



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



ETSI Aeroespacial y Diseño Industrial

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Aeroespacial  
y Diseño Industrial

Estudio y optimización de una pieza aeronáutica a través  
de fabricación aditiva.

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Aeroespacial

AUTOR/A: Pozo Gutiérrez, Román

Tutor/a: Solano García, Lorenzo

CURSO ACADÉMICO: 2023/2024



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



ETSI Aeroespacial y Diseño Industrial

# GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL

## TRABAJO FINAL DE GRADO

---

### Estudio y optimización de una pieza aeronáutica a través de fabricación aditiva

---

AUTOR: ROMÁN POZO GUTIÉRREZ

TUTOR: LORENZO SOLANO GARCÍA

24 de julio de 2024

## Agradecimientos

En primer lugar, quisiera expresar mi más sincero agradecimiento a mi tutor, Lorenzo Solano García, por su apoyo constante y dedicación a lo largo de este proyecto. Sus conocimientos y consejos han sido fundamentales para llevar a cabo este Trabajo Final de Grado.

Agradezco también a AIDIMME por su colaboración y por facilitar unos recursos esenciales para este estudio, en concreto a Tomás, que ha sido mi mayor ayuda en todo el proceso de la elaboración del modelo final de la pieza realizada. Gracias a la contribución de AIDIMME y de Tomás, el proyecto trascendió el ámbito teórico, logrando la fabricación tangible del prototipo diseñado.

Un especial reconocimiento a mis compañeros de carrera, quienes han sido una fuente constante de apoyo, inspiración y amistad durante estos años de estudio. Finalmente, quiero expresar mi más profundo agradecimiento a mi familia y amigos. A mis padres, por su apoyo incondicional, su confianza en mí y su ayuda en cada paso de mi vida académica.

Este trabajo no habría sido posible sin el apoyo y la contribución de todas estas personas. A todos ellos, mi más sincero agradecimiento.

## Abstract

This Final Degree Project addresses the study and optimization of an aeronautical component through additive manufacturing, also known as 3D printing, exploring the possibilities offered by new manufacturing technologies in the aerospace sector. The starting point is an existing aircraft bracket, obtained from previous research in which a similar analysis was conducted. This part is originally manufactured in aluminum, and the aim is to explore the possibility of reducing its weight and associated manufacturing costs while maintaining or even improving its mechanical performance through the use of Ti6Al4V titanium alloy and additive manufacturing techniques, in this case using DED technology.

This work includes a review of the state of the art in additive manufacturing in the aeronautical industry, focusing on Selective Laser Melting (SLM) and Directed Energy Deposition (DED) technologies, as these will be compared with the values of the original part. DED will be studied throughout the work, while SLM data comes from the reference study. A topological optimization of the initial part is performed, and a new optimized version is designed for manufacturing using DED. The process includes design, finite element analysis, manufacturing, and experimental testing of the optimized part. Finally, a comparison is made between the three cases: the original design with traditional machining, the SLM-optimized design, and the DED-optimized design, to determine which of the different technologies is best depending on the specific project requirements.



## Resumen

Este Trabajo Final de Grado aborda el estudio y optimización de una pieza aeronáutica mediante fabricación aditiva, también conocida como impresión 3D, explorando las posibilidades que ofrecen las nuevas tecnologías de fabricación en el sector aeroespacial. Se parte de un soporte (bracket) de aeronave existente, obtenido de una investigación previa en la que se ha realizado un análisis similar. Esta pieza está fabricada originalmente en aluminio, y se busca la posibilidad de reducir su peso y el coste asociado a la fabricación manteniendo o incluso buscando la opción de mejorar sus prestaciones mecánicas mediante el uso de la aleación de titanio Ti6Al4V y técnicas de fabricación aditiva, en este caso mediante el uso de la tecnología DED.

Este trabajo incluye una revisión del estado del arte de la fabricación aditiva en la industria aeronáutica, centrándose en las tecnologías de Selective Laser Melting (SLM) y Directed Energy Deposition (DED), ya que son las que serán comparadas con los valores de la original, siendo el DED estudiado a lo largo del trabajo y el SLM el del estudio de referencia. Se realiza una optimización topológica de la pieza inicial y se diseña una nueva versión optimizada para ser fabricada mediante DED. El proceso incluye el diseño, análisis por elementos finitos, fabricación y ensayos experimentales de la pieza optimizada. Por último, se incluye la comparación entre los tres casos, el diseño original con mecanizado tradicional, el optimizado por SLM y el optimizado por DED, buscando cual de las diferentes tecnologías es la mejor dependiendo lo que se busque en un proyecto concreto.

# Índice

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1. Objeto</b>   | <b>9</b>  |
| <b>2. Alcance y exclusiones</b>  | <b>9</b>  |
| <b>3. Introducción</b>   | <b>10</b> |
| <b>4. Estado del arte</b>  | <b>11</b> |
| 4.1. ¿Qué es la fabricación aditiva? . . . . .                                     | 11        |
| 4.2. Historia de la fabricación aditiva . . . . .                                  | 13        |
| 4.3. Fabricación aditiva en la industria aeronáutica . . . . .                     | 14        |
| 4.4. Ejemplos de fabricación aditiva en la industria aeronáutica . . . . .         | 14        |
| 4.5. Diseño generativo . . . . .   | 16        |
| 4.6. Tecnologías de fabricación aditiva . . . . .                                  | 17        |
| 4.6.1. Tipos de tecnologías de Fabricación Aditiva . . . . .                       | 17        |
| 4.6.2. Fabricación aditiva SLM . . . . .   | 18        |
| 4.6.3. Fabricación aditiva DED . . . . .   | 20        |
| <b>5. Descripción de la pieza de referencia</b>                                    | <b>21</b> |
| <b>6. Metodología de optimización de la pieza para fabricación en DED</b>          | <b>23</b> |
| <b>7. Proceso de fabricación de la pieza y funcionamiento de la máquina de DED</b> | <b>26</b> |
| 7.1. Máquina a utilizar . . . . .  | 27        |
| 7.2. Adaptación de la pieza . . . . .  | 28        |
| <b>8. Análisis realizados en el modelo final</b>                                   | <b>32</b> |
| <b>9. Estudio económico</b>  | <b>34</b> |
| 9.1. Costes relacionados con el diseño . . . . .                                   | 34        |

|   |           |
|---|-----------|
| 9.2. Costes relacionados con la fabricación . . . . .                                       | 36        |
| 9.3. Costes indirectos . . . . .  | 37        |
| <b>10.Comparación de las diferentes tecnologías</b>   | <b>38</b> |
| 10.1. Parámetros de comparación . . . . .   | 38        |
| 10.2. Análisis de resultados . . . . .  | 38        |
| 10.3. Interpretación de los resultados comparativos . . . . .                               | 41        |
| <b>11.Relación del trabajo con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030</b> | <b>43</b> |
| <b>12.Pliego de condiciones</b>   | <b>45</b> |
| 12.1. Condiciones de carácter legal . . . . .   | 45        |
| 12.1.1. Orden de 9 de marzo de 1971 . . . . .   | 45        |
| 12.1.2. Real Decreto 486/1997 . . . . .   | 46        |
| 12.1.3. Real Decreto 488/1997 . . . . .   | 46        |
| 12.1.4. Real Decreto 1215/1997 . . . . .  | 49        |
| 12.2. Condiciones técnicas . . . . .  | 50        |
| 12.3. Condiciones facultativas . . . . .  | 51        |
| 12.4. Condiciones económicas . . . . .  | 52        |
| <b>13.Conclusión</b>  | <b>53</b> |
| <b>14.Planos</b>  | <b>54</b> |
| <b>A. Anexo 1: Artículo de obtención de la pieza original y optimización SLM</b>            | <b>60</b> |
| <b>B. Anexo 2: Especificaciones del material utilizado: Meltio Titanium</b>                 | <b>64</b> |
| <b>C. Anexo 3: Especificaciones técnicas de la M600 de Meltio</b>                           | <b>73</b> |

## Índice de figuras

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 1.  | Explicación ilustrada de los tipos de procesos de fabricación [3] . . . . .                                | 11 |
| 2.  | Curva de coste unitario vs complejidad de fabricación aditiva y tradicional [4] . . . . .                  | 12 |
| 3.  | Curva de coste unitario vs unidades fabricadas de fabricación aditiva y tradicional [4] . . . . .          | 13 |
| 4.  | Ejemplo de archivo STL con mayor o menor resolución [19] . . . . .   | 13 |
| 5.  | Piezas aeronáuticas fabricadas con FA . . . . .  | 15 |
| 6.  | Ejemplo de pieza creada usando un software de diseño generativo [17] . . . .                               | 16 |
| 7.  | Principales tecnologías de Fabricación Aditiva [4] . . . . .   | 18 |
| 8.  | Explicación ilustrada del proceso de FA conocido como SLM [4] . . . . .                                    | 19 |
| 9.  | Explicación ilustrada del proceso de FA conocido como DED [4] . . . . .                                    | 20 |
| 10. | Pieza elegida para la optimización . . . . .   | 22 |
| 11. | Pieza original creada en el programa Autodesk Fusion 360 . . . . .   | 22 |
| 12. | Posiciones obligatorias de los agujeros en la optimización . . . . .                                       | 23 |
| 13. | Restricciones añadidas en el módulo de diseño generativo de Fusion hasta el paso 4 . . . . .               | 24 |
| 14. | Restricciones añadidas en el módulo de diseño generativo de Fusion hasta el paso 5 . . . . .               | 25 |
| 15. | Pieza optimizada con diseño generativo mediante Autodesk Fusion . . . . .                                  | 26 |
| 16. | Meltio M600 proyecto Atila, máquina que se usará para la fabricación de la pieza optimizada.[13] . . . . . | 27 |
| 17. | Primera adaptación del diseño generativo de la pieza para su fabricación . .                               | 29 |
| 18. | Adaptación del diseño generativo de la pieza realizado el análisis de desmoldeo                            | 29 |
| 19. | Análisis de elementos finitos de la adaptación del modelo para su fabricación                              | 30 |
| 20. | Zona crítica del análisis de elementos finitos de la adaptación del modelo para su fabricación . . . . .   | 30 |
| 21. | Diseño final de la pieza para su fabricación . . . . .   | 31 |
| 22. | Diseño final de la pieza para su fabricación totalmente fabricable . . . . .                               | 32 |

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 23. | Análisis del factor de seguridad de la pieza optimizada. . . . .       | 33 |
| 24. | Análisis de estrés de Von Mises de la pieza optimizada en MPa. . . . . | 33 |
| 25. | Análisis de desplazamiento de la pieza optimizada en mm. . . . .       | 34 |
| 26. | Estudio de Von Mises en pieza optimizada DED con cargas del Anexo A. . | 39 |
| 27. | Diseño para la fabricación SLM imitando el del anexo A. . . . .        | 40 |
| 28. | ODS 9: Industria, innovación e infraestructura . . . . .               | 44 |
| 29. | ODS 12: Producción y consumo responsables . . . . .                    | 44 |
| 30. | ODS 13: Acción por el clima . . . . .                                  | 44 |

## Índice de cuadros

|    |   |    |
|----|---|----|
| 1. | Costes directos relacionados con el diseño de la pieza . . . . .      | 36 |
| 2. | Costes directos relacionados con la fabricación de la pieza . . . . . | 37 |
| 3. | Comparación entre fabricación tradicional, DED y SLM . . . . .        | 38 |
| 4. | Relación de los ODS con este Trabajo Fin de Grado . . . . .           | 43 |

## 1. Objeto

El objetivo principal de este trabajo académico es estudiar y optimizar una pieza aeronáutica mediante técnicas de fabricación aditiva, específicamente utilizando el proceso DED, y la posterior comparación con el método original y el de otro estudio. Los objetivos específicos incluyen:

- Realizar una revisión del estado del arte de la fabricación aditiva en la industria aeronáutica, analizando las últimas tendencias, aplicaciones y desafíos.
- Llevar a cabo una optimización topológica de un soporte aeronáutico existente, explorando diferentes configuraciones y restricciones para obtener la mejor solución posible.
- Diseñar una versión optimizada de la pieza para fabricación mediante DED, teniendo en cuenta las particularidades y limitaciones de este proceso.
- Fabricar la pieza optimizada utilizando una máquina DED.
- Realizar una comparación entre cada uno de los tres casos, el original, el que usa la tecnología DED y el que usa la tecnología SLM, buscando las ventajas y desventajas de cada uno de ellos.

## 2. Alcance y exclusiones

El alcance de este trabajo es amplio y abarca múltiples aspectos del proceso de diseño y fabricación de componentes aeronáuticos mediante fabricación aditiva. Específicamente, incluye:

- Un estudio detallado del estado del arte de la fabricación aditiva en la industria aeronáutica, con énfasis en las tecnologías SLM y DED, analizando sus principios de funcionamiento, ventajas, limitaciones y aplicaciones actuales.
- La optimización topológica y rediseño completo de un soporte aeronáutico específico, utilizando software especializado y considerando múltiples casos de carga y restricciones de diseño.
- Análisis por elementos finitos exhaustivo de la pieza original y la versión optimizada, incluyendo estudios de tensiones, deformaciones y factor de seguridad bajo diferentes condiciones de carga.
- Adaptación del diseño optimizado para su fabricación mediante DED, teniendo en cuenta las consideraciones específicas de este proceso.
- Fabricación de la pieza optimizada mediante una máquina DED, documentando detalladamente los parámetros de proceso y las consideraciones de fabricación.

- Comparación entre varios parámetros vitales entre los distintos tipos de fabricación estudiados, como por ejemplo análisis de costes de cada uno.

Se han excluido del alcance de este TFG los siguientes aspectos:

- Estudios de fatiga o comportamientos dinámicos de la pieza, que requerirían equipamiento y tiempo adicionales.
- Comparación con otros tipos de materiales a la hora de la fabricación de la pieza optimizada, ya que sólo se ha utilizado titanio.
- Análisis modales experimentales en la pieza, puesto que solamente se han realizado los análisis dentro del software.
- Fabricación y ensayo de múltiples iteraciones o variantes del diseño, limitándose a la producción y prueba de la versión final optimizada.

### 3. Introducción

La industria aeronáutica está en constante búsqueda de métodos para reducir el peso de las aeronaves, lo que se traduce en menor consumo de combustible y reducción de emisiones. La fabricación aditiva, especialmente de metales, se presenta como una tecnología prometedora para lograr este objetivo, permitiendo la creación de geometrías complejas y optimizadas que serían difíciles o imposibles de fabricar mediante métodos convencionales. Esta libertad de diseño permite a los ingenieros aeronáuticos reflexionar sobre la forma en que se diseñan y fabrican los componentes, abriendo nuevas vías para la optimización estructural y la eficiencia en el uso de materiales.

Este trabajo se centra en la aplicación de la fabricación aditiva, específicamente el proceso de Directed Energy Deposition (DED), para optimizar un soporte aeronáutico. Se parte de una pieza existente fabricada en aluminio y se busca rediseñarla utilizando una aleación de titanio (Ti6Al4V) y técnicas de optimización topológica. La elección del titanio como material se basa en su excelente relación resistencia-peso, crucial en aplicaciones aeroespaciales, mientras que la optimización topológica permite distribuir el material de la manera más eficiente posible para las cargas y restricciones dadas.

El proceso abarca desde la optimización computacional hasta la fabricación y ensayo de la pieza, pasando por las fases de diseño e ingeniería necesarias para adaptar la solución optimizada a las restricciones del proceso de fabricación DED. Este enfoque integral permite explorar las ventajas y desafíos de la fabricación aditiva en el contexto de la industria aeronáutica, contribuyendo al avance en la aplicación de estas tecnologías para la creación de componentes más ligeros y eficientes.



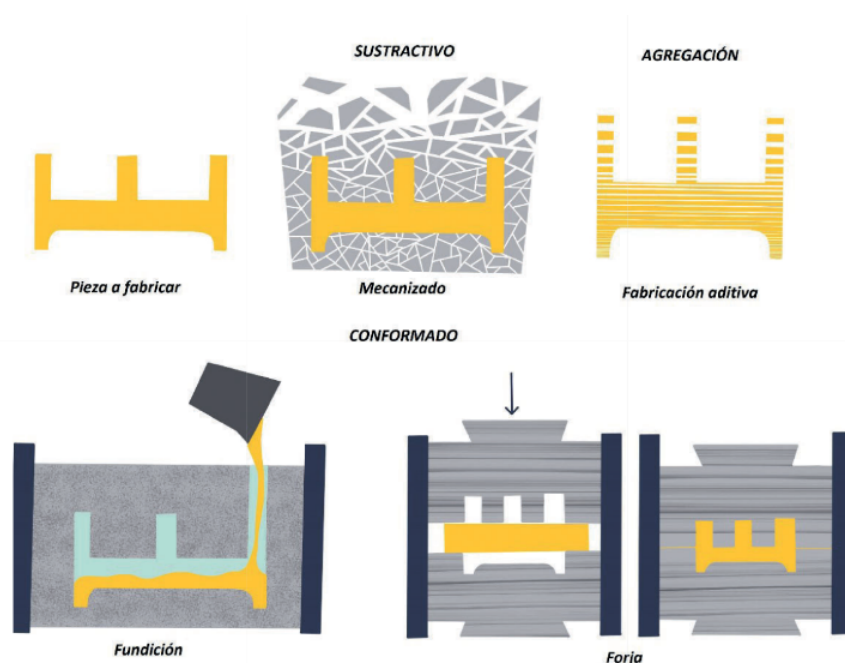
## 4. Estado del arte

### 4.1. ¿Qué es la fabricación aditiva?

A lo largo de los años, las actividades de producción han ido evolucionando de forma continua hacia la mejora de los procesos de fabricación, buscando siempre que sean lo más eficientes posibles, mejorando las propiedades del producto final, optimizando la cantidad de material usado para su producción a la vez que se intenta reducir el coste de la misma, además de otros [3].

Existen tres tipos de procesos de fabricación, aquí explicados, los cuales se pueden ver también en la Figura 1:

- **Procesos de conservación:** Utilizan preformas, como moldes para la obtención del producto. En este tipo, la masa de la preforma es casi idéntica a la de la pieza final, algunos procesos son fundición, deformación plástica o forja.
- **Procesos sustractivos:** En este caso, la masa de la preforma es superior a la de la pieza final, ya que este producto se obtiene a partir de la eliminación de material, como su nombre indica, principalmente son las operaciones de mecanizado.
- **Procesos por agregación:** Este es el tipo en el que estará centrado todo este estudio, en el que la masa final del objeto será la suma de las masas entrantes, en este caso, el caso estará centrado en la fabricación aditiva.



**Figura 1.** Explicación ilustrada de los tipos de procesos de fabricación [3]

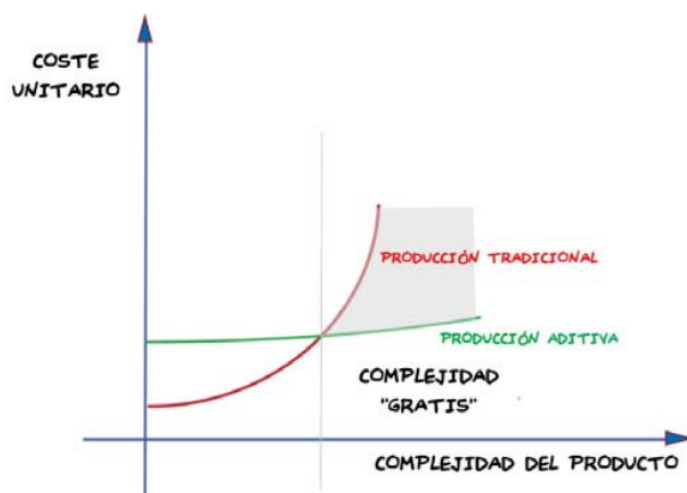
La fabricación aditiva (FA), también conocida como impresión 3D, ha emergido como una tecnología revolucionaria en la industria de la manufacturación y se define, según

la norma ASTM F2792-10 como: “El proceso de unión de materiales para crear objetos desde un modelo 3D, la unión se produce usualmente capa tras capa, en contraposición a las tecnologías de fabricación sustractiva”. La FA permite la creación de componentes con geometrías complejas y personalizadas que serían difíciles o imposibles de fabricar mediante métodos convencionales, esta capacidad de diseño y producción ha llevado a mejoras significativas en la eficiencia de los materiales y en la reducción de peso

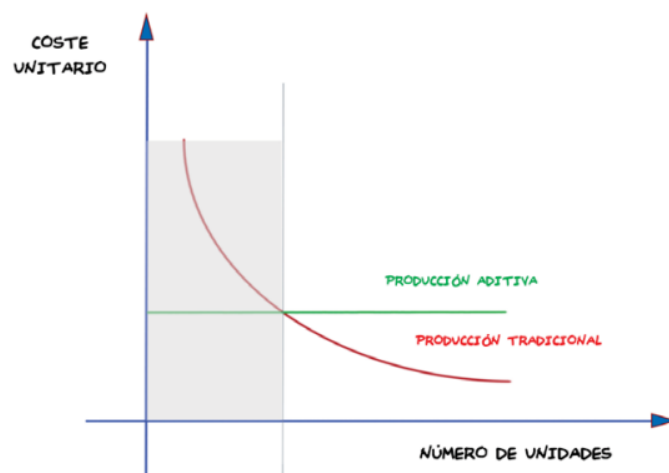
Esta tecnología se basa en la fabricación de productos por aporte de material, partiendo del uso de un software, en el que se ha creado el modelo que será elaborado mediante la máquina, donde el material es tratado con una fuente de energía.

Los procesos de FA presentan una gran serie de ventajas, las principales son la personalización de productos, ya que no se requiere fabricar utillajes ni moldes específicos; se reducen en gran medida las limitaciones en el diseño del producto, lo que permite crear piezas más complejas de manera mucho más sencilla, una gráfica que compara esto con la fabricación tradicional se puede ver en la Figura 2; presenta un gran ahorro de material, puesto que este no se pierde como en los métodos sustractivos, como por ejemplo el fresado, aunque puede eliminarse algo en procesos de acabado; reducción de costes en series pequeñas de producción, esto se puede comprobar en la Figura 3; no se requiere la intervención del operario durante la elaboración; entre muchas otras.

Por otro lado, también tiene una serie de desventajas, por lo que no será buena idea utilizarla en todos los casos, aunque se están realizando investigaciones para resolver gran parte de ellas. Las principales son la limitación en el uso de materiales, el tamaño limitado de las piezas que se pueden obtener, la necesidad de fabricar soportes durante la fabricación de algunos tipos de piezas que no se pueden construir de manera vertical, la variación en las propiedades de los materiales procesados a lo largo de la pieza al tratarse de un proceso discontinuo o la baja rentabilidad para altas series de producción. Esta última desventaja se puede comprobar con la curva de coste que se presenta en la Figura 3, donde se puede ver que a partir de un número considerable de unidades a fabricar, el coste unitario de cada una de ellas empieza a ser mayor para la FA que para la fabricación tradicional.[4]



**Figura 2.** Curva de coste unitario vs complejidad de fabricación aditiva y tradicional [4]

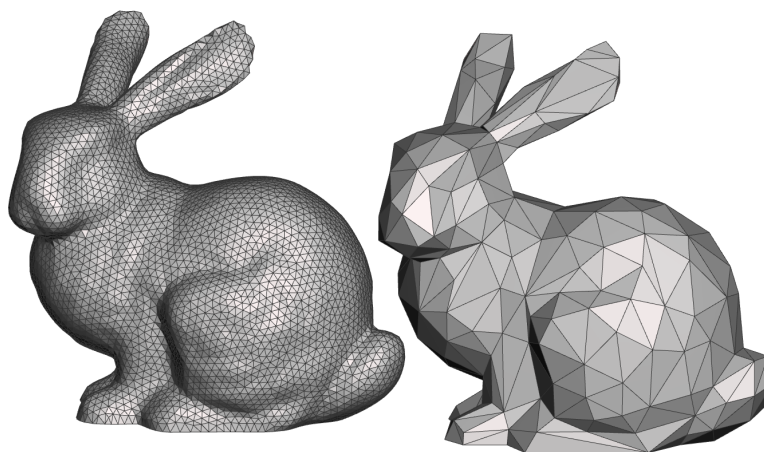


**Figura 3.** Curva de coste unitario vs unidades fabricadas de fabricación aditiva y tradicional [4]

## 4.2. Historia de la fabricación aditiva

La fabricación aditiva comenzó a desarrollarse en la década de 1980, cuando a Chuck Hull se le ocurrió un sistema de impresión 3D en 1983, aunque las patentes no se inscribirían hasta el año siguiente. Este proceso se conoció como la estereolitografía (SLA), un método que utiliza un láser UV (ultravioleta) para curar resina fotosensible capa por capa. Sin embargo, el Dr. Fideo Kodama ya había descrito un enfoque similar en 1980. [10]

Hull hizo una contribución significativa al crear el formato de archivo STL, que representa la geometría superficial de objetos 3D mediante superficies triangulares en un sistema cartesiano, sin incluir información sobre color, textura o escala. Este formato permite la creación de secciones transversales para la construcción capa por capa. En la Figura 4 se puede ver un ejemplo de un archivo STL con mayor y menor resolución, es decir, con mayor o menor cantidad de triángulos.



