



# GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

Análisis, diseño generativo y fabricación de  
componentes de uso final mediante impresión 3D para  
aplicación industrial

Autor: Álvaro Reina García

Director: Mariano Jiménez Calzado

Madrid  
Julio de 2025

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título  
Análisis, diseño generativo y fabricación de componentes de uso final mediante impresión  
3D para aplicación industrial

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el  
curso académico 2024/25 es de mi autoría, original e inédito y

no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos.

El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido  
tomada de otros documentos está debidamente referenciada.

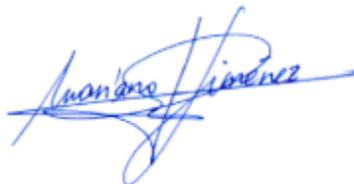


Fdo.: Álvaro Reina García

Fecha: 15 / 07 / 2025

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO



Fdo.: Mariano Jiménez Calzado

Fecha: 15 / 07 / 2025

# Agradecimientos

Muchas gracias a las tres personas más importantes de mi vida: mamá, papá y Arturo, por nunca haber dudado de mis capacidades para sacar adelante no solo este curso, sino todos los anteriores. Gracias por ofrecer siempre vuestra ayuda, incluso sin conocer el mundo de la ingeniería, que no es poca cosa.

Quiero acordarme también de los que ya no están: el abuelo Antonio, la abuela María Lisa y, sobre todo, el abuelo Ángel, quien fue la persona que me inspiró a ser ingeniero. Sin su apoyo, inmaterial, no habría llegado hasta aquí. Y, por supuesto, no me puedo olvidar de la abuela Mili, que tras cada examen me llamaba preocupada para saber cómo me había salido.

Este párrafo va dedicado a todos mis amigos, especialmente a los que he hecho a lo largo de la carrera, que saben bien lo que hemos sufrido juntos. También a los del Prado, que han hecho todo mucho más ameno con risas, viajes, vaciles y momentos inolvidables. No voy a decir nombres, porque cada uno sabe que ha sido especial a su manera.

Mi agradecimiento también para Mariano, que en estos últimos meses ha estado siempre disponible, respondiendo correos, atendiendo en el laboratorio y ayudando con una sonrisa y esa aura de buen rollo que transmite a todos.

Y para finalizar, al más importante: Gracias, Dios, por todo.

# Análisis, diseño generativo y fabricación de componentes de uso final mediante impresión 3D para aplicación industrial

Autor: Reina García, Álvaro.

Director: Jiménez Calzado, Mariano.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas.

## RESUMEN DEL PROYECTO

Con el diseño simplificado de una plataforma de elevación de carga, se estudia la fuerza que ejerce el cilindro hidráulico sobre uno de los brazos de la plataforma y se estudia el movimiento de esta. Se realizó un rediseño del brazo empleando principios del diseño generativo y de la optimización topológica, y de esta forma imprimir un prototipo de las barras de la pieza.

**Palabras clave:** Impresión 3D, Fabricación aditiva, Optimización Topológica

### 1. Introducción

En este trabajo se busca reducir la masa de los brazos de una plataforma de elevación de carga. Estos brazos fueron diseñados de cero, con la idea de que más tarde se les aplicarían criterios de optimización topológica y así obtener un resultado más ligero y óptimo. Además de obtener una estructura más eficiente y rígida. Para el diseño original se empleó el software SolidWorks y para los criterios de diseño generativo, otro software de Siemens, Solid Edge.

