount of water (1 g = 1 ml, 1 fluid oz = 29.6 ml) and place in mixing bowl.  
**Note:** Changes in temperature affect working time, to reduce variations, water and powder temperatures should be held to 72-75°F (22-24°C). Working time is defined as the time the powder is added to the water to the time the investment becomes thick.  
**Note:** Deionized water is recommended to maintain consistency of the working time.
3. Always add the preweighed quantity of investment to water. Adding the water to the powder will make it difficult to mix and will affect the working time.
4. Wet out the powder with a mixing paddle or a wire whip. This should take no more than 30 seconds.  
**Note:** If using a vacuum investment mixing unit, mix with no vacuum on slow speed until the powder is completely wetted (approximately 1 minute).



### RANSOM & RANDOLPH

3535 Briarfield Boulevard | Maumee, OH 43537 USA  
800.800.7496 | 419.865.9497 | 419.865.9997 (FAX)  
[www.ransom-randolph.com](http://www.ransom-randolph.com)



Ransom & Randolph GmbH  
Leipziger Straße 40 | 04571 Rötha Germany  
+49 342 06373999

Investing with Innovation™

## ARGENTUM™ INVESTMENT

5. Mix with mechanical mixer for 3 minutes. Good mixing is important to activate essential ingredients that make the investment perform to its fullest potential.  
**Note:** If using a vacuum investment mixing unit, start vacuum, increase mixing speed and mix for an additional 3 minutes.
6. Place the mixed investment in a vacuum chamber and apply enough vacuum to cause a rapid boil. The investment should be vacuumed until it rises and breaks. Do not exceed 2 minutes. If a longer time is required, the vacuum pump may be undersized, there may be an air leak or the vacuum system may be in need of repair.
7. Pour the vacuumed investment into and down the side of the flask. Avoid pouring it directly over the patterns to prevent wax pattern breakage. Fill flask at least 1" (2.54 cm) over pattern.  
**Note:** If using a vacuum investment mixing unit, pour the investment down along the inside of the flask allowing it to flow up, around, through and over the top row of patterns.
8. Vacuum the invested flask about 1½ minutes. Vibrating or tapping the flask during this operation will assist in releasing air bubbles from the pattern/investment interface. Release vacuum and fill the flask to the top of the metal edge. Do not overfill.  
**Note:** If using a vacuum investment mixing unit, after flasks are filled, continue to vacuum for 1½ to 2 minutes. Vibration may be applied, if available.
9. Immediately transfer the invested flask to a vibration free storage area. It is extremely important not to disturb the flask during the gloss-off phase as well as during the initial hardening process.
10. To achieve appropriate green strength, allow the investment to sit undisturbed (bench cure) for 2-6 hours.  
**Note:** If bench cure will exceed 6 hours, maintain moisture by rewetting, covering with a wet cloth and sealing in a plastic bag. This will reduce potential cracking of molds due to uneven drying.
11. After bench curing for 2-6 hours, remove the sprue base and investing collar.
12. Ideally, flasks should be loaded into a burnout oven, preheated to 300°F (150°C), button side down. Flasks should be elevated at least 1" (2.54 cm) above oven floor to allow proper air circulation and wax drainage. Do not place flasks too close to the heat source or to each other.  
**Note:** If loading into a cold oven, 300°F (150°C) temperature must be reached as fast as possible.
13. If steam dewax is used, transfer the flasks immediately from dewax into an oven preheated to 300°F (150°C). Do not allow flasks to stand at room temperature for more than 10 minutes.
14. Follow the wax burnout schedule suitable for your application.  
**Note:** Wax burnout schedules described are recommendations. Adjustments may be required for various furnace types, flask sizes and oven loading.

| Wax Burnout Schedule |                                                                 |                                                   |                                                     |                                                     |
|----------------------|-----------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
|                      |                                                                 | Flask size:<br>up to 3" x 3"<br>(7.6 cm x 7.6 cm) | Flask size:<br>up to 4" x 6"<br>(10.2 cm x 15.2 cm) | Flask size:<br>up to 4" x 8"<br>(10.2 cm x 20.3 cm) |
| Water Removal        | Ambient to 300°F (150°C) as fast as possible (can be preheated) | Hold 1 hour                                       | Hold 3 hours                                        | Hold 3 hours                                        |
| Thermal Transition   | Raise to 700°F (370°C)                                          | Raise over 1 hour<br>Hold 1 hour                  | Raise over 2 hours<br>Hold 2 hours                  | Raise over 2 hours<br>Hold 2 hours                  |
| Pattern Removal      | Raise to 1350°F (730°C)                                         | Raise over 2 hours<br>Hold 2 hours                | Raise over 2 hours<br>Hold 2 hours                  | Raise over 3 hours<br>Hold 3 hours                  |
|                      | Reduce to casting temperature and allow for stabilization       | Hold 1 hour                                       | Hold 2 hours                                        | Hold 2 hours                                        |

**Note:** Refer to the mold casting temperatures recommended by your alloy supplier.



### RANSOM & RANDOLPH

3535 Briarfield Boulevard | Maumee, OH 43537 USA  
800.800.7496 | 419.865.9497 | 419.865.9997 (FAX)  
www.ransom-randolph.com



Ransom & Randolph GmbH  
Leipziger Straße 40 | 04571 Rötha Germany  
+49 342 06373999

Investing with Innovation™