**Figura 4.** Ejemplo de archivo STL con mayor o menor resolución [19]

Hull fundó 3D Systems, la primera compañía dedicada a desarrollar sistemas de impresión 3D, lanzando el primer sistema SLA comercial. Durante los años 90, se desarrollaron y patentaron otros sistemas de fabricación aditiva. Inicialmente, estas máquinas, conocidas como de prototipado rápido (RP) trabajaban principalmente con materiales poliméricos y se usaban para crear prototipos no funcionales, evitando inversiones costosas en moldes.

El cambio significativo ocurrió a mediados de los 90 cuando EOS, una de las empresas más punteras en el ámbito de la impresión 3D presentó el "Sintetizado Directo de Metales por Láser"(DMLS), basado en el "Sintetizado Láser Selectivo"(SLS) usado en plásticos. Estas tecnologías permitieron la creación de piezas funcionales mediante la fusión por láser de polvo metálico capa por capa.

Este avance permitió la fabricación de piezas o productos mediante la fabricación aditiva que podían desempeñar las mismas funciones que las piezas producidas por métodos tradicionales, renovando el interés de la industria en estas tecnologías.

### **4.3. Fabricación aditiva en la industria aeronáutica**

De acuerdo con lo descrito anteriormente, este método de fabricación puede ser crucial en la aeronáutica, donde cada kilogramo de peso ahorrado puede traducirse en importantes reducciones de combustible y emisiones. La adopción de la FA en la aeronáutica no solo se ha centrado en la producción de nuevas piezas, sino también en la reparación y el mantenimiento de componentes existentes. La posibilidad de añadir material a las piezas dañadas y restaurarlas a su estado original ha reducido considerablemente los costos de mantenimiento y prolongado la vida útil de componentes caros.[22]

En el ámbito de la producción, las ventajas de la FA incluyen la consolidación de piezas, lo que significa que múltiples componentes que tradicionalmente se ensamblarían pueden ser fabricados como una sola unidad, eliminando la necesidad de costosos y lentos procesos de ensamblajes y reduciendo puntos potenciales de fallo. Esta consolidación no solo simplifica el diseño y la producción, sino que también mejora la fiabilidad y el rendimiento de los componentes. A su vez, se obtendrá una mayor agilidad, ya que se podrán acortar los ciclos de innovación y reducir la necesidad de almacenaje al poder trabajar bajo demanda en mayor medida.[15]

Otra ventaja que tiene este tipo de tecnología es a la hora de aprovisionarse de piezas de repuesto, ya que, en el momento en que se rompa una pieza, ahora existe la posibilidad de, teniendo las librerías de los documentos CAD, imprimir las partes de recambio. De esta manera, el propio operador puede cambiar las propias piezas de serie por otras fabricadas por el mismo mediante impresión 3D, siempre y cuando disponga del material necesario.

### **4.4. Ejemplos de fabricación aditiva en la industria aeronáutica**

Como se ha explicado anteriormente, este tipo de industrialización tiene una gran serie de ventajas en este ámbito, es por eso que ya se está aplicando en gran parte de las grandes empresas del entorno.

Algunas de las principales áreas en las que se utiliza la FA son componentes estructurales de aeronaves (soportes, monturas o refuerzos), piezas de motores o turbinas más ligeros y eficientes o incluso drones, entre muchas otras. Otro de los motivos por los que es muy eficiente para esta industria es porque las piezas aeroespaciales, en un gran número de casos incluyen canales internos para enfriamiento conformado, superficies curvas complejas o paredes delgadas, siendo este tipo de procesos ideales para estos casos, pudiendo crear estructuras altamente complejas a la vez que livianas y con alta estabilidad. Algunos ejemplos en los que se ha usado son el Boeing 777x, en el que, además de la boquilla de combustible, el motor lleva incluidas más de 300 piezas creadas con este tipo de fabricación, lo que permitió reducir su peso en gran medida y convertirlo en mucho más eficiente. Otro ejemplo es el Perseverance Rover de la NASA, que tiene 11 componentes metálicos fabricados con FA.[11]

En las Figura 5 se muestran algunas piezas concretas que han sido optimizadas y posteriormente creadas con FA. La primera de ellas es una cámara de empuje monolítica (componente clave en motores cohete y otros sistemas de propulsión), mientras que la segunda es un bracket, pieza fundamental en multitud de motores, ya que se encarga de proveer soporte y fijación para distintos componentes.[7]



(a) Pieza n° 1 [7].



(b) Pieza n° 2 [7].

**Figura 5.** Piezas aeronáuticas fabricadas con FA

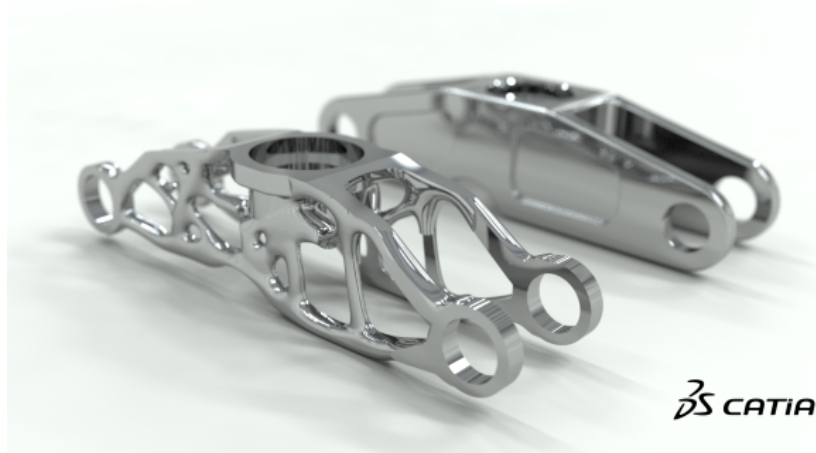
Además de la fabricación de nuevas piezas, también se está utilizando para la reparación de otras ya existentes, como la reparación de álabes de turbinas, ya que puede añadir material directamente en la pieza solamente en los puntos en los que sea necesario, obteniendo reparaciones rápidas y económicas que permiten aumentar la vida útil de componentes muy costosos.

## 4.5. Diseño generativo

La fabricación aditiva tiene un gran aliado en el sector aeroespacial, que se conoce como diseño generativo. Esta tecnología consiste en un proceso de exploración de diseño iterativo que utiliza un programa de software impulsado por IA para generar una gama de soluciones de diseño que cumplen con un conjunto de restricciones [9].

Hay un método muy similar a este, conocido como optimización topológica, que usa modelos algorítmicos para optimizar la organización del material dentro de un espacio definido por el usuario para un conjunto dado de cargas, condiciones y limitaciones. La diferencia entre ambos es que el diseño generativo va un paso más allá, siendo la optimización topológica la base de este, ya que el diseño generativo elimina la necesidad de que el modelo inicial sea diseñado por humanos, asumiendo el papel del diseñador en función del conjunto de restricciones. De esta manera el papel del ingeniero con el uso del diseño generativo pasa a ser el de definir parámetros y restricciones.

Algunas ventajas que tiene este proceso son que permite la exploración, validación y comparación simultánea de cientos o miles de diseños. Además, esto acelera en gran medida el tiempo dedicado a la investigación y desarrollo de nuevos productos. Por último, es capaz de crear diseños muy complejos con características orgánicas o celosías internas, sin embargo, es importante recalcar que estos no siempre podrán ser fabricados por limitaciones que pueda tener la máquina o el proceso utilizados, por lo que siempre se debe revisar la posibilidad de fabricación de cada pieza. Un ejemplo de una pieza que se ha creado utilizando diseño generativo comparada con la original, de la que se ha reducido el peso en gran medida, se puede ver en la Figura



**Figura 6.** Ejemplo de pieza creada usando un software de diseño generativo [17]

El motivo por el que el diseño generativo y la fabricación aditiva funcionan tan bien juntos es que muchas formas orgánicas creadas mediante generación aditiva son muy caras o incluso imposibles de fabricar mediante fabricación tradicional como el mecanizado CNC.

Algunos de los software más utilizados son Autodesk Fusion 360 (será el que se use más adelante en este estudio), NX de Siemens o Creo Generative Design de PTC.

## 4.6. Tecnologías de fabricación aditiva

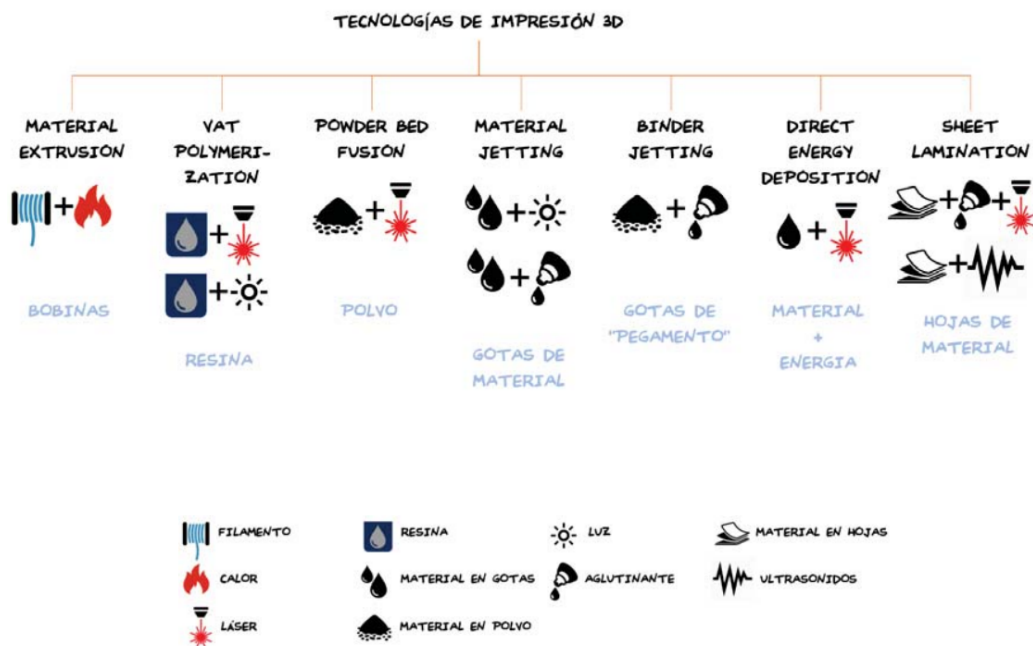
La FA agrupa múltiples tecnologías diferentes entre sí, cada una con sus características, sus ventajas y sus inconvenientes. En este caso, no se explicarán todas, solamente se analizarán las tecnologías SLM y DED, ya que son las que más adelante se compararán en este estudio.

### 4.6.1. Tipos de tecnologías de Fabricación Aditiva

Existen diversos tipos de fabricación aditiva, cada uno con sus propias características, ventajas y aplicaciones. En esta sección, se realizará una pequeña introducción a las diferentes técnicas y procesos que componen este innovador campo, proporcionando una visión general de cada uno[4], además, todos estos tipos están agrupados y explicados visualmente en la Figura 7:

- Material Extrusion: Consiste en derretir el material, que viene de una bobina de filamento y depositarlo poco a poco.
- Vat Polymerization: Se basa en la solidificación de un material líquido sensible a la luz con la misma.
- Powder Bed Fusion: En este tipo, el material inicial está en forma de polvo, y este se funde con calor en los lugares donde es necesario.
- Material Jetting: Este proceso consiste en inyectar el material en el lugar adecuado gota a gota.
- Binder Jetting: En este caso, también se tiene el material en forma de polvo, la diferencia con PBF (Powder Bed Fusion es que en este caso se va inyectando aglutinante (pegamento) para solidificarlo.
- Direct Energy Deposition: Se basa en inyectar al mismo tiempo el material y la energía necesaria para fundirlo.
- Sheet Lamination: Tiene el material en hojas que se van cortando con la forma necesaria, pegando una sobre otra.





**Figura 7.** Principales tecnologías de Fabricación Aditiva [4]

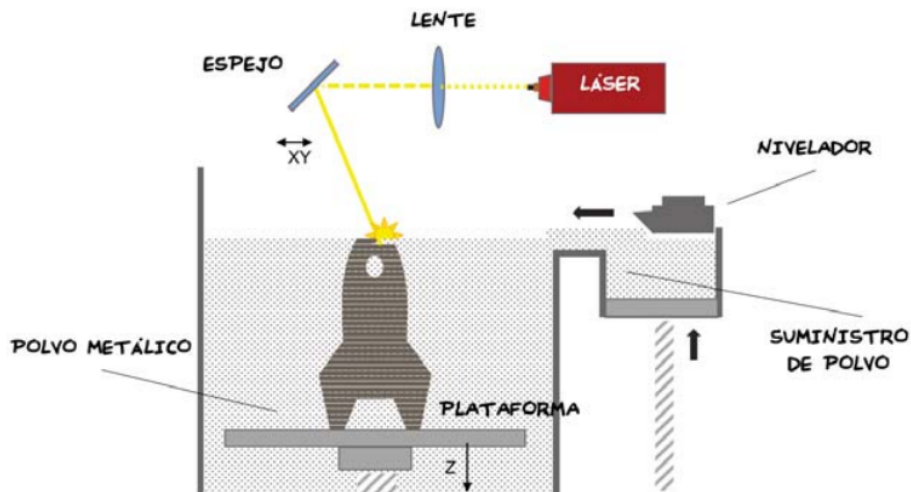
Los apartados siguientes se basarán en la explicación en más profundidad de dos tipos de entre todos estos, ya que serán los que se utilizarán a lo largo de este estudio, uno para la optimización realizada por el mismo, es el caso de DED, y el otro para la comparación con otro estudio ya realizado, que es SLM, un tipo de FA que se incluye dentro de la categoría de PBF (Powder Bed Fusion).

#### 4.6.2. Fabricación aditiva SLM

SLM es una de las tecnologías de FA más avanzadas y se utiliza ampliamente en la industria aeronáutica debido a su capacidad para producir piezas con alta precisión y excelentes propiedades mecánicas. Este proceso está incluido dentro de una clase llamada Powder Bed Fusion (PBF) o fusión por lecho de polvo, que agrupa las tecnologías que consiguen la FA mediante la fusión de un material en polvo. El proceso de SLM implica la fusión selectiva de polvo metálico mediante un láser de alta potencia, capa por capa, hasta formar el objeto final.[4]

Su funcionamiento consiste en una cámara donde se encuentra el suministro de polvo metálico, por otro lado se tiene una plataforma móvil, sobre la que inicialmente hay una fina capa de polvo. Posteriormente, capa a capa, se calienta este polvo con un láser hasta alcanzar el punto de fusión, dibujándose cada capa, la plataforma, cuando la capa actual se ha terminado de calentar, se desliza un paso hacia abajo y un nivelador extiende una nueva capa por encima de la anterior hasta finalizar la pieza. Para agilizar el proceso, el polvo metálico se mantiene a una temperatura levemente por debajo del punto de fusión. Gran parte del polvo sobrante tras la extracción de la pieza puede reutilizarse. Este proceso explicado se puede ver de una manera más visual en la Figura 8.





**Figura 8.** Explicación ilustrada del proceso de FA conocido como SLM [4]

El acabado de la pieza en este caso puede ser más o menos rugoso en función del grano de polvo metálico utilizado, con un polvo más fino se obtendrá un mejor acabado, pero, por otra parte, un polvo muy fino dificulta el manejo del mismo a lo largo del proceso, por lo que se busca un término medio y, cuando se necesita una superficie muy suave, se realiza un post-procesado, que es muy común en el ámbito de la FA. Generalmente, al igual que en otros procesos de fabricación tradicionales, se suele hacer una fase de tratamiento de calor posterior a la fabricación para obtener una mejor resistencia, donde se calienta y se enfría la pieza para eliminar los microdefectos y homogeneizarla.[14]

Ventajas de SLM:

- Alta precisión y resolución: SLM puede producir piezas con tolerancias muy ajustadas y detalles finos, lo cual es esencial para componentes críticos.
- Propiedades mecánicas superiores: Las piezas fabricadas mediante SLM generalmente presentan buenas propiedades mecánicas y alta densidad, comparables a las de los componentes fabricados convencionalmente.
- Flexibilidad de diseño: Permite la creación de estructuras internas complejas, como retículas y canales de enfriamiento conformados.

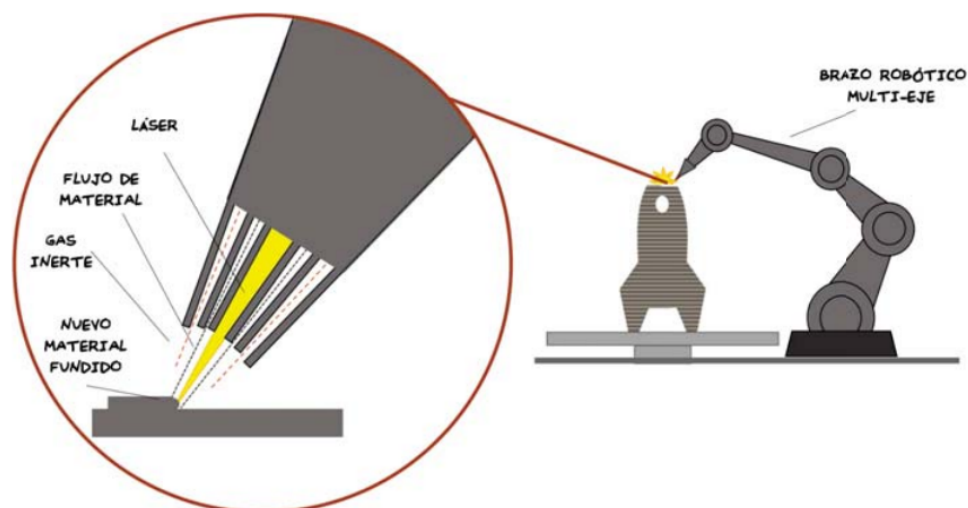
Limitaciones de SLM:

- Tiempos de producción largos: El proceso de SLM es relativamente lento debido a la necesidad de construir las piezas capa por capa.
- Costos elevados: El equipo y los materiales para SLM son costosos, y el proceso requiere condiciones controladas, como una atmósfera de gas inerte, por lo que se suele limitar su uso a cuando es necesario un alto nivel de requerimiento.
- Necesidad de soportes: Durante la impresión, se necesitan soportes temporales para evitar deformaciones, que luego deben ser removidos en un proceso adicional.

- No está disponible para todos los metales: Sólo para aquellos como acero o titanio que fluyen correctamente al fundirse con láser. En el caso, de los que no tienen esta capacidad se usan aleaciones o DMLS (Direct Metal Laser Sintering), una variación del SLM que consiste en conseguir aleaciones utilizando partículas de distintos polvos que se fundan entre sí obteniendo una aleación sin que todo el metal se funda completamente.

#### 4.6.3. Fabricación aditiva DED

DED es una familia de tecnologías en la que el material, en forma de polvo o hilo, es alimentado directamente en la zona de deposición en el punto donde se desee, donde una fuente de energía, como un láser, un haz de electrones o un arco de plasma, lo funde y lo deposita. Según el tipo de energía que se use, se llamará de una manera o de otra y tendrá unas características propias. Generalmente, a un brazo robótico multidimensional se le instala una cabeza que es responsable de depositar el material y emitir la energía para fundirlo. Este brazo, controlado por ordenador, hace que este método tenga una muy alta precisión a la hora de trabajar. Este proceso se puede ver de una forma más visual en la Figura 9.



**Figura 9.** Explicación ilustrada del proceso de FA conocido como DED [4]

En el caso del uso de láser, el nombre que se le da es el de LMD (Laser Metal Deposition), que suele ir combinado con material en forma de polvo, por otra parte, cuando se encuentra en forma de hilo y se utiliza láser se conoce como Wire Laser Additive Manufacturing (WLAM). Si se utiliza el haz de electrones se conoce como Electron Beam Free Form Fabrication (EBF3) y los sistemas basados en arco eléctrico se suelen llamar Wire-Arc Additive Manufacturing (WAAM).[3]

Uno de los usos que tiene este método, además de generar nuevos componentes o piezas, es el de reparar piezas dañadas, añadir partes o modificar un objeto ya existente, esto se debe a que normalmente los procesos DED permiten el movimiento de la boquilla en cualquier dimensión, por lo que pueden inyectar material en casi cualquier dirección.

Para que el material no escape o se funda donde no se desea, también se emite un flujo constante de un gas inerte, que crea una zona alrededor que impida que esto ocurra.

Ventajas de DED:

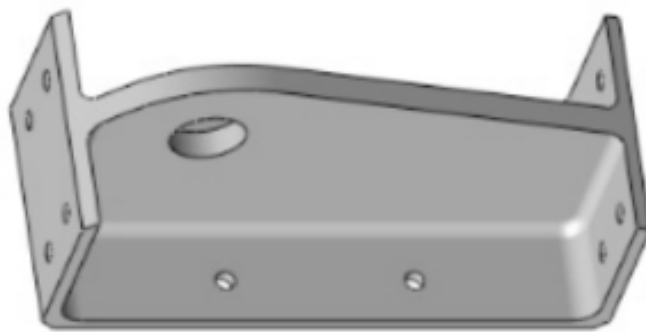
- Capacidad de reparación: Es ideal para la reparación y el mantenimiento de piezas, ya que permite la adición de material a componentes existentes sin necesidad de ir capa a capa.
- Menor necesidad de soportes: La técnica de deposición directa minimiza la necesidad de estructuras de soporte, simplificando el proceso de fabricación.
- Ausencia casi total de residuos: Prácticamente todo el material utilizado termina fundiéndose con la pieza.
- Posibilidad de combinar materiales en una misma pieza en el caso de LMD

Limitaciones de DED:

- Es un proceso bastante costoso
- Menor resolución: La precisión de las piezas fabricadas por DED es generalmente inferior a la de las piezas fabricadas por SLM.
- Post-procesamiento: Las piezas fabricadas mediante DED a menudo requieren un post-procesamiento significativo para cumplir con las tolerancias y acabados deseados.[8]

## 5. Descripción de la pieza de referencia

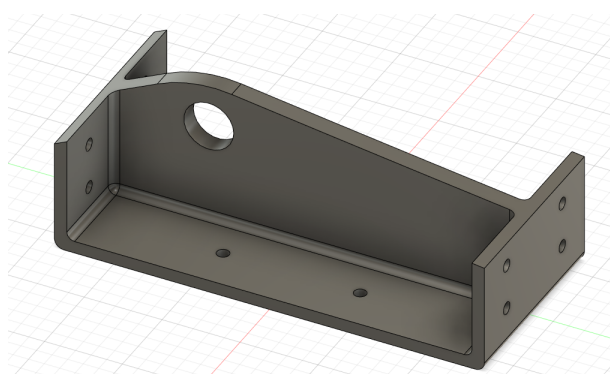
En este caso, la pieza elegida es la mostrada en la Figura 10, ha sido obtenida gracias a un estudio realizado por Miguel Seabra, del IDMEC (Instituto Superior Técnico, Universidad de Lisboa, Portugal) junto a sus compañeros, en ese estudio se busca una optimización mediante fabricación aditiva para la pieza utilizando tecnología SLM, aquí se compararán sus resultados con los obtenidos en esta investigación, además de con la pieza original, para buscar obtener cual es la mejor opción de fabricación de la pieza, este estudio al completo se puede ver en el Anexo A.