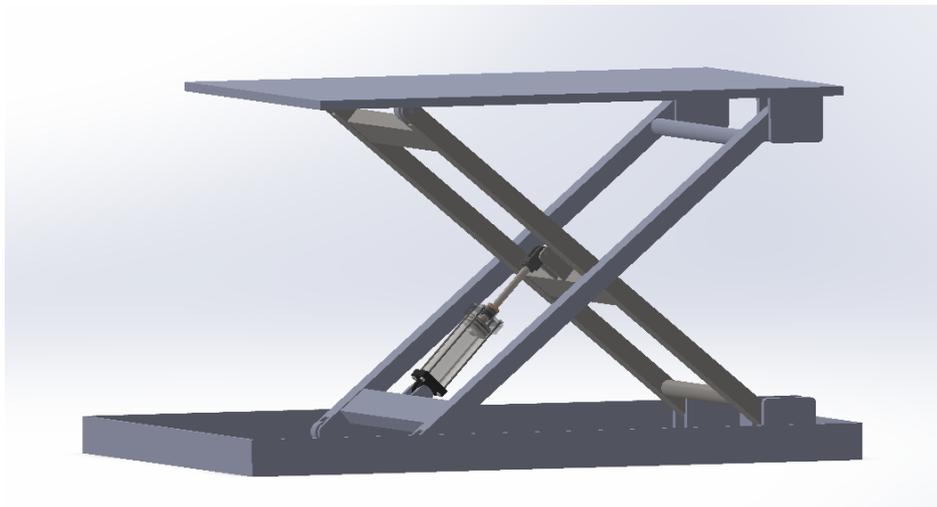


Ilustración 1. Plataforma de elevación de carga

### 2. Definición del Proyecto



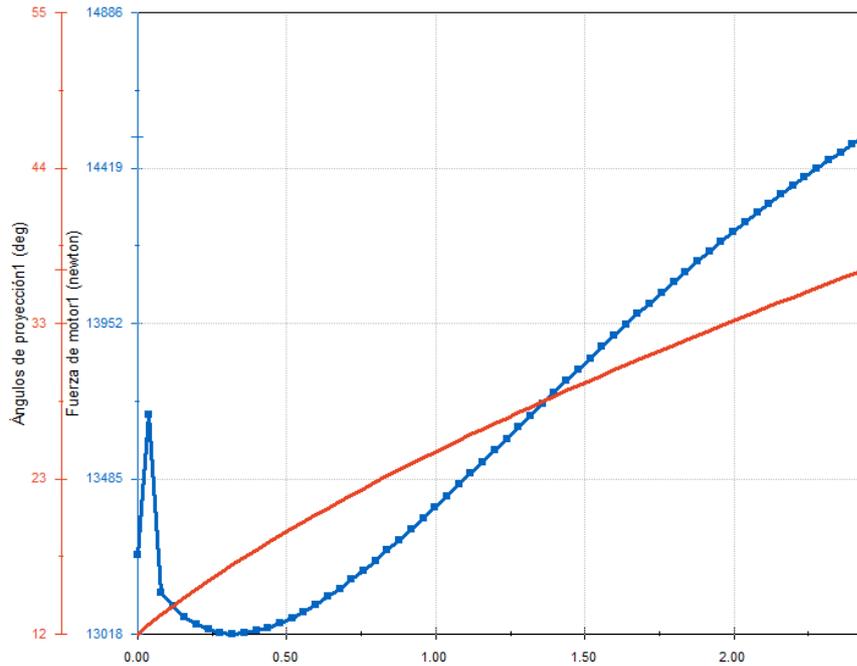


Ilustración 3. Curvas Fuerza motor-tiempo (Azul) y Ángulo brazo-tiempo (Roja)

Conociendo el funcionamiento y la importancia de cada parte del brazo, así como las fuerzas exteriores y reacciones que actúan sobre él. Se puede realizar una simulación y ahí se verá las regiones donde el brazo experimenta mayores tensiones y por tanto ahí habrá que retirar menos material que en aquellas regiones donde las tensiones sean muy inferiores al límite elástico del material. A continuación se realizar varias iteraciones para buscar reducir la masa al máximo, pero que siga cumpliendo con su trabajo de subir y bajar las cargas.

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

El modelo final con el que se trabajó y el cual siguió el diagrama de flujo de ciclo de diseño con criterios de optimización topológica fueron las barras de los brazos de tijera.

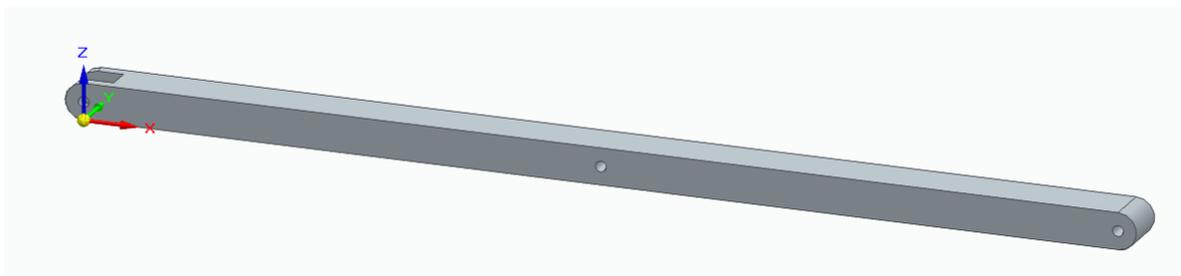


Ilustración 4. Barras de los brazos que se estudiaron

Esto se debe a que son elementos más interesantes para el estudio debido a que suponen la mayoría de la masa del conjunto, es decir, en estas barras se pueden encontrar zonas en las que se elimine material sin perjudicar el funcionamiento del conjunto.

#### 4. Resultados

Para la fabricación de los prototipos, el de la pieza sin reducción de masa y el optimizado, se realizó un estudio para ver si se emplearía el mismo material o distintos, y cual sería el más apropiado para ello. También, se eligió el método de fabricación aditiva se iba a emplear en cada prototipo.

Tras varias iteraciones en las cuales se va estudiando el comportamiento de la pieza con diferentes reducciones de masa se llegó a un resultado final en el cual se pudo reducir en un 60% la masa total de la barra estudiada. Se comprobó si esta nueva restructuración geométrica soportaría las fuerzas que experimenta la pieza en su momento más crítico, a lo largo del desplazamiento vertical de la plataforma, con una simulación en la que se vio que no se superaba el límite elástico. Previamente a dicha simulación se propuso un refinado de la optimización topológica con el software de Altair.

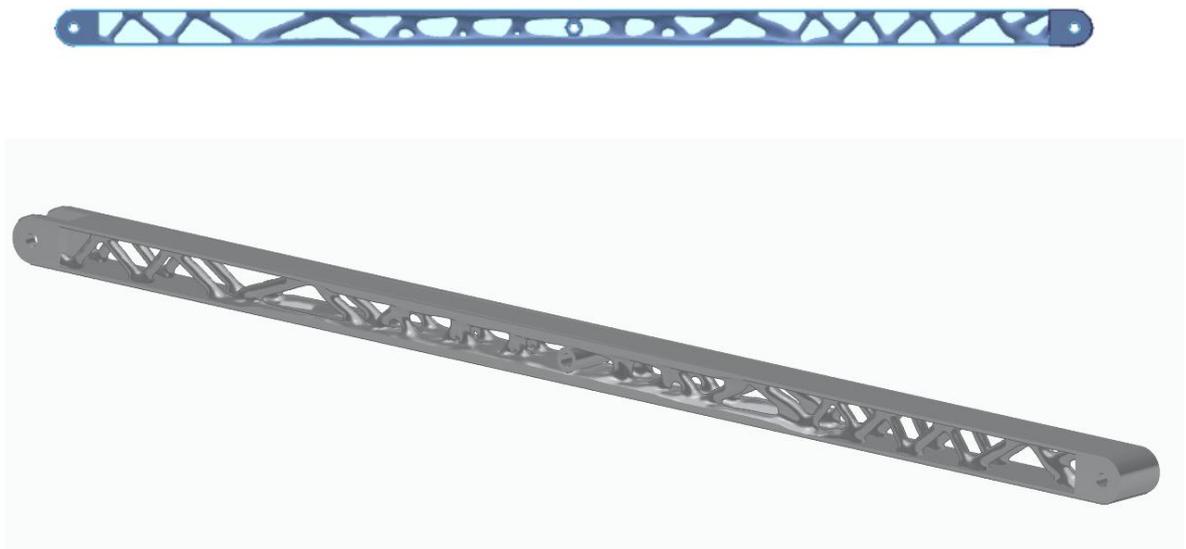


Ilustración 5. Barra con una reducción de masa del 60%

Para la fabricación de los prototipos, el de la pieza sin reducción de masa y el optimizado, se realizó un estudio para ver si se emplearía el mismo material o distintos, y cuál sería el más apropiado para ello. También, se eligió el método de fabricación aditiva se iba a emplear en cada prototipo.