**Figura 10.** Pieza elegida para la optimización

Esta pieza es un bracket aeronáutico, es decir una pieza que se utiliza como soporte. Estos componentes se utilizan para sostener diferentes elementos mecánicos, como cables o tubos, entre otros. Los objetivos que intenta cumplir este diseño son ser ligero, fuerte y resistente a las condiciones que se le apliquen.

En este caso, este que se puede ver en la imagen estaría formado por 12 agujeros de 4 milímetros de diámetro que se utilizarían para fijar el bracket al lugar donde tenga que ir colocado, ya sea atornillado, remachado o de cualquier otra manera, mientras que dispone de un agujero mayor, de 16 mm de diámetros, lugar sobre el que se ejercerán la gran mayoría de fuerzas en esta pieza. A partir de esta información se ha creado una copia de la pieza original previa a la optimización con ayuda de Autodesk Fusion 360, este diseño se puede ver en la Figura 11. En su diseño inicial, el material usado para crear esta pieza es aluminio. En cuanto a la fabricación, este tipo de piezas se conforman mediante fabricación sustractiva, partiendo de un bloque con una mayor cantidad de materia y eliminando material de diversos métodos como torneado, fresado o taladrado hasta que quede el resultado final.



**Figura 11.** Pieza original creada en el programa Autodesk Fusion 360

Los planos de este diseño pueden verse en la sección 14, junto al resto de planos, de manera más detallada.

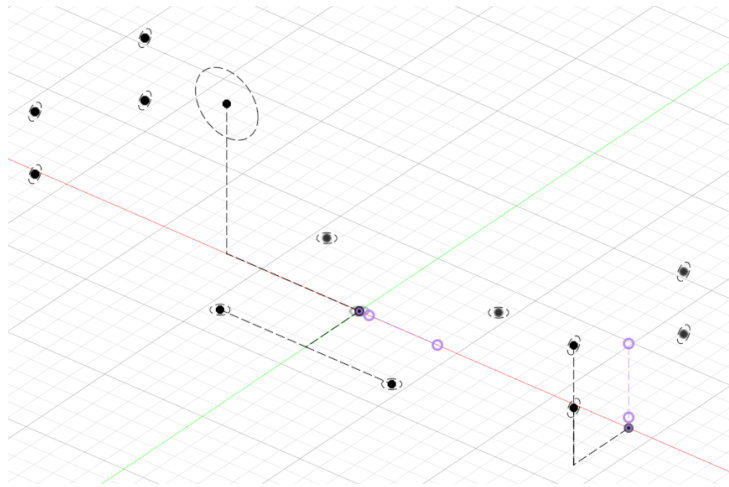
Como se puede ver gracias a las medidas, es una pieza considerablemente pequeña, por lo que, como se ha visto anteriormente, es ideal para producir utilizando la FA, ya

que tiene el tamaño adecuado y, además, no se necesitará fabricar en serie, ya que este tipo de piezas aeronáuticas se suelen producir cuando se realizan pedidos.

Por otro lado, otras características importantes de esta pieza son el peso, que en este caso es de 225.81 gramos y el volumen que ocupa, 80.647 centímetros cúbicos. Estos valores serán muy importantes más adelante, a la hora de comparar cada uno de los parámetros de la optimización creada con los propios de la pieza original.

## 6. Metodología de optimización de la pieza para fabricación en DED

Una vez se tiene la pieza a estudiar la metodología a seguir consiste en obtener la geometría necesaria de la pieza que se debe mantener tras la optimización, en este caso, lo necesario a mantener son todos los agujeros, además se debe tener en cuenta que hay que evitar ocupar el máximo volumen posible que antes no estuviera ocupado, ya que esto podría hacer que la nueva pieza necesitara un espacio del que no dispone, ya sea porque lo necesitan otras piezas o cualquier otro motivo. De esta manera se ha realizado un primer sketch que muestra los lugares donde se deben de posicionar los agujeros, para continuar trabajando a partir de ahí. Esto se puede ver en la Figura 12.



**Figura 12.** Posiciones obligatorias de los agujeros en la optimización

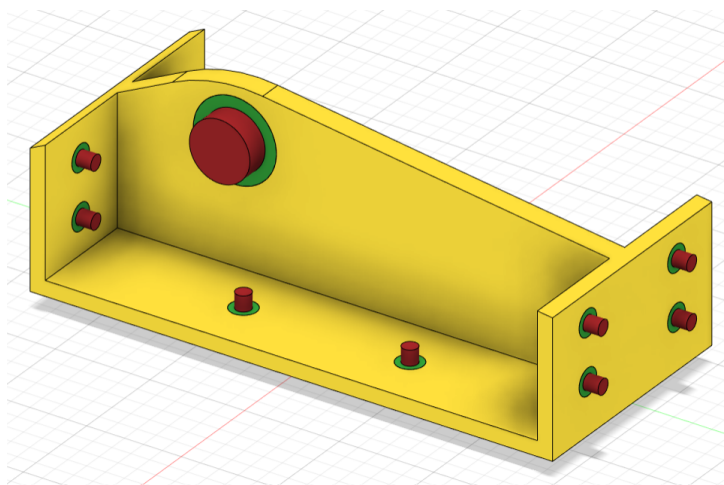
Cumplir con las restricciones que fija este diseño mostrado en la Figura 12 es fundamental, ya que si se realizara el mínimo cambio en la posición o el tamaño de los agujeros, podría tener consecuencias muy graves, no pudiéndose utilizar la pieza.

El siguiente punto a tener en cuenta son las cargas que tendrá que resistir y el lugar en el que se ejercerán esas cargas, para poder crear una nueva pieza optimizada que también cumpla con estos requerimientos. En este caso, como se puede ver en el Anexo A, las cargas que se aplican en ese caso tienen un valor máximo de 6000 Newtons en su eje X, por lo que en este caso se ha decidido que este diseño será capaz de soportar unas cargas de 6000 Newtons en cada uno de los ejes de la pieza, ejercidos todos al mismo

tiempo y aplicadas las fuerzas en el agujero central, lugar donde se aplicarían en los usos cotidianos de la pieza. Se ha realizado de esta manera para la completa confirmación de que la pieza será capaz de aguantar todas las posibles cargas y no se rompa en ninguna situación crítica.

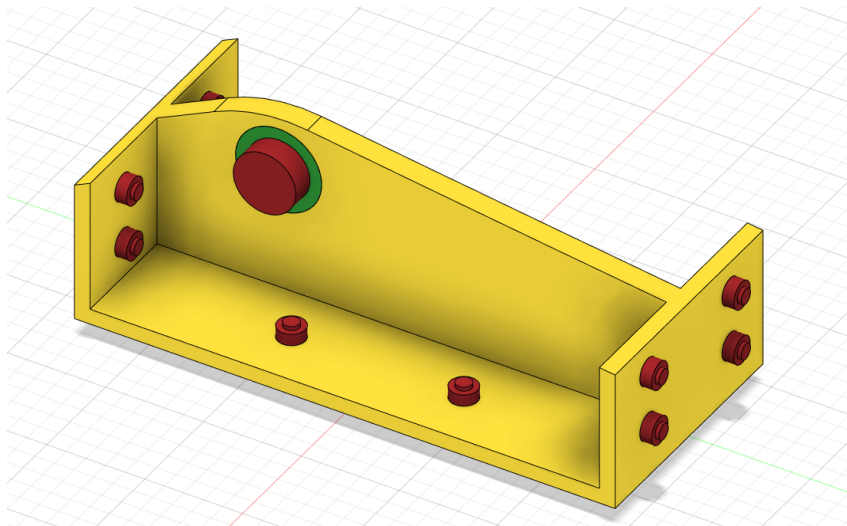
Una vez se tiene toda esta información se puede proceder a la optimización topológica. Este proceso se va a realizar, al igual que el resto de diseños, en Autodesk Fusion 360, con ayuda del módulo de diseño generativo. El proceso a seguir se basa en varios puntos que se van a explicar a continuación:

1. Con ayuda del boceto en el que se ha situado la posición de los agujeros se crea una selección de cuerpos con la característica de conservar geometría, esto hará que en el modelo creado este volumen de pieza permanezca intacto, sin modificaciones.
2. En el interior de cada uno de los agujeros se crea un cilindro en el que se incluirá la opción llamada geometría de obstáculo, esto significa que la optimización topológica que va a crear el programa tendrá prohibido generar material en el volumen ocupado por estos cilindros, por lo que los agujeros podrán cumplir su función sin ningún problema.
3. Seleccionar el resto del volumen de la pieza como forma inicial, esto hará que la optimización creada por Fusion 360 se parezca lo máximo posible a la inicial y, sobretodo, no ocupe áreas que podrían estar ocupadas por otras piezas a la hora del ensamblaje, lo que haría que esta pieza creada no sirviera para nada. Además, en esta selección, se han simplificado todos los empalmes, lo que simplifica la pieza sin modificar ningún rasgo importante.
4. Se ha añadido un plano de simetría, lo que hace que la pieza sea totalmente simétrica a ambos lados del agujero más grande. Hasta ahora, queda como se puede ver en la Figura 13, donde las superficies verdes son las zonas de la pieza que se deben conservar, las zonas rojas los lugares en los que el programa tiene prohibido crear material y la superficie amarilla es la forma inicial que se usará como base.



**Figura 13.** Restricciones añadidas en el módulo de diseño generativo de Fusion hasta el paso 4

5. Por otro lado, los agujeros deberán ser atravesados por elementos fijadores, ya sea tornillos, remaches o cualquier otro tipo, por lo que también se debe prohibir la creación de material en los bordes superiores e inferiores de los agujeros de fijación, esto se puede ver en la Figura 14

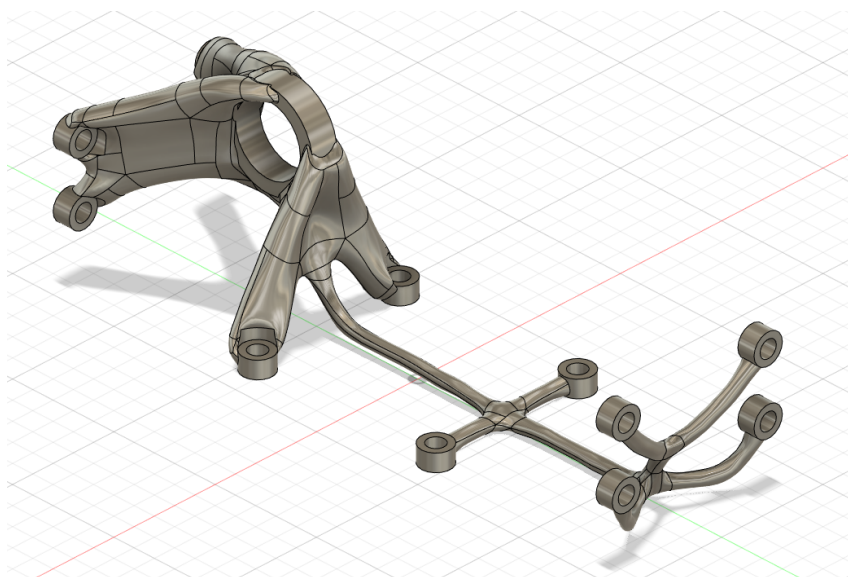


**Figura 14.** Restricciones añadidas en el módulo de diseño generativo de Fusion hasta el paso 5

6. Las restricciones estructurales que se deben añadir son las correspondientes a los agujeros pequeños, en los que se especificará que están fijos, como será en la realidad cuando se utilice la pieza.
7. Se añaden las cargas deseadas, en este caso, como se ha mencionado anteriormente las cargas máximas que deberá soportar son 6000 Newtons en cada una de las direcciones ejercidas en el agujero grande central.
8. En cuanto a los objetivos seleccionados, la misión en este caso es disminuir lo máximo posible el peso, sin perder la resistencia necesaria para soportar las cargas aplicadas, por lo que se selecciona esa opción.
9. En el módulo de fabricación, solo marcaremos la opción de fabricación aditiva, que será la utilizada en el proceso de fabricación, los parámetros que seleccionaremos para nuestra máquina serán orientación Z+, un ángulo de saliente de entre 20 y 25 grados y un grosor mínimo de 1.2 milímetros. Estas características corresponden a la máquina de FA por DED que será utilizada, esto será explicado más a fondo en otro apartado más adelante. También seleccionamos un factor de seguridad de 2.2, lo que significa que el modelo aguantará 2.2 veces la fuerza que supuestamente debe aguantar, es muy común poner este factor de seguridad tan alto en los componentes aeroespaciales, ya que se busca una gran seguridad en ellos.[6]
10. Por último, aunque la pieza original esté hecha de aluminio, en este caso se va a utilizar una aleación de titanio, que es más resistente, lo que hará que con un volumen mucho menor se sigan cumpliendo las especificaciones deseadas, por otra parte, el aluminio no es compatible con la máquina que será utilizada.



Una vez hechos todos los pasos anteriores el programa se encarga de crear la pieza producida por diseño generativo, la cual se puede ver en la Figura 15. Esta pieza, fabricada con un titanio del que se especificarán sus características más adelante, consigue disminuir el peso hasta 55.07 gramos, lo que significa un descenso en la masa del 75.6 %. Esto sería espléndido, ya que el descenso es muy significativo, por desgracia, este volumen de pieza no cumple con todas las necesidades que pide la máquina que será usada en la fabricación. Debido a esto, en la siguiente sección se explica de manera detallada como modificar este resultado para su fabricación.



**Figura 15.** Pieza optimizada con diseño generativo mediante Autodesk Fusion

## 7. Proceso de fabricación de la pieza y funcionamiento de la máquina de DED

En este apartado se describe detalladamente el proceso de fabricación de la pieza objeto de estudio y se proporciona una descripción de la máquina que ha sido utilizada. El análisis de estos aspectos es crucial para conocer todo el contexto alrededor del producto final.

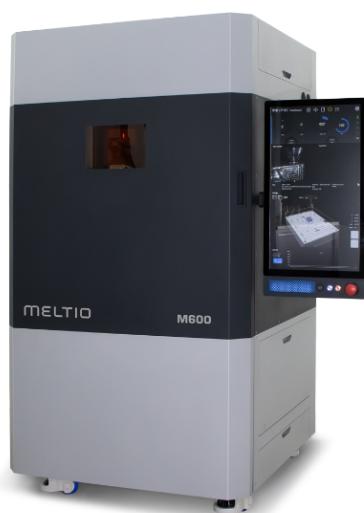
En este caso, la fabricación de la pieza se podrá realizar gracias a AIDIMME, un instituto tecnológico de personalidad jurídica privada de carácter no lucrativo [2], este instituto tecnológico está llevando acabo el proyecto ATILA, cuya descripción se basa en el estudio y desarrollo de un proceso de fabricación aditiva de alta protección mediante fabricación aditiva DED para obtener piezas con titanio Ti6Al4V\_ELI.[1]

Este es un proyecto financiado por el Ministerio de Ciencias e Innovación y la Agencia Estatal de Investigación, el integrante más importante de este proyecto, además de AIDIMME, es Meltio, una empresa linarense dedicada al desarrollo de sistemas de impresión 3D en metal, gracias a ellos se podrá usar la M600 para realizar todo el proceso de fabricación de la pieza.



## 7.1. Máquina a utilizar

Para entrar en materia, primero se va a explicar el funcionamiento de esta máquina, un prototipo de la M600 conocido como proyecto Atila, es importante saber que no es exactamente la M600, pero a partir de aquí se le llamará de esa manera para simplificar, esta se puede ver en la Figura 16. La M600 es una máquina diseñada para conseguir imprimir lo necesario de una manera sencilla, gracias a un control de proceso y unos sensores muy avanzados y la posibilidad de monitoreo en vivo que permite producir piezas de manera constante las 24 horas del día, además, permite la impresión de piezas grandes o un lote de piezas pequeñas en fila y, comparada con otras máquinas con el mismo objetivo, necesita un mantenimiento menor, tiene una tasa de deposición mayor, y una cámara totalmente inerte para obtener las mejores propiedades del material [13].



**Figura 16.** Meltio M600 proyecto Atila, máquina que se usará para la fabricación de la pieza optimizada.[13]

Otras de sus principales características son su sistema de sondeo de 3 ejes o el láser azul, una de sus mayores innovaciones, este láser, de 450 nm mejora la absorción de energía y la eficiencia de la impresión, ya que una mayor fracción de la energía del láser se utiliza para calentar y fundir el metal, comparado con los láseres de otras máquinas de 980 nm. Esto hace que, al ser más eficiente, genera menos emisiones y contaminación, por lo que es bueno en todos los sentidos. Por otra parte, aunque el láser azul es más caro que los usados tradicionalmente, en Meltio han conseguido una manera de tener un precio competitivo, integrar los láseres en la cabeza de deposición, lo que hace que necesite mucha menos interacción del operador, al eliminar la necesidad de alineación manual de láser-alambre [12].

En el interior, la atmósfera está protegida con argón, esto evita la suciedad que se acumula por el humo y protege del oxígeno. Las temperaturas a las que puede llegar son de hasta 900 grados centígrados durante la fundición, a lo largo de la creación se hacen paradas para dar tiempo a la pieza a enfriarse y no se acumule demasiada energía.

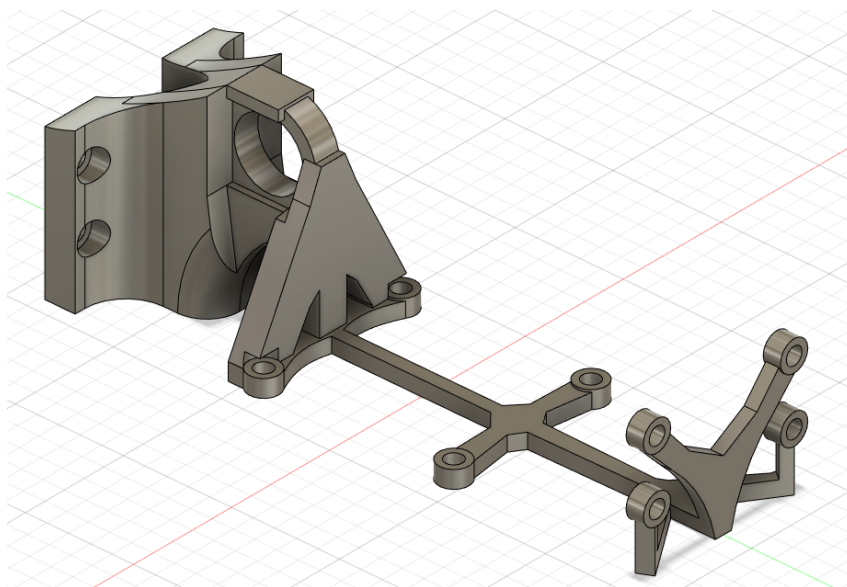
Por último, otra posibilidad que tiene esta máquina es la compatibilidad con Hotwire, es decir, el cabezal de deposición está desarrollado para ser usado con un suministro opcional de alambre caliente que pueda aumentar la tasa de deposición y permitir el procesamiento de más materiales.

Esta máquina permite la creación de piezas de diversos materiales, como aceros inoxidables, aleaciones de hierro y carbono o aleaciones de titanio, entre otras, en este caso, el material usado será el Titanio 64, del cual se va a proporcionar una visión general de los detalles. El titanio 64 (Ti-6Al-4V) presenta una excelente combinación de dureza, baja densidad y resistencia a la corrosión, además de en la industria aeroespacial también es utilizado en el procesamiento químico por sus propiedades. En su composición química, además de titanio, presenta un 5.5 % de aluminio y un 3.5 % de vanadio, además de muy bajas cantidades de hierro, carbono, nitrógeno, hidrógeno y oxígeno. Algunas propiedades que serán interesantes para este estudio son la densidad, de 4.4 gramos por centímetro cúbico, un límite elástico de 693 +- 16 Mpa y una resistencia máxima a la tracción de 788 +- 12 Mp. Se pueden ver muchas otras características más específicas de este material consultando el Anexo B.

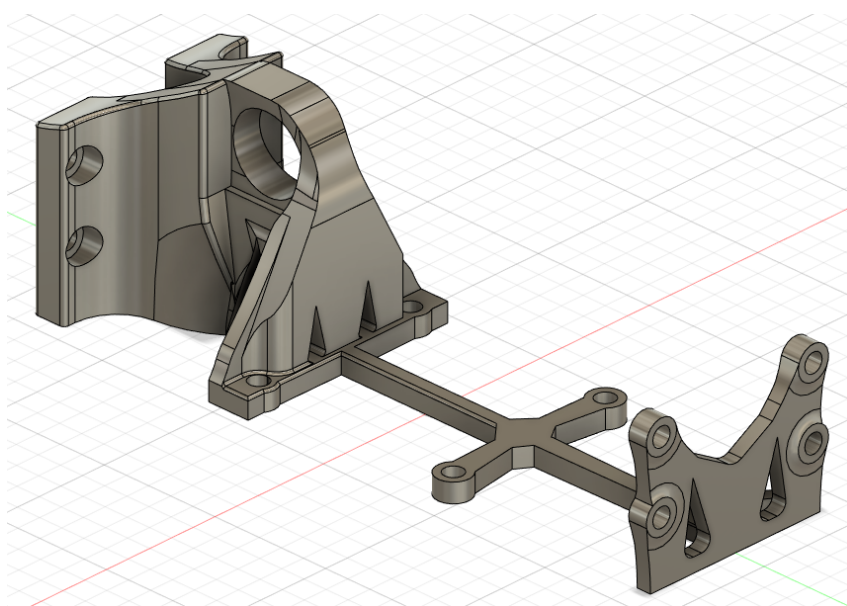
## 7.2. Adaptación de la pieza

Una vez se ha completado el diseño generativo, se obtuvo la pieza que se vio en la Figura 15, sin embargo, este volumen no puede ser fabricado directamente por la máquina, ya que para poder fabricarse por medio de esta tecnología se imponen ciertas restricciones. La primera de ellas es que no puede tener voladizos (partes de la pieza que no estén en contacto con la base desde la que se empieza a crear), ni un ángulo en el eje Z positivo, que será el que se seguirá a lo largo de la fabricación, mayor a 20-25<sup>o</sup>, que es el máximo permitido por la máquina sin necesidad de añadir soportes, en este caso se ha establecido un límite de 23<sup>o</sup>, por lo que se debe adaptar la pieza a las condiciones de fabricación permitidas.

El proceso que se seguirá consiste en tener como referencia la pieza obtenida para considerarla como el volumen mínimo necesario de la pieza final, y añadirle el material necesario para que pueda ser creada de manera autónoma por la M600. El resultado de esto, en varios pasos hasta llegar al final, puede verse en las Figuras 17 y 18, a lo largo de estos distintas etapas se ha incluido el material necesario para que pueda ser fabricable, también se ha ido añadiendo material para que la pieza pueda ser construida de una manera más continua, lo que facilita en gran parte el trabajo de la máquina. Por último se ha realizado un análisis de desmoldeo, para demostrar que cada uno de los rincones del volumen de la pieza cumple con el ángulo máximo posible para su creación.

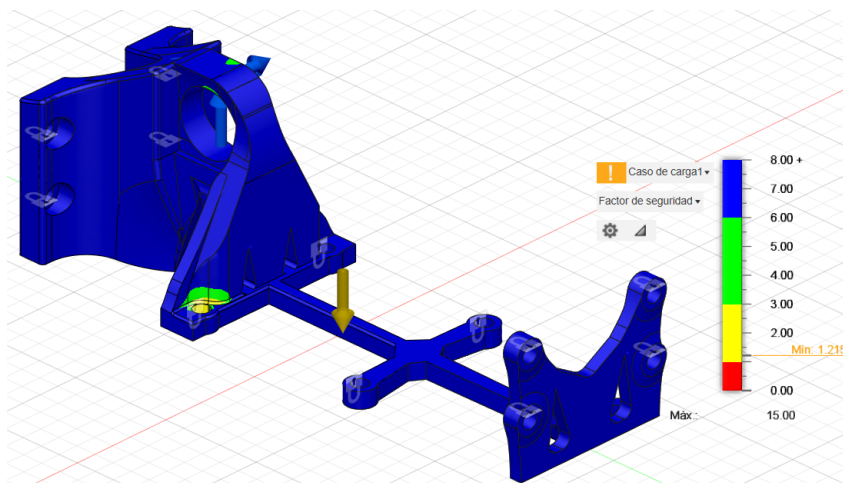


**Figura 17.** Primera adaptación del diseño generativo de la pieza para su fabricación

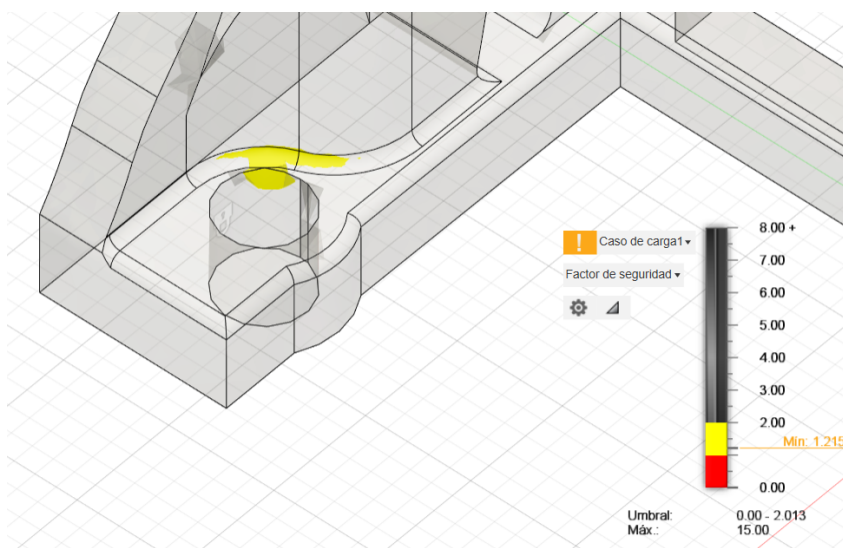


**Figura 18.** Adaptación del diseño generativo de la pieza realizado el análisis de desmoldeo

Una vez realizado el paso anterior, se debe volver a comprobar, mediante un análisis de elementos finitos, si esta adaptación es capaz de soportar las cargas con el factor de seguridad establecido, que en este caso ha sido 2, es decir, la pieza debe aguantar al menos 2 veces las cargas esperadas. En este caso el resultado ha sido desfavorable, ya que el factor de seguridad obtenido es de 1.2, como se ve en la Figura 19, donde las zonas azules y verdes son las que poseen un factor de seguridad mayor a 3 y las amarillas donde es menor que 3. También puede verse con un mayor aumento y siendo sólo visibles las zonas críticas, con factor de seguridad menor a 2 en la Figura 20. Es importante recalcar que en este caso estos puntos críticos han aparecido en esta zona por la dirección de las fuerzas, ya que si estas fueran en la dirección opuesta, estas zonas amarillas se generarían en la zona simétrica de la pieza.



**Figura 19.** Análisis de elementos finitos de la adaptación del modelo para su fabricación



**Figura 20.** Zona crítica del análisis de elementos finitos de la adaptación del modelo para su fabricación

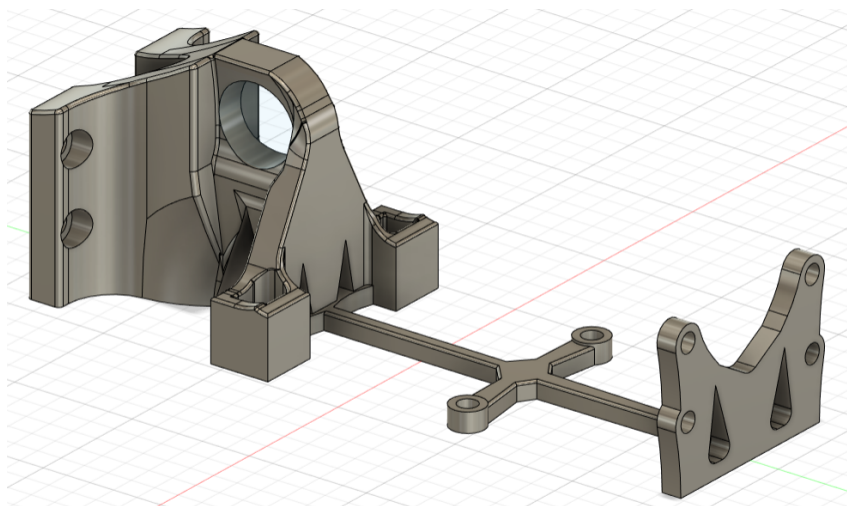
Aunque este factor menor sólo se encuentre en una pequeña zona es muy importante asegurarse que sea mayor al deseado en la totalidad del volumen, ya que una pequeña fractura, por pequeña que sea, podría resultar en la destrucción total de la pieza en un momento crítico durante su uso. Esta discrepancia se debe a los cambios realizados respecto al diseño generativo original de Autodesk Fusion 360, ya que el resultado obtenido tiene las medidas justas y necesarias, pudiendo cambiar en gran medida su resistencia con pequeños cambios, como ha sido este caso.

Un tema importante a tener en cuenta consiste en comprobar si el volumen en los alrededores de la pieza debe ser ocupado por otras, es decir, se debe comprobar que no haya riesgo de interferencia en el nuevo volumen creado con otras parte de la construcción donde vaya montada la misma, lo que imposibilitaría el uso apropiado de la pieza. En este caso, no se ha podido comprobar que habrá alrededor de la pieza a la hora del ensamblaje, por lo que se ha intentado ocupar el menor espacio posible de alrededor del volumen

original de la pieza, al ser un trabajo académico esto no supone un gran problema, pero en un caso real este es un tema muy crítico y debe de ser tratado con suma importancia, ya que podría generar graves problemas, como la imposibilidad de ensamblar todos los componentes o posibles rozamientos indeseados entre ellos.

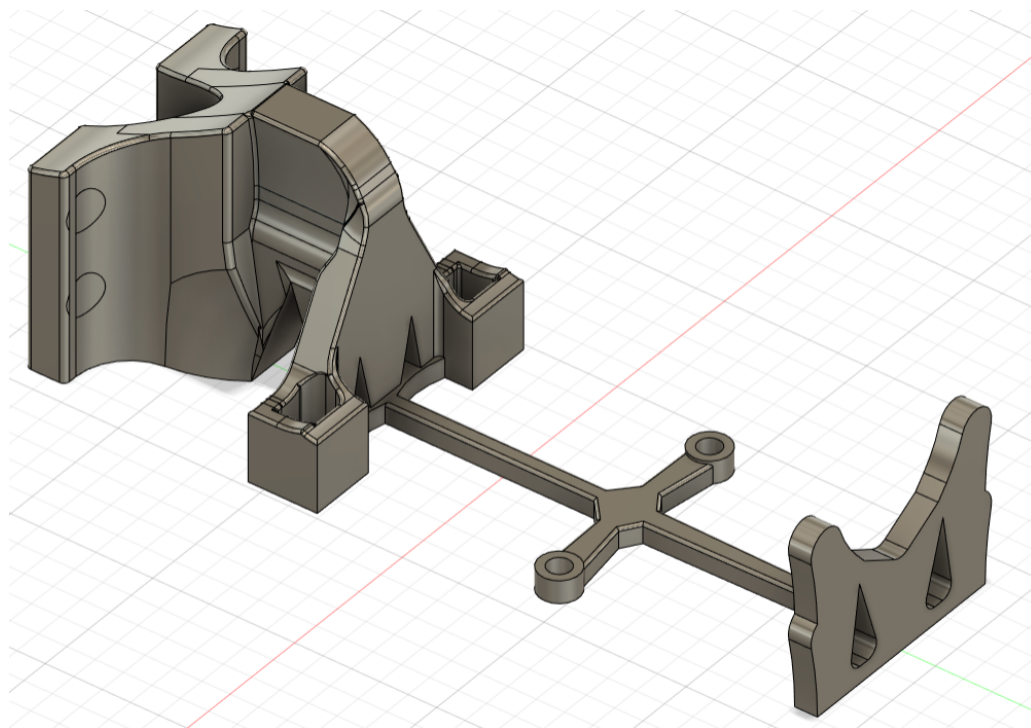
A continuación, se ha seguido con un proceso iterativo, en el que se añaden pequeños cambios a este diseño anterior, probando un nuevo análisis de elementos finitos con cada cambio hasta que se obtenga un resultado favorable.

El diseño obtenido, que es totalmente fabricable por la máquina M600, proyecto Atila, y además es resistente a todas las cargas aplicadas con un factor de seguridad de 2 es el mostrado en la Figura 21. En la imagen se puede apreciar que ha sido necesaria la adición de unos cubículos que alojan las fijaciones más cercanas al punto donde se aplican las fuerzas, estos fragmentos de material ayudan a disminuir las fuerzas ejercidas en la zona crítica que se podía ver en la Figura 19 distribuyéndolas de manera más equitativa. Los planos de este diseño con las medidas más importantes del mismo pueden verse en la sección 14, junto al resto de planos del estudio. El resto de medidas no se han añadido porque serían demasiadas, lo que haría que el plano no quedara nada claro.



**Figura 21.** Diseño final de la pieza para su fabricación

Por último, como se ha comentado anteriormente, con esta metodología de fabricación no se pueden crear agujeros en la dirección de producción de la misma, ya que al superar la mitad del agujero, este empieza a cerrarse, lo que lleva a un gran ángulo imposible de fabricar, por esto, para la impresión de la pieza se ha procedido a cerrar los agujeros que están posicionados en posición vertical para, posteriormente, mecanizarlos de manera tradicional en un banco de trabajo. La pieza una vez se han tapado esos agujeros se puede ver en la Figura 22. El plano de esta pieza también puede verse de la misma manera que el anterior en la sección 14.



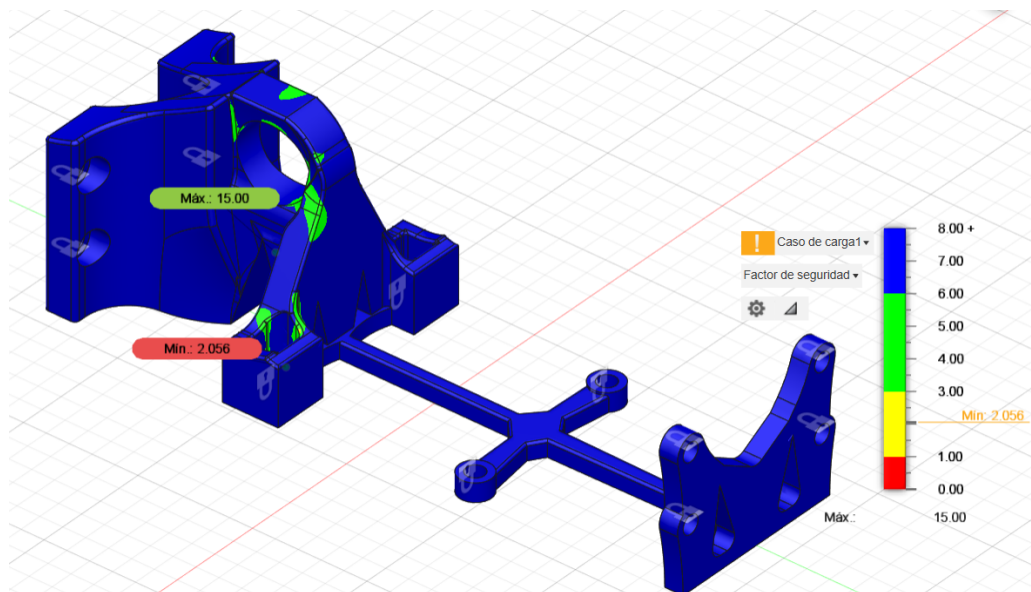
**Figura 22.** Diseño final de la pieza para su fabricación totalmente fabricable

## 8. Análisis realizados en el modelo final

En este apartado se mostrarán los principales análisis que se han realizado en el modelo final de la pieza. Estos han sido elaborados en el modelo que se puede ver en la Figura 21, que tiene los agujeros incluidos ya que será la pieza final que será utilizada. Como se ha mencionado anteriormente, las fuerzas que se han ejercido para el análisis son de 6000 Newtons en cada una de las direcciones, ejecutadas las tres en el interior del agujero. Posteriormente, en el apartado 10 se compararán estos resultados con los obtenidos en el estudio de comparación.

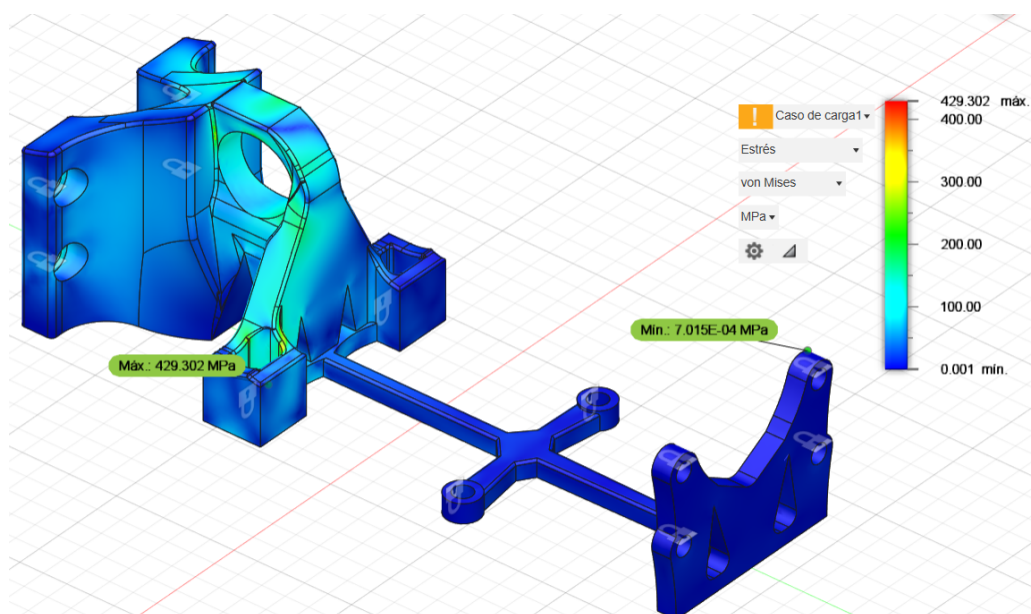
El primer estudio muestra lo ya desvelado en el apartado anterior, ya que demuestra que el factor de seguridad en todo el volumen es superior a 2 como se había establecido. Este análisis se puede ver en la Figura 23, siendo el valor máximo de 2.05.





**Figura 23.** Análisis del factor de seguridad de la pieza optimizada.

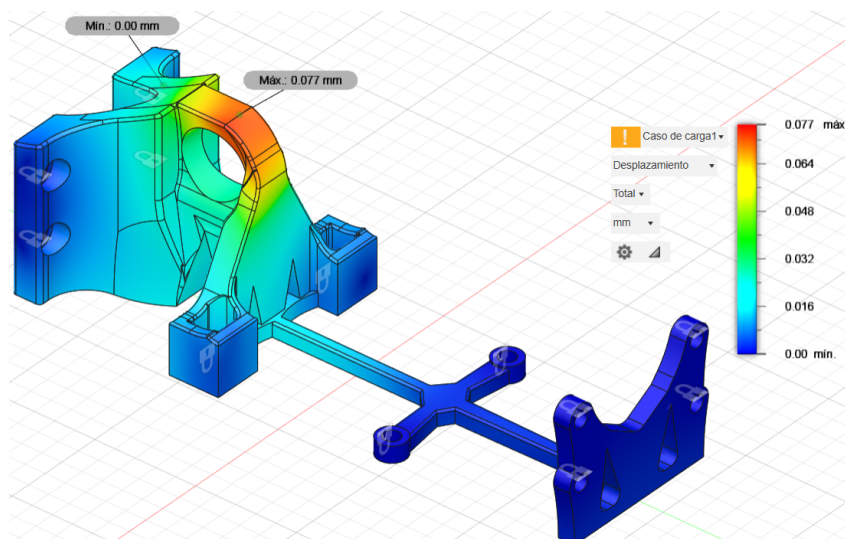
El segundo análisis muestra el estudio de estrés de Von Mises, este es un método para predecir la falla de un material bajo cargas complejas. Se expresa en megapascalas (MPa) y combina los esfuerzos en diferentes direcciones en un solo valor comparable con el límite elástico del material. Este estudio es útil para materiales dúctiles y ayuda a determinar si una estructura o componente fallará bajo una carga dada. En este caso, el límite elástico del titanio utilizado es de  $693 \pm 16$  MPa, como se ha mostrado anteriormente, mientras que en la figura 24, donde se muestra este estudio, se puede ver que el punto con un mayor estrés es de 429.3 MPa. También se puede comprobar que el mínimo, a pesar de ser muy cercano a 0, se queda en un valor muy pequeño.



**Figura 24.** Análisis de estrés de Von Mises de la pieza optimizada en MPa.

Para finalizar, el último estudio muestra el desplazamiento de cada punto a lo largo de

la pieza, este análisis mide la distancia total que se mueven los puntos de una estructura o componente bajo carga, expresada en milímetros (mm). El desplazamiento total es la suma vectorial de los desplazamientos en todas las direcciones (x, y, z). Este análisis es importante para evaluar la deformación de una estructura y asegurar que no exceda los límites permitidos para su funcionamiento seguro. Este estudio se puede ver en la Figura 25, el cual demuestra que el máximo desplazamiento es de 0.077 mm, lo cual es prácticamente despreciable para la mayoría de casos.



**Figura 25.** Análisis de desplazamiento de la pieza optimizada en mm.

## 9. Estudio económico

Este apartado se dedica a la estimación de costes. En él, se realizará un análisis detallado para determinar el presupuesto que habría sido necesario si el proyecto se hubiera desarrollado en respuesta a una propuesta de una entidad externa. Este ejercicio nos permitirá evaluar el valor económico del trabajo realizado, considerando todos los recursos invertidos como si se tratara de un proyecto profesional comisionado por una organización ajena a la universidad.

En este caso los costes se van a dividir, por una parte se desglosan los costes directos, separando los que hacen referencia al diseño y los de la fabricación de la pieza, estos costes son aquellos que están estrechamente vinculados con su ejecución e influyen directamente en la producción y determinación de su precio. Por otra parte se calculan los costes indirectos, que no se incluyen en el coste del servicio o producto, sino que son propios de la electricidad, agua, etc.

### 9.1. Costes relacionados con el diseño

En este proyecto específico los costes directos relacionados con el diseño pueden dividirse en tres categorías: los recursos humanos involucrados, el equipamiento utilizado y y



las licencias de software necesarias.

La estimación de costes comenzará con el cálculo de los gastos asociados al personal que ha participado en el desarrollo del trabajo. Este cálculo se realizará en dos partes:

- La remuneración del tutor, que se basará en las retribuciones oficiales para cargos públicos publicadas por la universidad.
- La compensación del alumno, que se estimará considerando el salario de un ingeniero aeroespacial junior en el mercado laboral actual, utilizando datos disponibles en fuentes en línea.

Para este cálculo es necesario conocer el sueldo bruto por hora de cada uno de ellos, para ello nos basaremos en el sueldo medio anual de cada uno de ellos y las horas laborables que tiene un año, que son iguales en ambos casos y en este caso se usará el valor de 1735 horas laborables al año.

En el caso del tutor, un sueldo medio de un profesor titular de universidad puede ser el de 38000 €. Esto dividido entre las 1735 horas laborables al año deja un resultado de 21.09 €/hora.

Para el alumno el cálculo es el mismo, la diferencia es que un sueldo medio anual en este caso puede ser de 25000 €, con lo que se puede obtener un resultado de 14.41 €/hora.

Los tiempos que ha trabajado cada uno de estos dos anteriores junto al valor final del coste de personal de cada uno puede verse en la Tabla 1.

En cuanto al gasto destinado a las licencias de software, en este caso solo ha sido necesaria la de Autodesk Fusion 360, ya que el texto se ha escrito en Overleaf, usando la versión gratuita. En este caso la licencia de Autodesk Fusion 360 la ha ofrecido la universidad, pero se va a suponer que el autor del trabajo ha necesitado comprarla. El coste anual de esta licencia es de 757 €. Al igual que los costes de personal, los tiempos de uso y el coste final pueden verse en la Tabla 1. El coste unitario o por hora se puede obtener dividiendo el coste anual de la licencia por las horas anuales laborables, lo que deja un resultado de 0.44 €/hora.

Por último, se realiza la estimación de coste basada en el equipo utilizado. Esto se puede calcular utilizando la amortización del equipo. Este valor se puede conseguir de la siguiente manera:

$$\text{Amortización anual} = \frac{\text{Valor inicial} - \text{Valor residual}}{\text{Vida útil en años}}$$

Donde el valor inicial es el precio al que se compró y el valor residual es lo que puedes obtener por venderlo al final de su vida útil, del que se utilizará un valor aproximado. En este caso esto da el siguiente resultado:

$$\text{Amortización anual} = \frac{1100\text{€} - 220\text{€}}{5 \text{ años}} = 176\text{€por año}$$

Al igual que los otros casos, dividiendo este valor por las 1735 horas laborables anuales se obtiene el coste unitario por cada hora de uso, obteniendo 0.101 €/año. Los resultados finales del coste pueden verse en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Costes directos relacionados con el diseño de la pieza

| <b>Personal</b>                 |        |                |                 |
|---------------------------------|--------|----------------|-----------------|
|                                 | Tiempo | Coste unitario | Valor final     |
| Ingeniero aeroespacial junior   | 350    | 14.41          | 5043.5          |
| Profesor titular de universidad | 25     | 21.09          | 527.25          |
| Subtotal                        |        |                | 5570.75 €       |
| <b>Software</b>                 |        |                |                 |
|                                 | Tiempo | Coste unitario | Valor final     |
| Licencia Autodesk Fusion 360    | 220    | 0.44           | 96.8            |
| Subtotal                        |        |                | 96.8 €          |
| <b>Equipo</b>                   |        |                |                 |
|                                 | Tiempo | Coste unitario | Valor final     |
| Ordenador portátil              | 350    | 0.101          | 35.35           |
| Subtotal                        |        |                | 35.35 €         |
| <b>COSTES DIRECTOS TOTALES</b>  |        |                | <b>5703.7 €</b> |

## 9.2. Costes relacionados con la fabricación

Los costes asociados a la fabricación han sido obtenidos gracias a AIDIMME, estos costes se dividirán entre el equipamiento utilizado y la mano de obra humana. Todo el desglose de costes relacionados con la fabricación de la pieza pueden verse en la Tabla 2.