## 5. Conclusiones

Tras el desarrollo de este trabajo, hemos podido observar que la pieza estudiada puede ser optimizada topológicamente para así reducir el gasto en material. A su vez, se vio que hace falta el desarrollo de impresoras 3D de mayor tamaño, ya que el principal problema para la fabricación de estas barras eran las dimensiones de las impresoras disponibles en el mercado. Por lo general, las impresoras metálicas están pensadas para piezas de pequeño y mediano tamaño, orientadas principalmente a la fabricación de componentes para los sectores automotriz o aeroespacial.

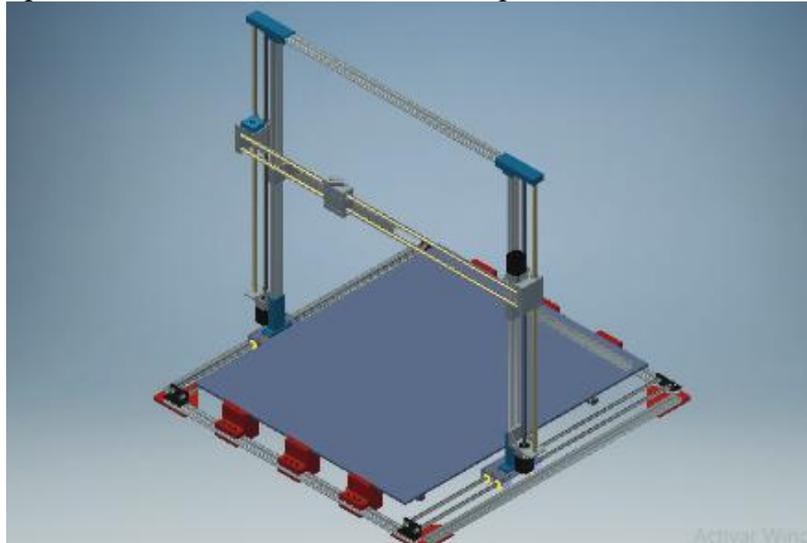


Ilustración 6. Diseño CAD de la estructura de la impresora (Fuente: *Vista de Diseño de la Estructura de una Impresora 3d Didáctica de Gran Escala*, s. f.)

Una forma alternativa de fabricar estas barras con menos material es el corte por chorro de agua. Con este método no se pueden obtener geometrías tan complejas como las que permite la impresión 3D, pero aun así se consigue una reducción considerable de masa. Para el desarrollo de estas nuevas geometrías, se ha comprobado que la optimización de forma ofrece resultados muy buenos.

El principal problema que puede presentarse en la fabricación por corte por chorro de agua es trabajar con espesores muy grandes (superiores a los 500 mm) o con materiales duros, como el acero utilizado en este estudio.

En resumen, las piezas de gran tamaño suelen obtener mejores resultados a través del mecanizado o la fundición. Sin embargo, estos métodos implican un elevado gasto de material innecesario y limitan la posibilidad de producir geometrías complejas, lo cual representa una gran desventaja para algunas industrias. Para futuros proyectos, sería interesante estudiar y desarrollar mejoras en la impresión 3D, con el objetivo de imprimir piezas de gran tamaño, así como también en el corte por chorro de agua, para

que este pueda trabajar de forma más económica y eficiente con grandes espesores y materiales duros.

## **6. Referencias**

- [1] *Vista de Diseño de la estructura de una Impresora 3d didáctica de gran escala.* (s. f.).  
<http://revistas.santototunja.edu.co/index.php/ingeniomagno/article/view/2179/1857>

# Analysis, generative design, and manufacturing of end-use components through 3D printing for industrial applications

Author: Reina García, Álvaro.

Supervisor: Jiménez Calzado, Mariano.

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

## ABSTRACT

With the simplified design of a load-lifting platform, the force exerted by the hydraulic cylinder on one of the platform's arms is analyzed, as well as the movement of the platform itself. The arm was redesigned using principles of generative design and topological optimization, in order to 3D print a prototype of the analyzed bars.

**Keywords:** 3D printing, Additive manufacturing and Topological optimization

### 1. Introducción (traducir todo el resumen al inglés, incluyendo los títulos que se hayan empleado)

This work aims to reduce the mass of the arms of a load-lifting platform. These arms were designed from scratch with the intention of later applying topological optimization criteria to obtain a lighter and more optimal result. The goal was also to achieve a more efficient and rigid structure. The original design was created using SolidWorks software, while generative design criteria were applied using another Siemens software, Solid Edge.