Lo primero que es necesario para que la fabricación sea posible es la máquina de fabricación aditiva DED, en este caso un prototipo de la M600 de Meltio llamado Atila. El precio de esta máquina es de 200000 €, la amortización y el coste unitario del uso de la máquina se calculará de la misma manera que el equipo utilizado. En este caso la vida útil es mucho mayor, se van a suponer 20 años, y un coste residual del 10 %, es decir, 20000 €. Otro dato a tener en cuenta es que esta máquina no necesita supervisión constante, por lo que puede estar en uso más tiempo de las 8 horas laborales, en este caso se considera que está encendida 12 horas 300 días del año, lo que lleva a tener 3600 horas útiles.

$$\text{Amortización anual} = \frac{200000\text{€} - 20000\text{€}}{20 \text{ años}} = 9000\text{€por año}$$

Dividiendo este resultado entre las horas útiles anuales se obtiene un coste unitario

de 2.5 €por hora. En este caso el tiempo de uso de la máquina ha sido de 4 horas y 40 minutos.

Por otro lado, se deben tener en cuenta los materiales necesarios, se ha necesitado titanio valorado en 22.02 €y gas argón para la atmósfera inerte valorado en 25.89 €. En otros equipamientos varios necesarios para el proceso de fabricación se han debido desembolsar 79.20 €.

El último coste relacionado con equipamiento engloba el último paso de la fabricación, la creación de los agujeros que no fueron posibles de hacer en el diseño de fabricación aditiva mediante fabricación tradicional, el coste de esto asciende a 40 €.

Pasando a los costes asociados a la mano de obra humana se ha debido de preparar el fichero para la máquina, preparar la máquina misma, etc. El precio de esto asciende a 64€.

**Tabla 2.** Costes directos relacionados con la fabricación de la pieza

| <b>Equipo</b>                  |        |                |                 |
|--------------------------------|--------|----------------|-----------------|
|                                | Tiempo | Coste unitario | Valor final     |
| Máquina Atila                  | 4.66   | 2.5            | 11.65           |
| Titanio                        |        |                | 22.02           |
| Gas argón                      |        |                | 25.89           |
| Equipamiento                   |        |                | 79.20           |
| Fabricación de agujeros        |        |                | 40              |
| Subtotal                       |        |                | 178.76 €        |
| <b>Personal</b>                |        |                |                 |
|                                | Tiempo | Coste unitario | Valor final     |
| Mano de obra                   |        |                | 64              |
| Subtotal                       |        |                | 64 €            |
| <b>COSTES DIRECTOS TOTALES</b> |        |                | <b>242.76 €</b> |

Viendo los resultados obtenidos, el precio que se podría establecer para la venta de este pieza, en el caso de que otra empresa llegara con el diseño totalmente realizado, sería de 340 €, contando con las ganancias.

### 9.3. Costes indirectos

Los costes indirectos, como por ejemplo electricidad u otros gastos generales se van a calcular en este caso como un porcentaje de los costes directos, usando en este caso un valor del 5% de estos costes.

Sumando los dos valores asociados a los costes directos se obtiene la suma de 5946.46, aplicando el porcentaje mencionado se llegan a unos costes indirectos de 297.32 €.

Finalmente, los costes totales que ha tenido este estudio al completo, sumando las tres diferentes categorías da un resultado de 6243.78 €.

## 10. Comparación de las diferentes tecnologías

En este apartado, se comparan los resultados obtenidos en la optimización de la pieza mediante el método DED (Directed Energy Deposition) y el método SLM (Selective Laser Melting).

### 10.1. Parámetros de comparación

**Tabla 3.** Comparación entre fabricación tradicional, DED y SLM

| Parámetro                     | Trad.       | DED        | SLM       |
|-------------------------------|-------------|------------|-----------|
| Precisión (mm)                | $\pm 0,025$ | $\pm 0,25$ | $\pm 0,1$ |
| Rugosidad (Ra $\mu\text{m}$ ) | 0.5         | 15         | 5         |
| Coste (€)                     | 400         | 340        | 1080      |
| Tiempo fab. (h)               | 5           | 5.33       | 8         |
| Peso (g)                      | 225.81      | 154.874    | 162.605   |
| Volumen ( $\text{cm}^3$ )     | 80.646      | 35.199     | 37.097    |

### 10.2. Análisis de resultados

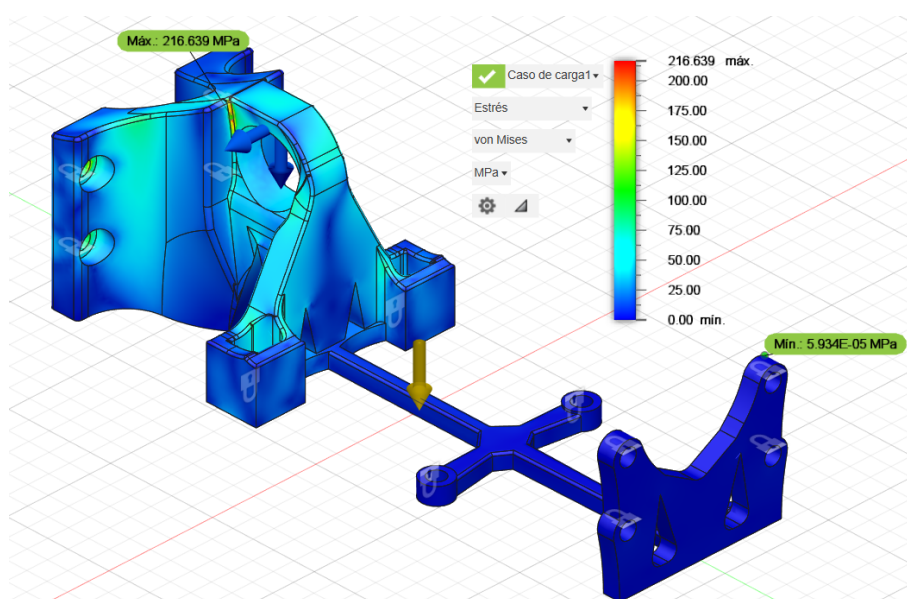
**Precisión dimensional:** En la fabricación tradicional se puede obtener una precisión muy alta, dependiendo de qué máquina se utilice, se pueden obtener piezas dentro de una tolerancia de hasta  $\pm 0,025$  mm. En el caso de la tecnología SLM, aunque no sea tan buena como la fabricación tradicional, es capaz de llegar a una precisión de  $\pm 0,1$  mm. Por último la tecnología DED es la peor en este caso, pudiendo llegar a una precisión de  $\pm 0,25$  mm, sin embargo, para esta pieza en concreto, esta precisión es suficiente, por lo que es perfectamente usable.

**Acabado superficial:** El parámetro utilizado para medir el acabado superficial se conoce como rugosidad (Ra), que es la media aritmética de los valores absolutos de las desviaciones del perfil de rugosidad desde la línea media dentro de la longitud de evaluación, por lo que un valor menor de Ra indica una superficie más lisa, otra con un valor menor, una superficie más rugosa.

En este caso, la fabricación tradicional, en función de la máquina usada puede llegar a un excelente acabado superficial, de hasta 0.5 micrometros ( $\mu\text{m}$ ), por otro lado, la fabricación aditiva SLM obtiene resultados algo más moderados, con valores que pueden llegar a los 5  $\mu\text{m}$ . En último lugar, la tecnología DED obtiene los resultados más rugosos,

siendo difícil obtener superficies con rugosidad inferior a  $15 \mu m$ , con este valor casi siempre se requiere un post-procesado de acabado para terminar la pieza.

**Propiedades mecánicas:** En este ámbito es donde se pueden buscar las principales diferencias o similitudes con el resultado de la pieza optimizada por SLM, ya que es donde más información da el Anexo A. En este Anexo se puede ver, con el estudio de Von Mises, los resultados de aplicar un ejemplo de cargas de estas dimensiones:  $F_x = 3 \text{ kN}$ ,  $F_y = 3 \text{ kN}$ ,  $F_z = -2 \text{ kN}$ . Podemos suponer que la pieza optimizada por DED es totalmente capaz de aguantar estas cargas, ya que las que ha aguantado a la hora de su creación son mayores, sin embargo, en la Figura 26 se puede ver el resultado del estudio de Von Mises en esta optimización. El máximo estrés en este caso es de 216.639 MPa, mientras que en el estudio del Anexo A es de 289.5 MPa, por lo que se puede asegurar que la pieza creada por DED actúa mejor frente a cargas que la otra.



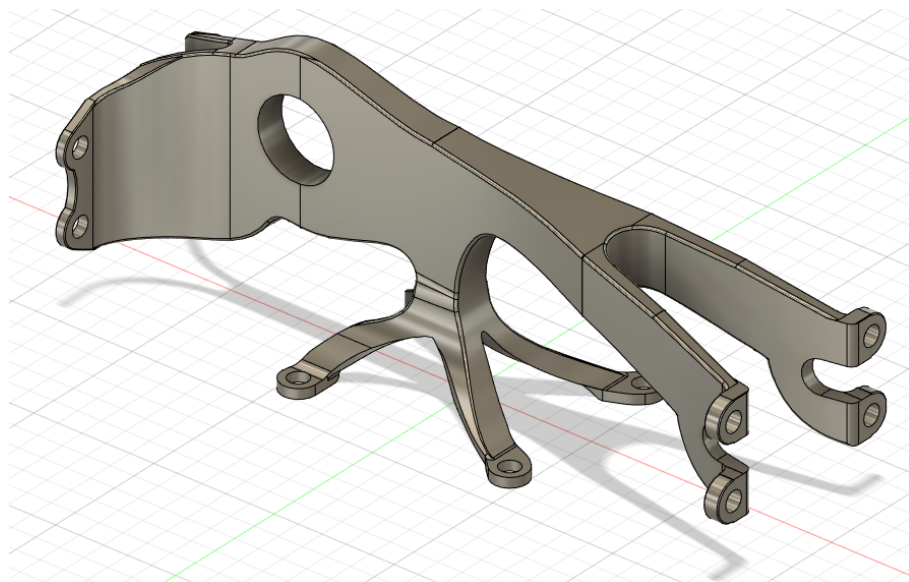
**Figura 26.** Estudio de Von Mises en pieza optimizada DED con cargas del Anexo A.

**Coste:** En cuanto al coste de fabricación, en este estudio solamente se ha analizado el que tendría la pieza fabricada en DED, por lo que para la comparación con las diferentes tecnologías se ha pedido un presupuesto a diferentes empresas para simular lo que costaría fabricar la pieza mediante fabricación tradicional y con la tecnología SLM. Las páginas utilizadas han sido Protolabs [18], Xometry [20] y Weerg [16]. Es importante tener en cuenta que el diseño de la pieza en función de la tecnología utilizada es distinto.

Recordando el resultado del apartado 9, el precio que tendría la pieza si quisieramos venderla, sin tener en cuenta los costes asociados a su diseño sería de 340 €.

Por otra parte, los precios obtenidos con los presupuestos de la fabricación tradicional varían respecto a la empresa y al tiempo de envío, ya que hay varias opciones disponibles dependiendo de la velocidad. Los costes se encuentran en un intervalo de entre 250 € y 600 €, por lo que, para la comparación se usará un valor medio de 400 €. Como se ha visto en la literatura estos costes disminuirían en el caso de la necesidad de fabricar la pieza en serie, pero no es el caso.

Por último, para la tecnología SLM, al no disponer del diseño utilizado en el Anexo A, se ha realizado otro intentando imitar lo máximo posible al del anexo utilizado Autodesk Fusion 360, el cual se puede ver en la Figura 27. Es de esperar que este presupuesto sea algo más alto porque, como se puede ver en la pieza, no está totalmente adaptada a la fabricación 3D, por lo que es posible que se deban utilizar alguna especie de soportes. En este caso el precio obtenido para la compra de la pieza por parte la empresa ha sido de 1080 €.



**Figura 27.** Diseño para la fabricación SLM imitando el del anexo A.

**Tiempo de fabricación:** En cuanto al tiempo de fabricación, en el caso de la fabricación aditiva mediante DED, el tiempo es de 4 horas y 40 minutos en el fabricado 3D, a eso hay que sumarle unos 40 minutos más, tiempo en el que se realizarían los agujeros que deben hacerse mediante fabricación tradicional, llegando a un total de 5 horas y 20 minutos.

En el caso de la tecnología SLM se debe hacer una aproximación, ya que este parámetro no se ha proporcionado por la empresa que ha dado el presupuesto. Se puede saber, gracias a la literatura que la tecnología SLM es algo más lenta que la DED, por lo que se asume un tiempo de fabricación de 8 horas.

En el último caso, la fabricación tradicional, esto puede variar en gran medida, ya que hay una gran variedad de distintas máquinas con las que se puede realizar esta pieza. Debido a esto, como el tiempo puede ser muy variable, se van a asumir unas 5 horas de trabajo.

**Peso:** El peso es uno de los parámetros más críticos de este estudio, ya que era el principal objetivo de mejora para el mismo, esto era debido a que la pieza estudiada es un componente aeroespacial, un ámbito en el que el peso es crucial para el funcionamiento diario, pudiendo conseguir grandes ahorros de combustible, entre otros, disminuyendo el peso en pequeñas medidas.

Los resultados de la reducción de peso son muy buenos usando ambas tecnologías, ya

que la masa inicial era de 225.81 gramos (g), la masa de la fabricación por SLM es de 162.605, obteniendo una reducción de masa del 28 %, y la masa de la optimización por DED es de 154.874, obteniendo una reducción del 31.4 %, siendo este el mejor resultado, aunque los dos sean similares. Con esto, podemos decir que uno de los principales objetivos del estudio se ha cumplido.

**Volumen:** En este caso, el volumen no es un parámetro tan importante como el peso, ya que la pieza tiene un volumen adjudicado en el conjunto de componentes una vez ensamblado y su funcionamiento no cambia dependiendo del volumen que ocupe, sin embargo, si que es importante el hecho de que un menor volumen conlleva una menor cantidad de material utilizado, lo que permite un gran ahorro del mismo.

El volumen de material que presentaba la pieza inicial era de 80.646 centímetros cúbicos ( $cm^3$ ), obteniendo 37.097 ( $cm^3$ ) con la tecnología SLM, con una reducción del 54 % y 35.199 ( $cm^3$ ) en la fabricación por DED, resultando en una reducción de volumen del 56.3 %, siendo algo mejor que la SLM. El motivo por el que esta reducción no concuerda con la reducción de peso es debido a que, como se ha explicado anteriormente, la pieza originalmente estaba fabricada con aluminio, mientras que las optimizaciones se han realizado en titanio.

**Material perdido en el proceso:** Este parámetro principalmente diferencia a la fabricación tradicional de las tecnologías de fabricación aditiva, ya que es uno de los principales motivos por los que usar la fabricación aditiva. Esto es debido a que la fabricación tradicional es un método sustractivo, en el que se parte de un bloque de material del que se elimina materia en procesos como el fresado o el taladrado, por otra parte, en ambos procesos de fabricación aditiva se parte desde 0 y se añade material, lo que se conoce como método aditivo, esto hace que los desechos de material sean mucho menores, solo perdiendo algo en los momentos del post-procesamiento como por ejemplo para disminuir la rugosidad.

### 10.3. Interpretación de los resultados comparativos

La elección entre DED, SLM o fabricación tradicional dependerá de los requisitos específicos de la aplicación:

- DED es preferible cuando gracias a esta tecnología es posible ahorrar gran cantidad de material respecto a la fabricación tradicional y, al mismo tiempo, no se necesita una gran precisión dimensional, ya que tiene la peor de los tres casos. Sin embargo, en los casos donde esto no sea necesario ha conseguido el menor peso y volumen, a la vez que el menor precio y tiempo de fabricación.
- SLM también es adecuado para piezas donde sea posible ahorrar material, una de las principales diferencias con la tecnología DED es la gran precisión dimensional que se puede obtener, haciendo que este tipo de fabricación aditiva sea necesario en algunos casos concretos.
- La fabricación tradicional tiene las desventajas que se han comentado en la parte teórica, la principal en este caso el peso y volumen de la pieza final. No obstante,

en situaciones donde esto no sea importante y sean necesarias una gran cantidad de piezas que se pueden fabricar en serie, es posible que este siga siendo el mejor método.

En el caso de la pieza optimizada para este estudio, se puede afirmar que el método DED estudiado es el más favorable.



## 11. Relación del trabajo con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) constituyen un plan global adoptado por la ONU en 2015 como parte de la Agenda 2030. Este marco comprende 17 metas interconectadas diseñadas para impulsar acciones que protejan el planeta, eliminen la pobreza y mejoren la calidad de vida a nivel mundial. En este capítulo, analizaremos cómo los diversos ODS se relacionan y se aplican al contenido de este Trabajo Fin de Grado, destacando su relevancia en el contexto de nuestra investigación. La relación de cada uno de ellos puede verse en la Tabla 4.

**Tabla 4.** Relación de los ODS con este Trabajo Fin de Grado

| Objetivo de Desarrollo Sostenible          | Alta                                | Media                               | Baja                                | No procede                          |
|--|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| 1. Fin de la pobreza                       | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 2. Hambre cero                             | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 3. Salud y bienestar                       | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 4. Educación de calidad                    | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 5. Igualdad de género                      | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 6. Agua limpia y saneamiento               | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 7. Energía asequible y no contaminante     | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 8. Trabajo decente y crecimiento económico | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 9. Industria, innovación e infraestructura | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            |
| 10. Reducción de las desigualdades         | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 11. Ciudades y comunidades sostenibles     | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 12. Producción y consumo responsables      | <input type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            |
| 13. Acción por el clima                    | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            |
| 14. Vida submarina                         | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 15. Vida de ecosistemas terrestres         | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 16. Paz, justicia e instituciones sólidas  | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 17. Alianzas para lograr los objetivos     | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/> |

De la Tabla 4 se puede obtener que hay principalmente tres Objetivos de Desarrollo Sostenible que se adecuan a este Trabajo de Fin de Grado, estos son el objetivo 9 (Industria, innovación e infraestructura), el objetivo 12 (Producción y consumo responsables), y el objetivo 13 (Acción por el clima).

- Objetivo 9 (Industria, innovación e infraestructura): Altamente relacionado con este TFG, ya que su objetivo principal es buscar la innovación en un ámbito como es la fabricación aeroespacial, intentando obtener una nueva manera de fabricar piezas gracias a la fabricación aditiva, una nueva tecnología.



**Figura 28.** ODS 9: Industria, innovación e infraestructura

- Objetivo 12 (Producción y consumo responsables): Este objetivo está relacionado con este TFG debido a una de las principales características de la fabricación aditiva. En este tipo de fabricación no se malgasta prácticamente nada de material, como puede ser en el caso de otras tecnologías como la fabricación tradicional, donde en métodos como el fresado o el torneado se pierde gran parte del material que no podrá volver a ser utilizado. Por otro lado la fabricación aditiva solamente utiliza el material que conforma la pieza final, lo que genera un gran ahorro.



**Figura 29.** ODS 12: Producción y consumo responsables

- Objetivo 13 (Acción por el clima): El cumplimiento de este objetivo está relacionado con el objetivo 12, ya que al generar mucha menos cantidad de material que se deba desechar, se producen menos residuos que puedan contribuir a la contaminación del clima de distintas maneras.



**Figura 30.** ODS 13: Acción por el clima

## 12. Pliego de condiciones

El pliego de condiciones es un documento que trata de unir las normas, recomendaciones, instrucciones o condiciones que se deben tener en cuenta a lo largo del Trabajo de Fin de Grado. A lo largo del mismo se recogerán las distintas especificaciones técnicas, legales, facultativas y económicas necesarias. Es importante aclarar que las especificaciones facultativas y económicas se explican para el supuesto caso de que una entidad quisiera comprar el producto final, aunque el objetivo esperado del mismo no es este, si no el de un trabajo académico en el que se crea un prototipo.

### 12.1. Condiciones de carácter legal

Este apartado detalla las principales leyes y normativas que regulan la salud laboral. Se enfoca en las más relevantes para el trabajo descrito en este documento, incluyendo:

- La Ordenanza General de Seguridad e Higiene en el Trabajo, con la Orden del 9 de marzo de 1971.
- El Real Decreto 486/1997, sobre disposiciones mínimas de seguridad y salud en los lugares de trabajo.
- El Real Decreto 488/1997, que especifica la normativa para trabajos con pantallas de visualización.
- El Real Decreto 1215/1997, por el que se establecen las disposiciones mínimas de seguridad y salud para la utilización por los trabajadores de los equipos de trabajo.

Estas regulaciones son fundamentales para garantizar la seguridad y el bienestar de los trabajadores en sus entornos laborales.

#### 12.1.1. Orden de 9 de marzo de 1971

Esta Orden aprueba la Ordenanza General de Seguridad e Higiene en el Trabajo, publicada en el Boletín Oficial del Estado con la referencia BOE-A-1971-380. Las Disposiciones Generales de esta Ordenanza establecen los derechos y obligaciones de los trabajadores en materia de seguridad e higiene laboral. Uno de los artículos principales para este caso es el Artículo 11, que se puede ver a continuación:

*Artículo 11. Obligaciones y derechos de los trabajadores.*

*Incumbe a los trabajadores la obligación de cooperar en la prevención de riesgos profesionales en la Empresa y el mantenimiento de la máxima higiene en la misma, a cuyos fines deberán cumplir fielmente los preceptos de esta Ordenanza y sus instrucciones complementarias, así como las órdenes e instrucciones que a tales efectos les sean dados por sus superiores.*

*Los trabajadores, expresamente, están obligados a:*

*A) Recibir las enseñanzas sobre Seguridad e Higiene y sobre salvamento y socorrismo en los centros de trabajo que les sean facilitadas por la Empresa o en las Instituciones del Plan Nacional.*

*B) Usar correctamente los medios de protección personal y cuidar de su perfecto estado y conservación.*

*C) Dar cuenta inmediata a sus superiores de las averías y deficiencias que puedan ocasionar peligros en cualquier centro o puesto de trabajo.*

*D) Cuidar y mantener su higiene personal, en evitación de enfermedades contagiosas o de molestias a sus compañeros de trabajo.*

*E) Someterse a los reconocimientos médicos preceptivos y a las vacunaciones o inmunizaciones ordenadas por las Autoridades Sanitarias competentes o por el Servicio Médico de Empresa.*

*F) No introducir bebidas u otras sustancias no autorizadas en los centros de trabajo, ni presentarse o permanecer en los mismos en estado de embriaguez o de cualquier otro género de intoxicación.*

*G) Cooperar en la extinción de siniestros y en el salvamento de las víctimas de accidentes de trabajo en las condiciones que, en cada caso, fueren racionalmente exigibles.*

### **12.1.2. Real Decreto 486/1997**

Transcurridos 25 años desde la implementación de la Orden del 9 de marzo de 1971, se reconoce la necesidad de derogar ciertos capítulos del Título II de dicha Ordenanza. Esta decisión responde a compromisos internacionales y avances tecnológicos. Hasta la fecha, gran parte de los temas abordados en este Real Decreto habían sido regulados por la mencionada Ordenanza.

El Real Decreto incluye varios Anexos que especifican las características necesarias para un espacio de trabajo adecuado. Estos abarcan aspectos como orden, limpieza, condiciones ambientales, iluminación y material de primeros auxilios.

### **12.1.3. Real Decreto 488/1997**

El Real Decreto 488/1997 establece la normativa y regulaciones para la protección de los trabajadores que utilizan pantallas de visualización, comúnmente en entornos de oficina. Esto es importante en este caso porque, a pesar de que parte del trabajo se realiza en la fabricación de la pieza, un gran porcentaje del mismo se ha producido en horas frente a la pantalla, con los procesos de diseño de la pieza o los análisis de elementos finitos realizados. Los anexos de este Real Decreto detallan las disposiciones mínimas referentes al equipo empleado y al ambiente laboral. A continuación, se presentan estos

anexos que contienen los requisitos esenciales para el equipamiento y el entorno de trabajo.

1. *Equipo*

a) *Observación general.*

*La utilización en sí misma del equipo no debe ser una fuente de riesgo para los trabajadores.*

b) *Pantalla.*

*Los caracteres de la pantalla deberán estar bien definidos y configurados de forma clara, y tener una dimensión suficiente, disponiendo de un espacio adecuado entre los caracteres y los renglones.*

*La imagen de la pantalla deberá ser estable, sin fenómenos de destellos, centelleos u otras formas de inestabilidad.*

*El usuario de terminales con pantalla deberá poder ajustar fácilmente la luminosidad y el contraste entre los caracteres y el fondo de la pantalla, y adaptarlos fácilmente a las condiciones del entorno.*

*La pantalla deberá ser orientable e inclinable a voluntad, con facilidad para adaptarse a las necesidades del usuario.*

*Podrá utilizarse un pedestal independiente o una mesa regulable para la pantalla.*

*La pantalla no deberá tener reflejos ni reverberaciones que puedan molestar al usuario.*

c) *Teclado.*

*El teclado deberá ser inclinable e independiente de la pantalla para permitir que el trabajador adopte una postura cómoda que no provoque cansancio en los brazos o las manos.*

*Tendrá que haber espacio suficiente delante del teclado para que el usuario pueda apoyar los brazos y las manos.*

*La superficie del teclado deberá ser mate para evitar los reflejos.*

*La disposición del teclado y las características de las teclas deberán tender a facilitar su utilización.*

*Los símbolos de las teclas deberán resaltar suficientemente y ser legibles desde la posición normal de trabajo.*

d) *Mesa o superficie de trabajo.*

*La mesa o superficie de trabajo deberán ser poco reflectantes, tener dimensiones suficientes y permitir una colocación flexible de la pantalla, del teclado, de los documentos y del material accesorio.*

*El soporte de los documentos deberá ser estable y regulable y estará colocado de tal modo que se reduzcan al mínimo los movimientos incómodos de la cabeza y los ojos.*

*El espacio deberá ser suficiente para permitir a los trabajadores una posición cómoda.*

*e) Asiento de trabajo.*

*El asiento de trabajo deberá ser estable, proporcionando al usuario libertad de movimiento y procurándole una postura confortable.*

*La altura del mismo deberá ser regulable.*

*El respaldo deberá ser reclinable y su altura ajustable.*

*Se pondrá un reposapiés a disposición de quienes lo deseen.*

*2. Entorno*

*a) Espacio.*

*El puesto de trabajo deberá tener una dimensión suficiente y estar acondicionado de tal manera que haya espacio suficiente para permitir los cambios de postura y movimientos de trabajo.*

*b) Iluminación.*

*La iluminación general y la iluminación especial (lámparas de trabajo), cuando sea necesaria, deberán garantizar unos niveles adecuados de iluminación y unas relaciones adecuadas de luminancias entre la pantalla y su entorno, habida cuenta del carácter del trabajo, de las necesidades visuales del usuario y del tipo de pantalla utilizado.*

*El acondicionamiento del lugar de trabajo y del puesto de trabajo, así como la situación y las características técnicas de las fuentes de luz artificial, deberán coordinarse de tal manera que se eviten los deslumbramientos y los reflejos molestos en la pantalla u otras partes del equipo.*

*c) Reflejos y deslumbramientos.*

*Los puestos de trabajo deberán instalarse de tal forma que las fuentes de luz, tales como ventanas y otras aberturas, los tabiques transparentes o translúcidos y los equipos o tabiques de color claro no provoquen deslumbramiento directo ni produzcan reflejos molestos en la pantalla.*

*Las ventanas deberán ir equipadas con un dispositivo de cobertura adecuado y regulable para atenuar la luz del día que ilumine el puesto de trabajo.*

*d) Ruido.*

*El ruido producido por los equipos instalados en el puesto de trabajo deberá tenerse en cuenta al diseñar el mismo, en especial para que no se perturbe la atención ni la palabra.*

*e) Calor.*

*Los equipos instalados en el puesto de trabajo no deberán producir un calor adicional que pueda ocasionar molestias a los trabajadores.*

*f) Emisiones.*

*Toda radiación, excepción hecha de la parte visible del espectro electromagnético, deberá reducirse a niveles insignificantes desde el punto de vista de la protección de la seguridad y de la salud de los trabajadores.*

*g) Humedad.*

*Deberá crearse y mantenerse una humedad aceptable.*

### *3. Interconexión ordenador/persona*

*Para la elaboración, la elección, la compra y la modificación de programas, así como para la definición de las tareas que requieran pantallas de visualización, el empresario tendrá en cuenta los siguientes factores:*

*a) El programa habrá de estar adaptado a la tarea que deba realizarse.*

*b) El programa habrá de ser fácil de utilizar y deberá, en su caso, poder adaptarse al nivel de conocimientos y de experiencia del usuario; no deberá utilizarse ningún dispositivo cuantitativo o cualitativo de control sin que los trabajadores hayan sido informados y previa consulta con sus representantes.*

*c) Los sistemas deberán proporcionar a los trabajadores indicaciones sobre su desarrollo.*

*d) Los sistemas deberán mostrar la información en un formato y a un ritmo adaptados a los operadores.*

*e) Los principios de ergonomía deberán aplicarse en particular al tratamiento de la información por parte de la persona.*

#### **12.1.4. Real Decreto 1215/1997**

El Real Decreto 1215/1997 establece las disposiciones mínimas de seguridad y salud para la utilización de equipos de trabajo en el ámbito laboral. Este decreto se aplica a todos los equipos utilizados por los trabajadores y obliga a los empresarios a garantizar que dichos equipos sean seguros y adecuados para las tareas a realizar. Exige la realización de comprobaciones periódicas de los equipos, así como la formación e información de los trabajadores sobre los riesgos asociados a su uso. Además, promueve la consulta y participación de los trabajadores en cuestiones de seguridad relacionadas con los equipos.

El decreto incluye anexos técnicos que detallan las disposiciones específicas aplicables tanto a los equipos como a su utilización, constituyendo así un elemento fundamental en la normativa de seguridad laboral para el uso de maquinaria y equipos en el entorno de trabajo. Este Real decreto es muy importante en este caso para la parte de la realización

del trabajo en la que se fabrica la pieza. Un ejemplo de un artículo destacable es el Artículo 4:

*Artículo 4. Comprobación de los equipos de trabajo.*

*1. El empresario adoptará las medidas necesarias para que aquellos equipos de trabajo cuya seguridad dependa de sus condiciones de instalación se sometan a una comprobación inicial, tras su instalación y antes de la puesta en marcha por primera vez, y a una nueva comprobación después de cada montaje en un nuevo lugar o emplazamiento, con objeto de asegurar la correcta instalación y el buen funcionamiento de los equipos.*

*2. El empresario adoptará las medidas necesarias para que aquellos equipos de trabajo sometidos a influencias susceptibles de ocasionar deterioros que puedan generar situaciones peligrosas estén sujetos a comprobaciones y, en su caso, pruebas de carácter periódico, con objeto de asegurar el cumplimiento de las disposiciones de seguridad y de salud y de remediar a tiempo dichos deterioros.*

*Igualmente, se deberán realizar comprobaciones adicionales de tales equipos cada vez que se produzcan acontecimientos excepcionales, tales como transformaciones, accidentes, fenómenos naturales o falta prolongada de uso, que puedan tener consecuencias perjudiciales para la seguridad.*

*3. Las comprobaciones serán efectuadas por personal competente.*

*4. Los resultados de las comprobaciones deberán documentarse y estar a disposición de la autoridad laboral. Dichos resultados deberán conservarse durante toda la vida útil de los equipos.*

*Cuando los equipos de trabajo se empleen fuera de la empresa, deberán ir acompañados de una prueba material de la realización de la última comprobación.*

*5. Los requisitos y condiciones de las comprobaciones de los equipos de trabajo se ajustarán a lo dispuesto en la normativa específica que les sea de aplicación.*

## 12.2. Condiciones técnicas

Este apartado se enfocará en detallar las especificaciones técnicas específicas que se han requerido para realizar el desarrollo del trabajo de manera adecuada.

La realización del proyecto se ha llevado a cabo en un entorno adecuado, utilizando herramientas principales como software especializado y un equipo capaz de trabajar con este software.

**Hardware** El equipo utilizado para completar las tareas del proyecto debe ser lo suficientemente potente para soportar una alta demanda de recursos durante períodos prolongados, tanto para la parte de diseño de la pieza como para la realización de los análisis de elementos finitos. En este caso, se ha utilizado un portátil con un buen procesador, aunque se recomienda el uso de un equipo de sobremesa. Las especificaciones del equipo utilizado son:



- Sistema operativo: Windows 10.
- CPU: Intel(R) Core(TM) i7-10750H CPU @ 2.60GHz.
- Disco duro: 1 Terabyte.
- Memoria RAM: 16 Gigabytes.
- Tarjeta gráfica: NVIDIA GeForce GTX 1650 with Max-Q Design.

**Software** Para la elaboración del TFG se han utilizado varios programas, algunos de acceso libre y gratuito, en este caso Overleaf, para escribir el documento, y otros con licencias proporcionadas por la Universidad Politécnica de Valencia, en este caso Autodesk Fusion 360.

**Entorno** El entorno de trabajo cuenta con un escritorio amplio que permite trabajar cómodamente, una fuente de luz natural que favorece la visión sobre el área de trabajo, y un adecuado aislamiento térmico y acústico que proporciona un ambiente óptimo para el desarrollo de las tareas.

**Maquinaria: M600, proyecto Atila** Las condiciones técnicas de la M600 Atila, la máquina utilizada para la fabricación de la pieza pueden verse adjuntas en el Anexo C, obtenido de la web de Meltio, proveedor de la máquina. [13]

### 12.3. Condiciones facultativas

En el desarrollo de este trabajo intervienen dos agentes principales:

- Empresa contratante o cliente: Financia y compra la ejecución del proyecto. Sería la que compraría la pieza para usarla en un proyecto cualquiera.
- Empresa contratista o proyectista: Es la autora y encargada de llevar a cabo el proyecto, poseyendo conocimiento completo del mismo y de las circunstancias que afectan su desarrollo. En este caso serían tanto el autor del TFG como AIDIMME, que se han encargado de llevar a cabo el diseño y la fabricación.

Ambas partes tienen obligaciones y derechos específicos. La empresa contratista debe adherirse a los requerimientos acordados, mantener la confidencialidad de la información del cliente, informar sobre los avances al cliente y tiene derecho a recibir la información necesaria para el proyecto. Por su parte, la empresa contratante debe cumplir con las condiciones acordadas, no interferir en el desarrollo del proyecto que realiza la empresa contratista, tiene derecho a ser informada sobre el estado del objeto y puede decidir sobre ciertos aspectos del desarrollo, respetando los plazos establecidos.

El incumplimiento de estas obligaciones por cualquiera de las partes puede llevar a la rescisión del contrato.

En cuanto a los plazos de ejecución, se debe establecer una fecha de inicio y un plazo límite de finalización mediante un acuerdo firmado. Además, la empresa contratista debe entregar al cliente un informe de planificación de la ejecución del proyecto.

## 12.4. Condiciones económicas

En este apartado se establecen las normas financieras entre el contratante y el contratista en el caso de que cualquier empresa desee comprar el proyecto o la pieza para su uso.

Para empezar, el contratante deberá depositar una fianza del 15% del presupuesto total al firmar el contrato. Esta cantidad se descontará del pago final al completarse los objetivos del proyecto. En este caso no sería necesario un calendario de pagos por hitos al llegar a fases específicas, ya que el contratante solamente recibirá la pieza final.

Las mejoras o modificaciones solicitadas por el contratante después de firmar el contrato serán a su cargo, mientras que los cambios propuestos por el contratista tras la firma no alterarán el presupuesto. Por otra parte, cualquier costo no incluido en el presupuesto inicial que surja durante el proyecto requerirá la aprobación del contratante.

El contratante tendrá 60 días para pagar el costo total del proyecto, incluyendo el presupuesto inicial y cualquier gasto adicional acordado. Ambas partes acordarán previamente el método de pago. En caso de retraso en los pagos acordados, se aplicará un interés de demora del 2% mensual sobre la cantidad adeudada.

## 13. Conclusión

Este Trabajo Fin de Grado ha abordado la optimización de una pieza aeronáutica mediante la tecnología de fabricación aditiva Directed Energy Deposition (DED), comparándola con una optimización previa realizada mediante Selective Laser Melting (SLM) y con la pieza original creada con fabricación tradicional. A lo largo de este estudio, se han explorado las capacidades y limitaciones de ambas tecnologías, así como su aplicabilidad en la industria aeronáutica.

La optimización del diseño, realizada mediante herramientas de diseño generativo en Autodesk Fusion y la posterior adaptación para su fabricación, ha demostrado mejoras sustanciales en comparación con la pieza original de aluminio fabricada de manera tradicional. La transición de aluminio a titanio, junto con las capacidades de la fabricación aditiva, ha permitido la obtención de una pieza que, manteniendo las características de resistencia necesarias, tiene un peso y un volumen mucho menor que la original a pesar del aumento de densidad debido al cambio de material, obteniendo para la fabricación DED una disminución de masa del 28 %.

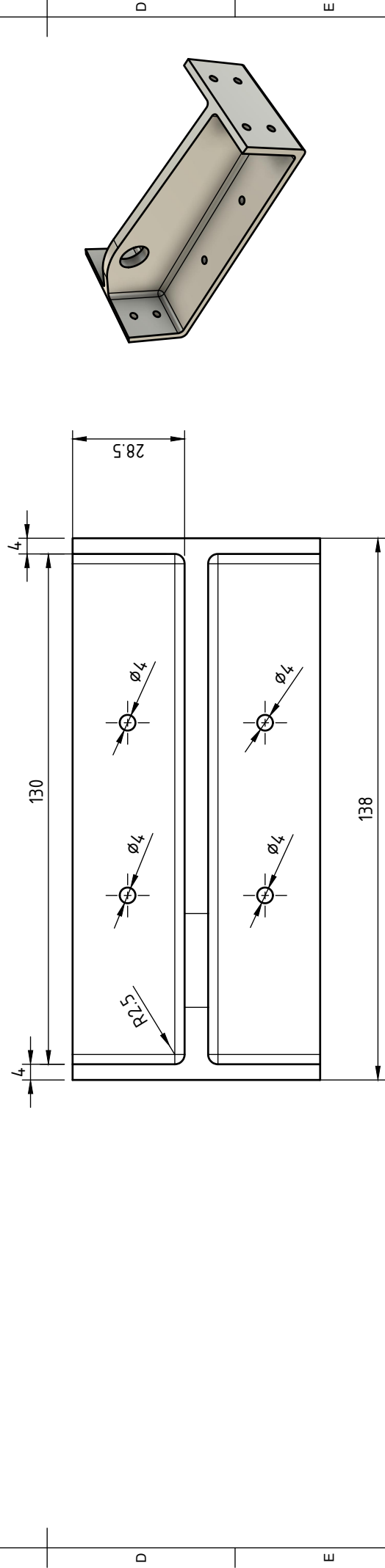
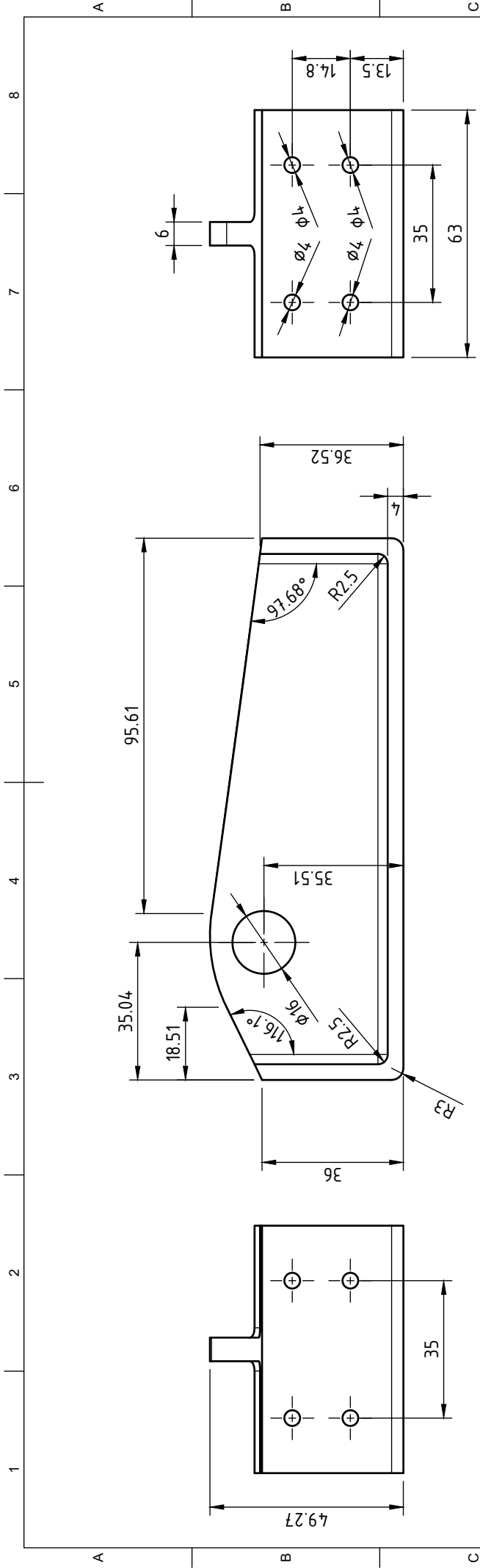
Desde una perspectiva económica, el análisis de costes reveló que para un caso similar a este, en el que no se necesita fabricar la pieza en serie y es útil la disminución de peso, las tecnologías de fabricación aditiva pueden dar unos resultados mucho más económicos, sobre todo la tecnología DED. Estos datos son fundamentales para evaluar la viabilidad a largo plazo de la implementación de estas tecnologías en la industria.

El impacto potencial de esta optimización en la industria aeronáutica es significativo. La posibilidad de utilizar titanio, acero inoxidable u otros materiales, combinada con las capacidades de diseño y fabricación avanzadas, sugiere que será posible una gran disminución de peso en diferentes aeronaves si se realizan optimizaciones como la propuesta en este caso para un gran número de piezas.

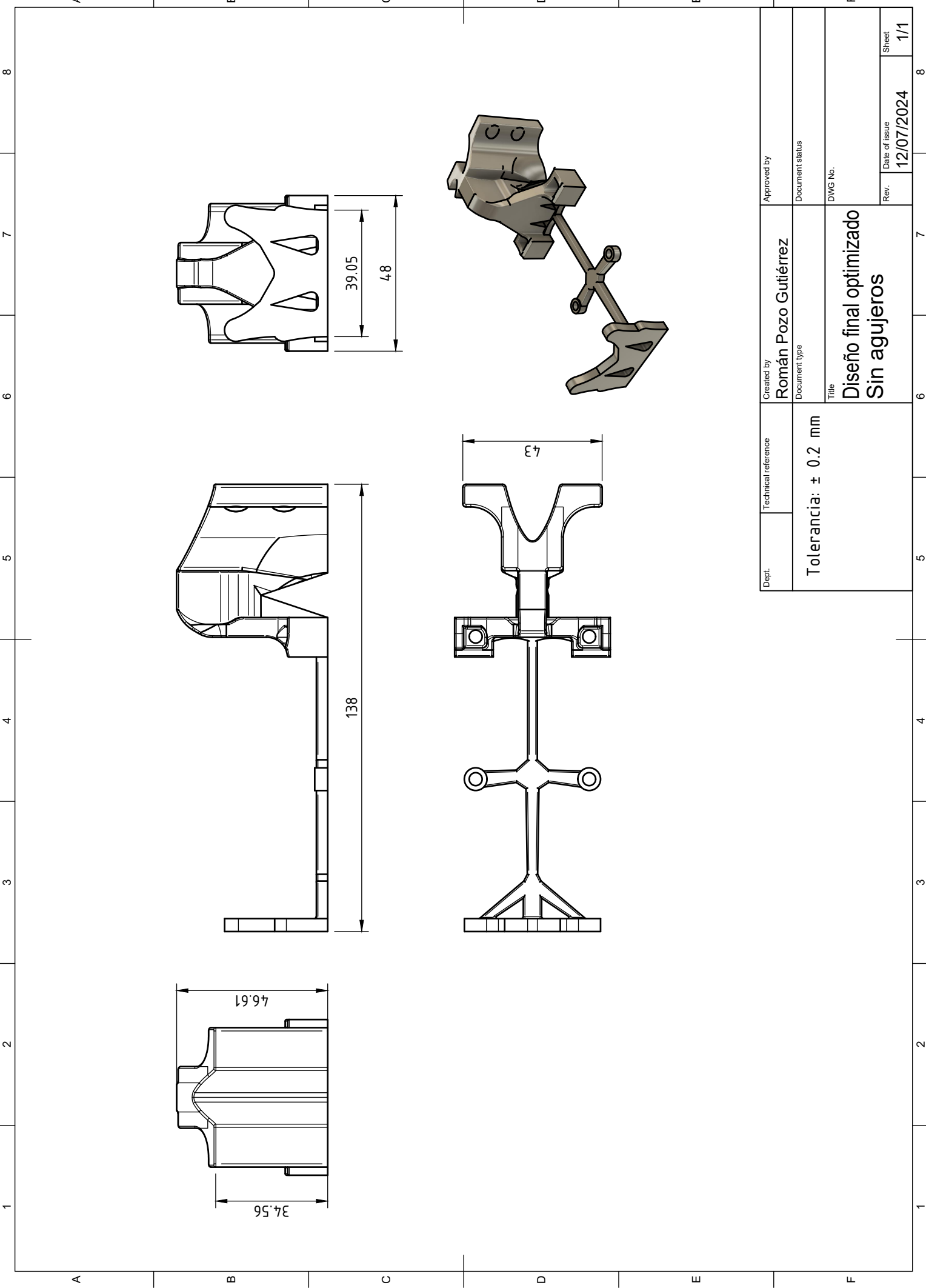
Es importante reconocer las limitaciones de este estudio, como la necesidad de acabados superficiales tras el proceso de fabricación en un gran número de casos o la baja rentabilidad de crear un método que posibilite la fabricación en serie usando estas tecnologías. Estas limitaciones abren la puerta a futuras líneas de investigación que podrían resolver estos dilemas.

En conclusión, este TFG ha demostrado el potencial de la fabricación aditiva DED para la optimización de piezas aeronáuticas, ofreciendo una alternativa viable a otras tecnologías de fabricación aditiva como SLM. Los resultados obtenidos sugieren que esta tecnología es perfectamente válida o incluso mejor que otras dependiendo de la pieza que se necesite, lo que podría tener un impacto significativo en la industria aeronáutica. Este trabajo no solo contribuye al avance tecnológico en el sector, sino que también se alinea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, como se detalla en el capítulo 12, subrayando la importancia de la innovación sostenible en la ingeniería aeronáutica moderna.

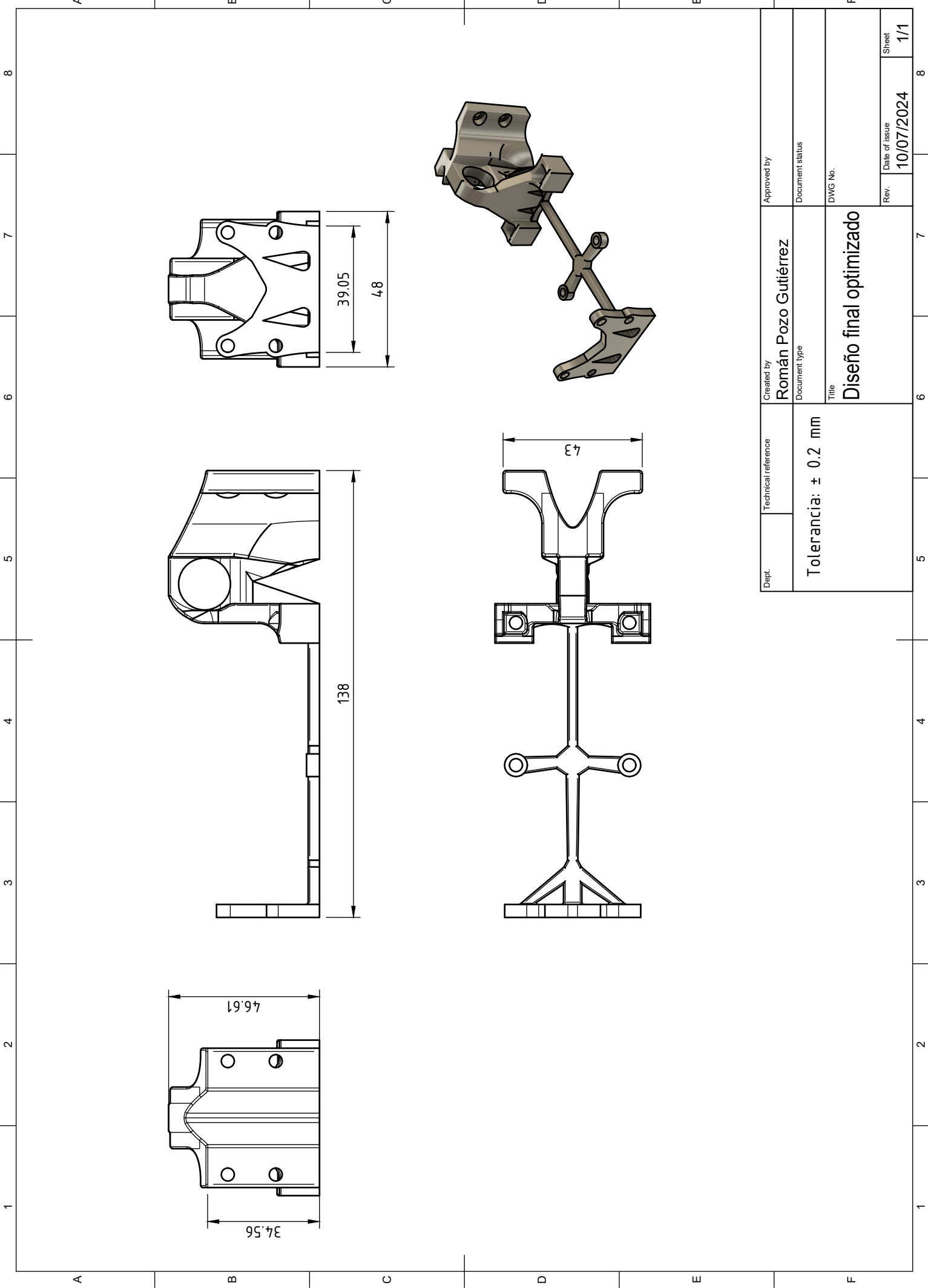
## 14. Planos



|       |                      |                      |                 |
|-------|----------------------|----------------------|-----------------|
| Dept. | Technical reference  | Created by           | Approved by     |
|       | Tolerancia: ± 0.2 mm | Román Pozo Gutiérrez | 25/05/2024      |
|       |                      | Document type        | Document status |
|       |                      |                      |                 |
|       |                      | Title                | DWG No.         |
|       |                      | Pieza original       |                 |
|       |                      | Rev.                 | Date of issue   |
|       |                      |                      | 001             |
|       |                      | Sheet                | 1/1             |



|                      |                     |   |                 |
|----------------------|---------------------|---|-----------------|
| Dept.                | Technical reference | Created by                              | Approved by     |
|                      |                     | Román Pozo Gutiérrez                    |                 |
| Tolerancia: ± 0.2 mm |                     | Document type                           | Document status |
|                      |                     |   |                 |
|                      |                     | Title                                   | DWG No.         |
|                      |                     | Diseño final optimizado<br>Sin agujeros |                 |
| Rev.                 | Date of issue       | Rev.                                    | Date of issue   |
|                      |                     |   |                 |
|                      |                     | Sheet                                   | 1/1             |



## Referencias

- [1] AIDIMME (2024). Atila. estudio y desarrollo de un proceso de fabricación aditiva de alta protección basado en la tecnología de deposición de energía directa (ded\_lb) para obtener implantes con tifa4v\_eli. <https://actualidad.aidimme.es/2024/03/01/atila/>. Fecha de publicación no disponible, Accedido el: 10-06-2024.
- [2] AIDIMME ( ). Aidimme / quienes somos. <https://www.aidimme.es/@quienessomos>. Fecha de publicación no disponible, Accedido el: 10-06-2024.
- [3] Aitzol Lamikiz Mentxaka, Ana María Camacho López, S. F. B. M. B. P. (2023). *Fabricación aditiva*. UNED, Madrid.
- [4] Boizas, G. M. (2018). *Introducción a la Fabricación Aditiva (cómo y porque de la impresión 3d)*.
- [5] Casino, S. M. (2019). Planificación y desarrollo del proceso de fabricación y ensamblaje de aeronaves integrado en plataformas plm. *UPV*.
- [6] Culture, S. (2022). Factor de seguridad: Coeficiente de seguridad en el diseño y el uso. <https://safetyculture.com/es/temas/factor-de-seguridad/>. Accedido el: 7-06-2024.
- [7] Delteco (2022). ¿por qué la industria aeroespacial es la primera en adoptar la fabricación aditiva de metal? <https://delteco.com/fabricacion-aditiva/industria-aeroespacial/>. Accedido el: 3-06-2024.
- [8] Eliaz, N. (2022). Laser-based directed energy deposition (ded-lb) of advanced materials. *ELSEVIER*.
- [9] Formlabs (2020). Introducción al diseño generativo. <https://formlabs.com/es/blog/disenho-generativo/>. Accedido el: 5-07-2024.
- [10] López, O. (2022). Manufactura aditiva: ¿cuándo se originó? <https://www.mms-mexico.com/columnas/manufactura-aditiva-cuando-se-origino>. Accedido el: 5-07-2024.
- [11] Marchante, A. (2020). El boeing 777x, con más de 300 piezas impresas en 3d, efectúa su primer vuelo. <https://www.3dnatives.com/es/boeing-777x-con-piezas-en-3d-efectua-su-primer-vuelo-120220202/>. Accedido el: 4-06-2024.
- [12] Meltio (2024a). Blue lasers for laser wire deposition. <https://meltio3d.com/blue-lasers-for-laser-wire-deposition/>. Accedido el: 10-06-2024.
- [13] Meltio (2024b). Meltio m600 - industrial metal - 3d printer. <https://meltio3d.com/metal-3d-printers/meltio-m600/>. Accedido el: 10-06-2024.
- [14] Metal3DP (2023). Fabricación aditiva slm. <https://met3dp.es/slm-additive-manufacturing/>. Accedido el: 5-06-2024.



- [15] Morales, H. (2022). ¿cómo se adapta la manufactura aditiva en la industria aeroespacial en 2022? <https://intelligy.com/blog/2022/06/23/como-se-adapta-la-manufactura-aditiva-en-la-industria-aeroespacial-en-2022/>. Accedido el: 2-06-2024.
- [16] Principia (2015). ¿qué es el diseño funcional generativo? <https://www.weerg.com/es/>. Accedido el: 8-07-2024.
- [17] Principia (2017). ¿qué es el diseño funcional generativo? <https://principia.es/disenio-funcional-generativo/>. Accedido el: 5-07-2024.
- [18] Protolabs (2015). Protolabs. manufacturing accelerated. <https://www.protolabs.com/es-es/>. Accedido el: 8-07-2024.
- [19] Vacodir (2020). Diferencias de los formatos de impresión 3d. stl vs obj vs ply. <https://www.vacodir.com.uy/diferencias-de-los-formatos-de-impresion-3d-stl-vs-obj-vs-ply/>. Accedido el: 5-07-2024.
- [20] Xometry (2015). Xometry. where big ideas are built. <https://xometry.eu/es/>. Accedido el: 8-07-2024.
- [21] Ángel Marín Requena (2019). Análisis del proceso del diseño para fabricación aditiva aplicado a componentes aeroespaciales. *UPV*.
- [22] Ángela Andrea Castro (2021). Manufactura aditiva de metal demuestra sus capacidades en la reparación de turbinas. <https://www.mms-mexico.com/noticias/post/manufactura-aditiva-de-metal-demuestra-sus-capacidades-en-la-reparacion-de-turbinas>. Accedido el: 3-06-2024.

## A. Anexo 1: Artículo de obtención de la pieza original y optimización SLM



XV Portuguese Conference on Fracture, PCF 2016, 10-12 February 2016, Paço de Arcos, Portugal

## Selective laser melting (SLM) and topology optimization for lighter aerospace components

Miguel Seabra<sup>a, \*</sup>, José Azevedo<sup>b</sup>, Aurélio Araújo<sup>a</sup>, Luís Reis<sup>a</sup>, Elodie Pinto<sup>c</sup>,  
Nuno Alves<sup>c</sup>, Rui Santos<sup>d</sup> and João Pedro Mortágua<sup>b</sup>

*a* IDMEC - Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Portugal

*b* Centro para a Excelência e Inovação na Indústria Automóvel (CEIIA)

*c* Centre for Rapid and Sustainable Product Development, Polytechnic Institute of Leiria, Portugal

*d* IN+ Center for Innovation, Technology and Policy Research; Instituto Superior Técnico (IST)

### Abstract

Additive Manufacturing (AM) is a manufacturing process through which a 3D component is produced by consecutively adding material. One of the most promising AM processes is SLM. In SLM a laser completely melts metallic powder particles together forming a 3D component. SLM is known for its freedom of manufacturing constraints allowing complex geometries and high material efficiency. Topology Optimisation (TO) is an optimisation type that calculates the optimal material distribution for a given problem. The combination of SLM with TO is being developed to create lightweight components. In this work, the whole development process, from optimisation to design, production and testing is addressed. Initially, an aircraft bracket topology was optimised to be produced by means of SLM. The TO solution was interpreted and designed for AM. During the interpretation and design process, a design methodology was defined in order to facilitate and make more accurate the TO solution design and make it ready for AM. After the optimised component was produced, metrological and mechanical tests were performed in order to validate the final design and the computer analysis. The optimised component showed considerable weight reduction with an increase of the factor of safety. The experimental tests revealed a good relation to the computer analysis evidencing, however, room for improvement, both in the computer model and the experimental tests.

Copyright © 2015 The Authors. Published by Elsevier B.V. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

Peer-review under responsibility of the Scientific Committee of PCF 2016.

**Keywords:** Additive Manufacturing (AM); Selective Laser Melting (SLM); Topology Optimisation; Design for AM; Experimental testing.

\* Corresponding author. Tel.: +351 914 622 150

E-mail address: [\\*lmiguelseabra@gmail.com](mailto:lmiguelseabra@gmail.com)

## 1. Introduction

Additive Manufacturing (AM) [Gibson et al. (2010)] is a process of manufacture through which an object is built by material addition in layers. Inside AM's metal methods, SLM is one of the most promising ones. SLM is the process through which a laser selectively melts particles of metal powder together, in layers, until a 3D object is created, being possible to produce complex geometries and relative densities close to 100% [Aliakbari (2012)]. However, SLM also has specific issues which need to be well understood in order to use its full potential [Kruth et al. (2010), Vandenbroucke et al. (2007), Song et al. (2014)].

TO [Bensoe et al. (2003)] is a structural optimisation method that calculates the optimal material distribution inside a design domain for a given problem. Conventional manufacturing processes often struggle or even fail to accomplish the designs that result from the use of TO, due to its complex geometries and shapes [Zhou et al. (2002)]. On the other hand, SLM, for its freedom of geometries and lack of manufacture constraints, is a particularly suited manufacturing process for the TO design. There have been several authors combining the use of TO with SLM with the objective of making the most of both technologies [Muir (2013), Emmelmann et al. (2011), Tomlin et al. 2011)].

## 2. Methodology

The methodology followed in this work is illustrated on Figure 1. An initial aircraft component with three static load cases was given. Figure 2 illustrates the original component.

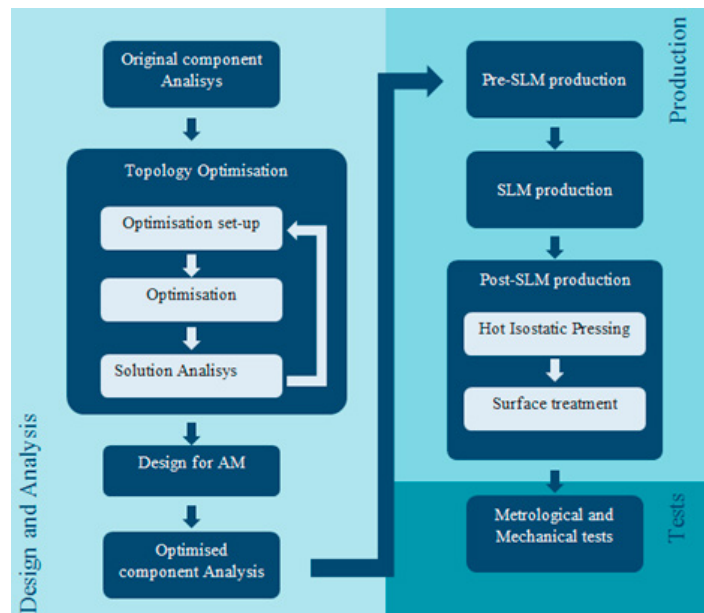


Fig. 1 – Methodology scheme.

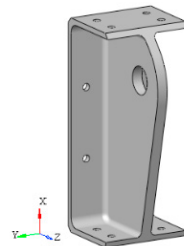


Fig. 2 – Original component.

The component is assembled on its surrounding structures by 12 rivet holes with a 4.1 mm diameter and the load is applied in the larger hole, called the load bearing lug, with a 16 mm diameter. Table 1 shows the loads of each load case.

Table 1. Load Cases.

| Load Case | Load (kN) |       |       |
|-----------|-----------|-------|-------|
|           | $F_x$     | $F_y$ | $F_z$ |
| 1         | 5         | 0     | -3    |
| 2         | 6         | 0     | 0     |
| 3         | 3         | 3     | -2    |

The component was originally made of the aluminum alloy 7050-T7451. The goal is to reduce weight while maintaining the stress levels observed in the original component using the titanium alloy Ti6Al4V. This alloy is often used in aerospace components [Boyer (1996)]. There are several works on the mechanical properties of Ti6Al4V produced through the SLM method [Vandenbroucke et al. (2007), Hernández (2014), Qiu et al. (2013)].

The TO is an iterative process. The base optimisation set-up is defined and then the variables are adjusted until the solution fits the established goals in a preliminary analysis, such as required weight reduction or stress levels.

After the optimisation, a strategy for the solution interpretation and modelling is defined. The validation of this strategy is done by comparison of the TO solution with the optimised component design.

The optimised component final design is analysed using Finite Element Method (FEM) in order to validate stress levels and check for stress concentration regions or some need of material reinforcement.

In the Pre-Production phase the DfAM guide is created. The limitations of the SLM process are addressed in order to point out any eventual design issues with the optimised component design.

In the production phase, the optimised component is produced.

After printing, the optimised component goes through a Hot Isostatic Pressing (HIP) treatment to eliminate any pores in the material and release residual stresses.

For the metrological test, the final component is scanned and the produced component is compared to the original design. For the mechanical tests, there are two main strategies which need to be well defined. The first is how to replicate accurately the load cases. The second is the definition of the data that will be gathered from the tests to compare with the Finite Element (FE) model and how is this data going to be gathered.

### 3 Results and discussion

#### 3.1 Topology Optimisation

In this work there were several inputs for the TO that had to be defined in order to achieve the optimal solution. The optimisation inputs were:

- Design Domain
- Mesh
- Control Parameters
- Objective
- Constraints

The design domain influences the range of topologies available for the optimisation solution. A larger design domain allows more material distributions. The larger the design domain, the more finite elements are used in the optimisation increasing significantly computing time. The used approach was to start from the original fitting domain and tune the optimisation mesh and control parameters, this way less computing time was needed for these parameters convergence study. After the previous parameters were established, a new initial design domain was defined in order to allow more topologies than the initial one.

The mesh has great influence in the final solution. Highly refined meshes give very different topologies from less refined meshes. In the final design domain, a more controlled method for meshing was used in order to ensure its high quality.

The control parameters also have great influence not only in the solution convergence degree, but also in the computing time, thus a convergence study on these parameters was run. In this optimisation there were two control parameters which were studied, the Relative Convergence Criterion (RCC) and the Discreteness Parameter (DP) which is the equivalent for penalty factor in TO theory.

The objective function was the weighted compliance in order to consider the three load cases in the topology optimisation [HyperWorks Guide]. This response is given by Equation 1

$$C_w = \sum w_i C_i \tag{1}$$

where  $w_i$  is the weight and  $C_i$  is the compliance of load case  $i$  which is given by Equation 2

$$C_i = \frac{1}{2} u_i^T f_i \tag{2}$$

where  $u_i$  and  $f_i$  are the displacement and force vectors, respectively, corresponding to load case  $i$ .

The objective was the minimization of the weighted compliance and each load case was given the same weight.

There were two constraints defined in the optimisation. The first one was regarding the volume fraction of the design domain. The second was a symmetry constraint, forcing the optimised solution to be symmetric with respect to the component’s mid vertical plane as the original component is. Figure 3 and Figure 4 illustrate the TO boundary conditions and final solution pseudo-density distribution.

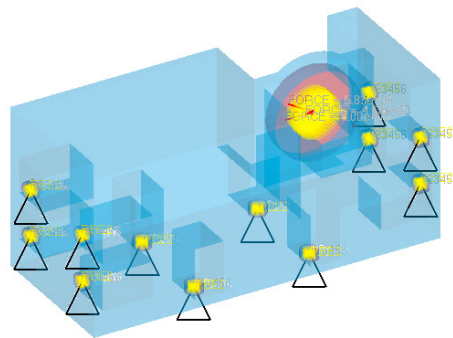


Fig. 3 – Final Design Domain (blue) and boundary conditions.

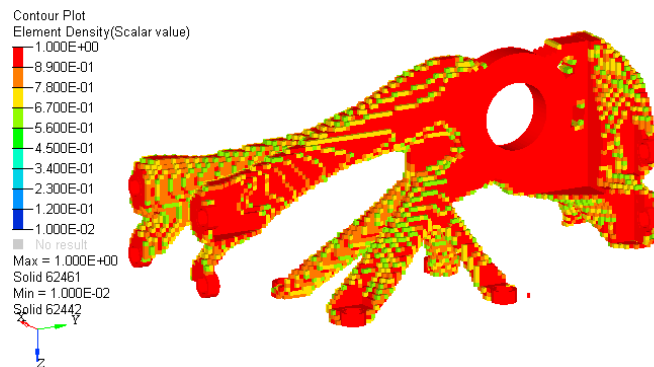


Fig. 4 – TO solution with element pseudo-density distribution.

### 3.2 Design and Analysis

A methodology was defined to address the conversion from the topology optimization solution to the optimized component final design. In order to achieve the organic shape of the topology optimization (TO) solution, a freeform surface modelling was used option for the optimized component design.

The design strategy followed two steps. The first step was the design of the non-design regions. The second step was the design of the remaining component by connecting the non-design regions respecting the TO solution. Figures 5, 6, and 7 illustrate the FEM analysis meshes and the stress distribution for each component.

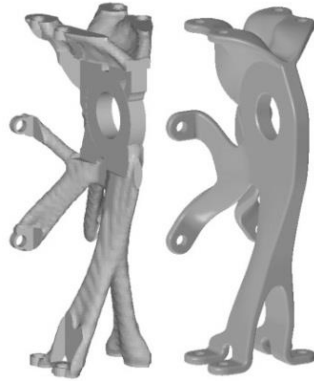


Fig. 5 – TO solution (left) and optimized component final design (right).

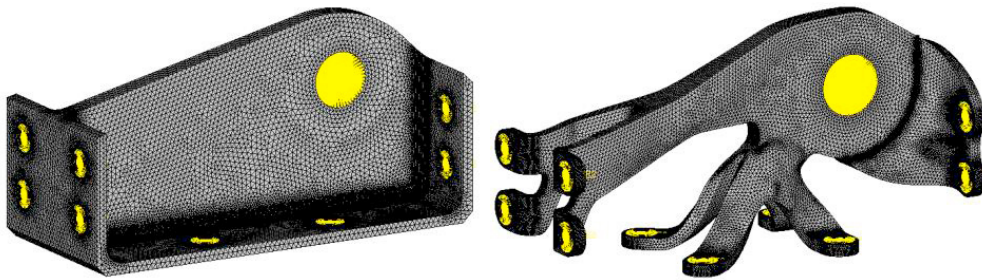


Fig. 6 – Mesh of the original component (left) and the optimized component (right).

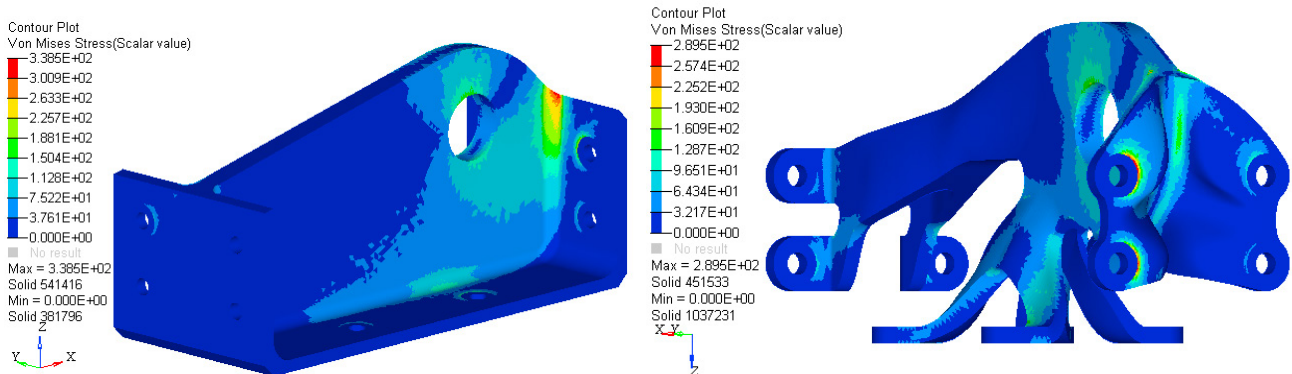


Fig. 7 – Stress distribution of the original component (left) and the optimized component (right) for Load Case 3.

### 3.3 Design for Additive Manufacturing and Production

Even though AM opens up a new range of design possibilities, it also has its own limitations that must be taken in consideration during a component design. Inside AM, SLM has its specific limitations because of its high temperature gradients. In this section, four manufacturing issues were defined:

- Process accuracy [Vandenbroucke et al. (2007), Wang et al. (2013)]
- Supports [Vandenbroucke et al. (2007), Hussein et al. (2013), Jhabvala et al. (2012), Wang et al. (2013)]
- Surface Roughness [Vandenbroucke et al. (2007)]
- Geometrical feasibility and possibilities [Ponche et al. (2012), Vayre et al. (2012)]

The machine SLM® 125 HL from SLM Solutions GmbH was used to produce the final component. Figure 8 illustrates the manufactured component.



Fig. 8 – Optimised component manufactured.

### 3.4 Tests

The metrological test was done using 3D scanning, see Figure 9. The machine used was the Comet L3D from Steinbichler. The scanned image, saved in STL format, was then compared with the original STL used for the component's production. The deviation goes up to 0.8 mm in some areas of the component. This deviation is related with the SLM process itself. The high temperature gradients present during the manufacturing of the component leave residual stresses in the material which, in worst cases, can even rip some supports away from the platform.

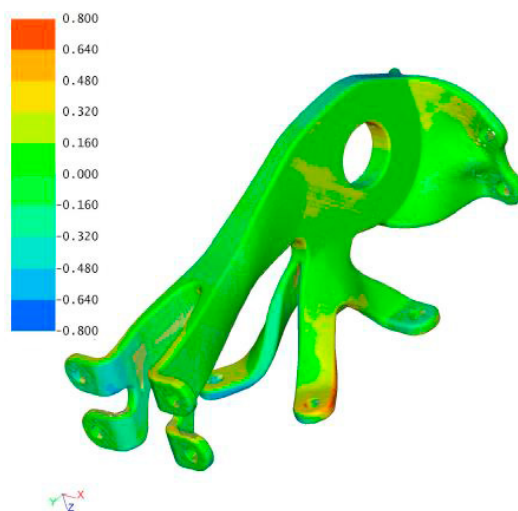


Fig. 9 – Metrological test result. Deviations in mm.



The mechanical tests were done with an Instron 3669 machine. In order to replicate the load cases in the machine, an interface set-up was designed and manufactured. Figure 10 illustrates the tests set-up for Load Case 2. Table 2 shows the comparison between the results obtained with FEM and experimental tests.

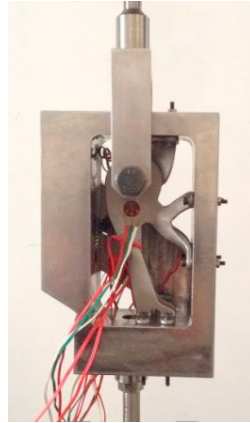


Fig. 10 – Mechanical tests set-up for Loading Case 2.

Table 2 – Mechanical tests results for Load Case 2. The design load was applied. The strain values are in  $\mu\text{m}/\text{m}$ .

| Sensor                                | R1<br>$\epsilon_{\text{Max}}$ | R1<br>$\epsilon_{\text{Min}}$ | G3   | G4  | G5  | R6<br>$\epsilon_{\text{Max}}$ | R6<br>$\epsilon_{\text{Min}}$ |
|---------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|------|-----|-----|-------------------------------|-------------------------------|
| <b>Strain - FEM<br/>(Design Load)</b> | 271                           | -292                          | 94   | 170 | 402 | 254                           | -85                           |
| <b>Strain - Mech.<br/>tests</b>       | 297                           | -139                          | -99  | 245 | 475 | 239                           | -128                          |
| <b><math>\Delta</math> (%)</b>        | 10                            | -53                           | -205 | 45  | 18  | -6                            | 50                            |

#### 4. Conclusions

The TO was successfully implemented and proved to be an effective way of taking advantage of the manufacturing freedom provided by SLM. It was possible to decrease the material volume of the original component by 54%, resulting on a 28% weight reduction motivated by the change in material from aluminum to a titanium alloy. Also because of the change of material, the factor of safety increased by two times the original value.

A fair reproduction of the problem's Loading Cases was made. In LC2 there were good approximations of the maximum principal strain in four different points of the component suggesting a good relation between the FE model and the produced component. Loading Cases 1 and 3 were more influenced from the simplifications of the FE model, namely the isotropy and the boundary conditions.

#### References

- Ahmed Hussein, Liang Hao, Chunze Yan, Richard Everson, Philippe Young. Advanced lattice support structures for metal additive manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology*, 213(7):1019-1026, 2013.
- Altair Engineering. *HyperWorks Desktop User's Guide*.
- Ben Vandenbroucke and Jean-Pierre Kruth. Selective laser melting of biocompatible metals for rapid manufacturing of medical parts. *Rapid Prototyping Journal*, 13(4):196-203, 2007.

- B. Vayre, F. Vignat, F. Villeneuve. Designing for Additive Manufacturing. *Procedia CIRP* 3:632-637, 2012.
- Bo Song, Shujuan Dong, Sihao Deng, Hanlin Liao, and Christian Coddet. Microstructure and tensile properties of iron parts fabricated by selective laser melting. *Optics & Laser Technology*, 56:451-460, 2014.
- Claus Emmelmann, Maren Petersen, Jannis Kranz, and Eric Wycisk. Bionic lightweight design by laser additive manufacturing (lam) for aircraft industry. In *SPIE 8065, SPIE Eco-Photonics, 80650L*. International Society for Optics and Photonics, 2011.
- Chunlei Qiu, Nicholas J. E. Adkins, Moataz M. Attallah. Microstructure and tensile properties of selectively laser-melted and of HIPed laser-melted Ti-6Al-4V. *Materials Science and Engineering: A*, 578:230-239, 2013.
- Daniel García Hernández. Mechanical behaviour assessment of the Ti6Al4V alloy obtained by additive manufacturing towards aeronautical industry, 2014.
- Di Wang, Yongqiang Yang, Manhui Zhang, Jianbin Lu, Ruicheng Liu, Dongming Xiao. Study on SLM fabrication of Precision Metal Parts with Overhanging Structures. *IEEE International Symposium on Assembly and Manufacturing*, 222-225, 2013.
- Di Wang, Yongqiang Yang, Ziheng Yi, Xubin Su. Research on the fabricating quality optimization of the overhanging surface in SLM process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 65(9-12):1471-1484, 2013.
- Ian Gibson, David W. Rosen, Brent Stucker. *Additive manufacturing technologies*. Springer, 2010.
- J. Jhabvala, E. Boillat, R. Glardon. An innovative method to build support structures with a pulsed laser in the selective laser melting process. *The Int. Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 59(1-4):137-142, 2012.
- J. P. Kruth, M. Badrossamay, E. Yasa, J. Deckers, L. Thijs and J. Van Humbeeck. Part and material properties in selective laser melting of metals. In *Proceedings of the 16th International Symposium on Electromachining*, 2010.
- Martin P. Bendsoe and Ole Sigmund. *Topology optimization: theory, methods and applications*. Springer, 2003.
- Martin Muir. Multidisciplinary optimisation of a business jet main exit door hinge for production by additive manufacturing. In *The 8th UK Altair Technology Conference*, 2013.
- Matthew Tomlin and Jonathan Meyer. Topology optimization of an additive layer manufactured (alm) aerospace part. In *The 7th Altair CAE Technology Conference*, Gaydon, UK, 10th May, 2011.
- Mina Aliakbari. *Additive Manufacturing: State-Art, Capabilities, and Applications with Cost Analysis*, 2012.
- Ming Zhou, Raphael Fleury, Yaw-Kang Shyy, Harold Thomas, and JM Brennan. Progress in topology optimization with manufacturing constraints. In *Proceed. of the 9th AIAA MDO conference AIAA-2002-4901*, 2002.
- R. Ponche J. Y. Hascoet, O. Kerbrat, P. Mognol. A new global approach to design for additive manufacturing. *Virtual and Physical Prototyping*, 7(2), 2012.
- R. R. Boyer. An overview on the use of titanium in the aerospace industry. *Materials Science and Engineering: A*. volume 213, issues 1-2, 15 August 1996, Pages 103-114.

## **B. Anexo 2: Especificaciones del material utilizado: Mel- tio Titanium 64**

# Meltio Titanium 64

Ti-6Al-4V / ER Ti-5 / S Ti 6402c / 3.7165

Ti64 is a popular and widely used alloy due to its excellent combination of strength, low density, and corrosion resistance. It is used in a variety of industries, including aerospace, and chemical processing, due to its properties. Its high strength-to-weight ratio makes it a preferred choice for lightweight applications.

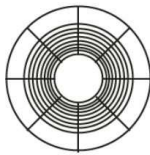
|                     |   |
|---------------------|---|
| <b>Properties</b>   | High Strength, Low Weight and Corrosion Resistance    |
| <b>Applications</b> | Aerospace, Marine, Chemical industries and Automotive |

|                                  |      |     |     |     |      |      |       |     |
|----------------------------------|------|-----|-----|-----|------|------|-------|-----|
| <b>Wire Chemical Composition</b> | Ti   | Al  | V   | Fe  | C    | N    | H     | O   |
| <b>Weight Percent [%]</b>        | Bal. | 5.5 | 3.5 | 0.4 | 0.08 | 0.05 | 0.015 | 0.2 |

|                       |
|-----------------------|
| <b>Wire Density</b>   |
| 4.4 g/cm <sup>3</sup> |

|                      |         |         |
|----------------------|---------|---------|
| <b>Melting Point</b> |         |         |
| 1947 K               | 1674 °C | 3045 °F |

## Spool Specs



Meltio Materials are tightly spooled and packaged to ensure the best compatibility with Meltio systems.

|                        |                      |
|------------------------|----------------------|
| <b>Wire Diameter</b>   | 1.0 mm               |
| <b>Weight on Spool</b> | 7.5 kg               |
| <b>Volume on Spool</b> | 1704 cm <sup>3</sup> |
| <b>Spool Type</b>      | BS300                |
| <b>Wire Coating</b>    | Uncoated             |

## Heat Treatment

Heat treatment is recommended for Ti64 to enhance its mechanical properties. Through heat treatment, the alloy becomes stronger, more ductile, and more resistant to fatigue, making it suitable for high-stress applications. Heat treatment also eliminates residual stresses and helps to refine the microstructure of the alloy, leading to improved toughness and increased resistance to crack growth. Heat treatment of Ti64 after 3D printing is a crucial step in maximizing its performance in applications.

## Age Hardening

|  |   |
|--|---|
| Vacuum atmosphere<br>Heat up to 920°C<br>Hold at 920°C during 2h | Cool to 400°C during 10h<br>Cold down to RT |
|--|---|

## Age Hardening

|  |                                |
|--|--------------------------------|
| Vacuum atmosphere<br>Heat up to 920°C<br>103 MPa of pressure | Hold for 2h<br>Cold down to RT |
|--|--------------------------------|

*\*Typical Parameters for a Sample of 160x60x30 mm*

## Deposition Parameters

The following 3D printing parameters were found to provide fully dense samples. Please use the provided “Density Profiles” and refer to the document “Printing Parameters and their effect on part density” for additional information.

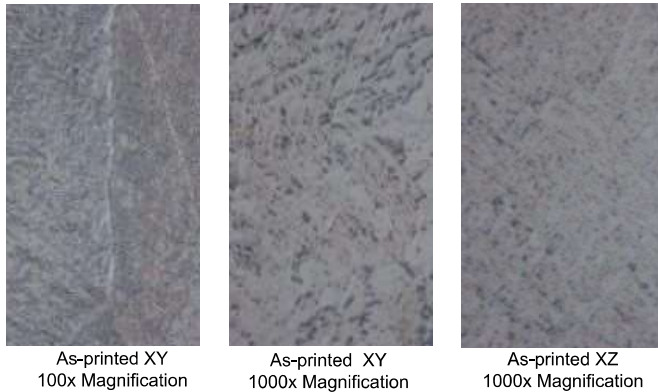
|                        |                        |                           |                          |                          |  |
|------------------------|------------------------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|--|
| <b>Laser Power [W]</b> | <b>Velocity [mm/s]</b> | <b>Argon Flow [l/min]</b> | <b>Layer Height [mm]</b> | <b>Wire Speed [mm/s]</b> | <b>Energy Density [J/mm<sup>3</sup>]</b> |
| 1100                   | 7.5                    | 20                        | 1.0                      | 9.6                      | 147                                      |

# Meltio Titanium 64

Ti-6Al-4V / ER Ti-5 / S Ti 6402c / 3.7165

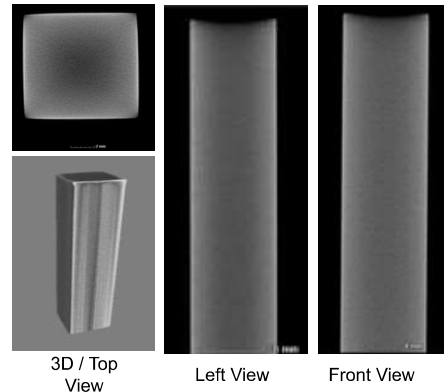
## Micrography

The observed microstructure is composed of acicular martensite embedded in the beta phase. The columnar shape of the grains extends along the manufacturing direction due to epitaxial growth of the original beta phase. In the XY section, the microstructure appears as polyhedral grains of  $\alpha' + \beta$ , with alpha phases at grain boundaries.



## Tomography

Computed Tomography Scan of 3D printed sample part in Ti64 without detectable voids or defects. Resolution of 24  $\mu\text{m}$  per pixel.



|                                |         |
|--------------------------------|---------|
| Relative density as 3D printed | 99.994% |
|--------------------------------|---------|

## Mechanical Properties

Results show that specimens printed using Meltio's wire-laser metal 3D printed process perform at the same level as samples made with conventional manufacturing methods. Results show low deviations and near isotropic properties after heat treatment. As printed data is not shown as it is not industrially relevant.

|                                       | UNE EN ISO 6892-1 |                    |                      |                      |
|---------------------------------------|-------------------|--------------------|----------------------|----------------------|
|                                       | Cast Properties   | Wrought Properties | Meltio XY properties | Meltio XZ properties |
|                                       | (ASTM F1108)      | (ASTM F1472)       | (Age Hardened)       | (Age Hardened)       |
| Ultimate Tensile strength (UTS) [MPa] | 860               | 930                | 802 $\pm$ 7          | 788 $\pm$ 12         |
| Yield strength [MPa]                  | 758               | 860                | 727 $\pm$ 17         | 693 $\pm$ 16         |
| Elongation [%]                        | 8                 | 10                 | 7 $\pm$ 1            | 9 $\pm$ 1            |

\*Test Carried Out In IDONIAL  
[info@idonial.com](mailto:info@idonial.com)

|                  | UNE EN ISO 6507-1 |                    |                |                   |
|------------------|-------------------|--------------------|----------------|-------------------|
|                  | Cast Properties   | Wrought Properties | Meltio         | Meltio Properties |
|                  | (ASTM F1108)      | (ASTM F1472)       | (Age Hardened) | (As printed)      |
| Hardness [HV-30] | 342               | 349                | 311            | 303               |

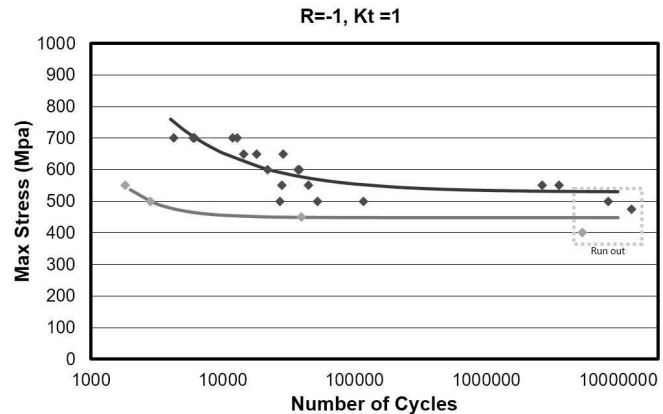
\*Test Carried Out In the University of Jaen (UJA)  
[info@strainanalysisuja.es](mailto:info@strainanalysisuja.es)

# Meltio Titanium 64

Ti-6Al-4V / ER Ti-5 / S Ti 6402c / 3.7165

## Fatigue

Meltio carried out a fatigue study on 3D printed specimens using two heat treatments, namely age hardening and hot isostatic pressing. The presence of residual porosity in the sample parts during the study, which has been resolved through process improvements, may explain the difference in fatigue behavior between the age-hardened and hot isostatic pressed specimens.



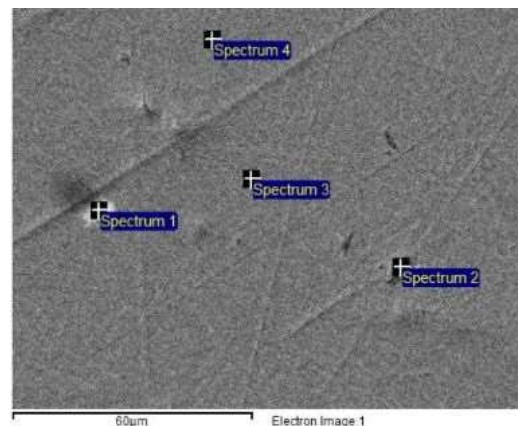
## Fatigue Strength

|   | UNE-EN ISO 1143                |                                   |  |  |
|---|--------------------------------|-----------------------------------|--|--|
|   | Cast Properties<br>(ASTM E466) | Wrought Properties<br>(ASTM E466) | Meltio XZ properties<br>(Age Hardened) | Meltio XZ properties<br>(Hot Isostatic Pressing) |
| <b>Fatigue Strength<br/>10<sup>7</sup> Cycles [MPa]</b> | 310                            | 560                               | 450                                    | 530  |

## Oxidation

Oxidation is a crucial factor that particularly affects the properties and performance of 3D printed titanium samples. Titanium has a high affinity for oxygen when exposed to air at high temperatures, which leads to embrittlement and reduced mechanical properties, such as decreased resistance to wear, fatigue, and corrosion.

Manufacturing parts in the Meltio M450 with only local gas shielding from the laser head resulted in components with 0.25 % in oxygen content. The SEM image showed dispersed oxides, including rutile and alumina and EDX spectra revealed the presence of titanium and aluminum oxides.



| Spectrum   | In stats. | O     | Al    | Ti    | V    | Total  |
|------------|-----------|-------|-------|-------|------|--------|
| Spectrum 1 | Yes       | 62.00 | 6.74  | 31.26 |      | 100.00 |
| Spectrum 2 | Yes       | 52.16 | 35.61 | 12.23 |      | 100.00 |
| Spectrum 3 | Yes       | 53.14 | 24.32 | 22.54 |      | 100.00 |
| Spectrum 4 | Yes       |       | 7.14  | 89.69 | 3.17 | 100.00 |

SEM Image in XY plane at 1000x magnification

\* Meltio's work on material characterization is carried out using the Meltio M450 and it remains under constant development. Specifications provided herein may not reflect the latest state of our research. For further information and questions please contact us via [info@meltio3d.com](mailto:info@meltio3d.com).

\*\* Any technical information or assistance provided herein is given and accepted at your own risk and neither Meltio nor its affiliates make any guarantees relating to it or because of it. Neither Meltio nor its affiliates shall be responsible for the use of this information, or any product, method or apparatus mentioned and you must make your own determination for its suitability and completeness for your application. Specifications are subject to change without notice.

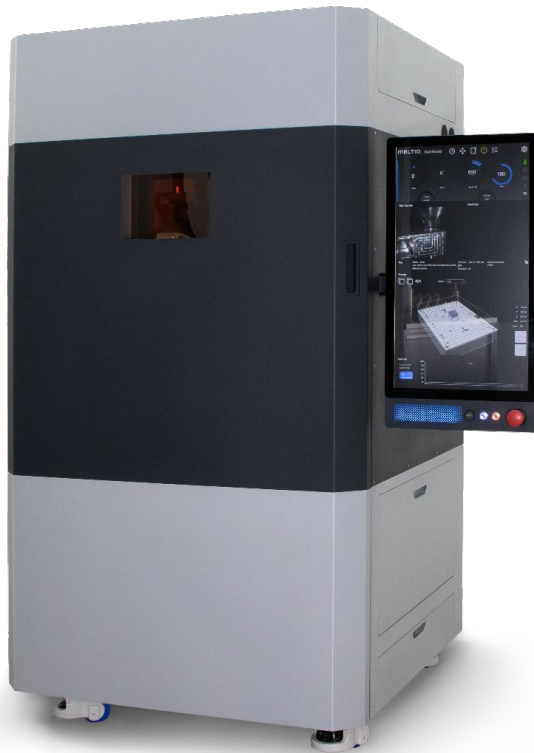
## C. Anexo 3: Especificaciones técnicas de la M600 de Meltio

# Meltio M600

## Industrial Metal 3D Printer

Expand your manufacturing capabilities with Blue lasers, a large build volume, and a fully inert chamber for the best material properties. Printing is easier than ever thanks to the improved process control, advanced sensors, and live monitoring allowing you to produce parts consistently 24/7.

The Meltio M600, with its built-in 3-axis probing system and work-holding solutions, is the ideal companion for your manufacturing operations.



## Value Proposition

### As simple as press Print.

---

Standardized printing strategies for a faster, safer, and more productive experience. The improved process control will take care of the rest.

### Easy-to-use

---

Advanced sensor solutions, simplified UI, Dedicated Slicer, zero point clamping system etc. all designed to minimize operator interaction.

### Reduced maintenance

---

The newly developed deposition head removes the need for laser alignment, while the motion system has been improved and over-sized to ensure maximum life-times.

### Production Ready

---

Bigger parts, higher deposition rate, Larger material range, inert print chamber, less maintenance, and built-in workholding solutions.

### Reliable

---

Redeveloped from scratch, boasting an improved wire feeding system, fiber-free deposition head, improved process control systems, and many more making for an extremely reliable machine.



## Technical Specifications

|                             |   |                                 |  |
|-----------------------------|---|---------------------------------|--|
| <b>Dimensions:</b>          | 1050 x 1150 x 1950 mm                                     | <b>Power Input:</b>             | 208/230 V three phase and 400V three phase are compatible. |
| <b>Build Envelope:</b>      | 300 x 400 x 600 mm  | <b>Power Consumption:</b>       | 4-6 kW Peak Depending on selected options                  |
| <b>System Weight:</b>       | 800-1000 kg (depending on options)                        | <b>Process Control:</b>         | Closed Loop, Laser and wire Modulation                     |
| <b>Movement System:</b>     | Servo Motor Linear axis with Absolute encoder on all axis | <b>Touch Probe:</b>             | Automated XYZ Touch Probe integrated                       |
| <b>Filtration system:</b>   | 3 Stage Particulate and Chemical Filtration included      | <b>Enclosure:</b>               | Laser-safe, Controlled inert atmosphere                    |
| <b>Environment Control:</b> | Control O2 and Humidity level                             | <b>Interface:</b>               | USB, Ethernet, WiFi  |
| <b>Laser Type:</b>          | 9x Direct Diode Lasers                                    | <b>Cooling:</b>                 | Active Water cooled Chiller Included                       |
| <b>Laser Wavelength:</b>    | 450nm (Blue)  | <b>Wire Feedstock Diameter:</b> | 0.8-1.2mm  |
| <b>Total Laser Power:</b>   | 1000 W  | <b>Wire Feedstock Spool:</b>    | BS300 or External Wire Drum                                |

## Wire Materials

|                               |  |
|-------------------------------|--|
| <b>Stainless Steels:</b>      | Excellent strength and corrosion resistance                        |
| <b>Mild Steels:</b>           | Cheap and ductile, with unparalleled machinability and weldability |
| <b>Carbon Steels:</b>         | High impact strength, retain hardness at high temperatures         |
| <b>Titanium Alloys:</b>       | Highest strength to weight ratio and corrosion resistance          |
| <b>Nickel Alloys:</b>         | High versatility, outstanding heat and corrosion resistance        |
| <b>Copper &amp; Aluminum:</b> | Conductivity and corrosion resistance & lightweight strength       |

## Upgrades and Accessories

|                                      |   |
|--------------------------------------|---|
| <b>Hot Wire:</b>                     | Programmable power supply that preheats the material to increase the deposition rate                      |
| <b>Dual-Wire</b>                     | This option allows for sequential 3D Printing of up to 2 materials with very fast automatic wire switches |
| <b>Quad-Wire</b>                     | This option allows for sequential 3D Printing of up to 4 materials with very fast automatic wire switches |
| <b>External Wire Drum Connection</b> | Connect external wire drums to the M600, allowing the use of 100 kg and 200 kg material packs             |
| <b>Zero Point Clamping System</b>    | Accurately and quickly couple fixture plates to the print bed of the M600 for production                  |