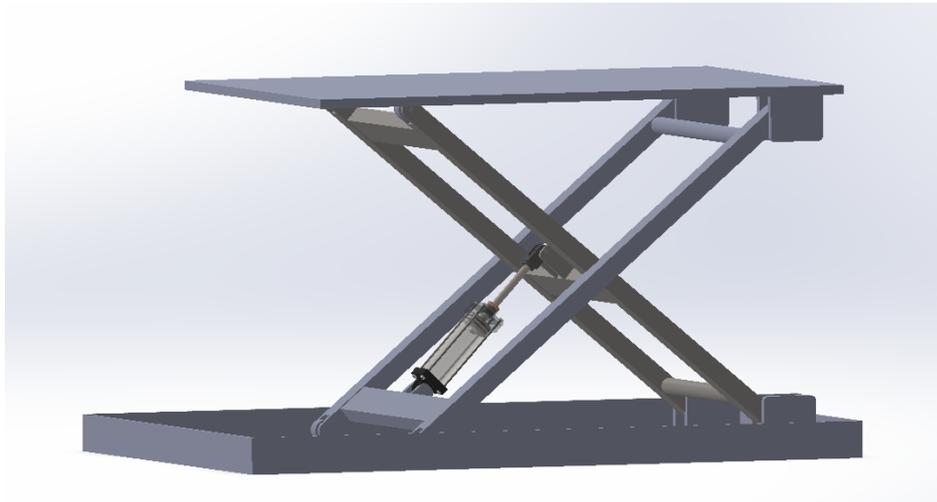
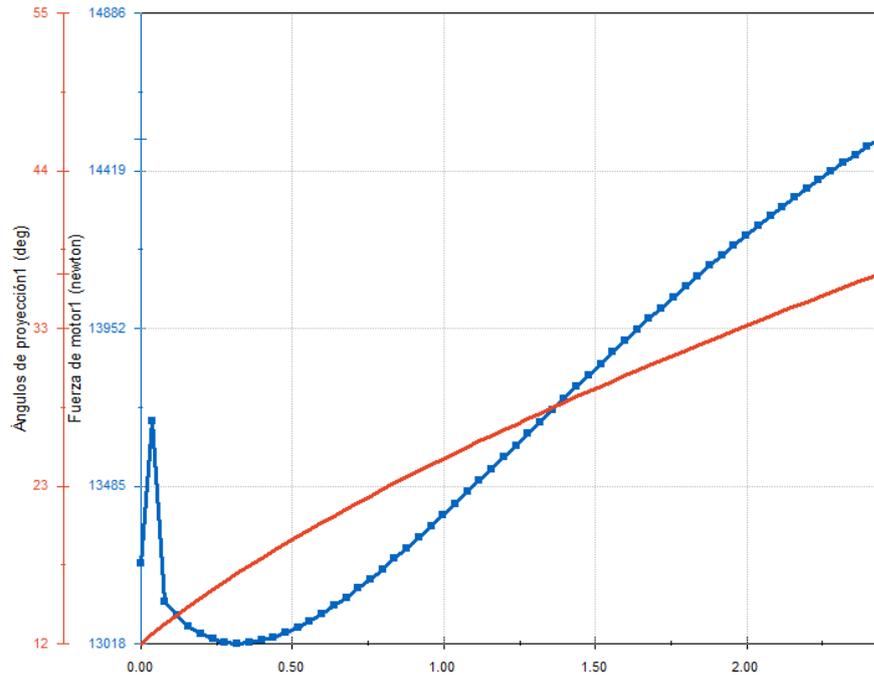


Illustration 7. Load-lifting platform





Ilustration 9. Motor Force-Time Curve (Blue) and Arm Angle-Time Curve (Red)

By understanding the function and importance of each part of the arm, as well as the external forces and reaction forces acting on it, a simulation can be performed to identify the regions where the arm experiences the highest stresses. In those areas, less material should be removed compared to regions where the stresses are well below the material's yield strength. Several iterations are then carried out to reduce the mass as much as possible, while still ensuring that the arm can perform its function of raising and lowering the loads effectively.

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

The final model used in this study, which followed the design cycle flowchart with topological optimization criteria, was the scissor arm bars.

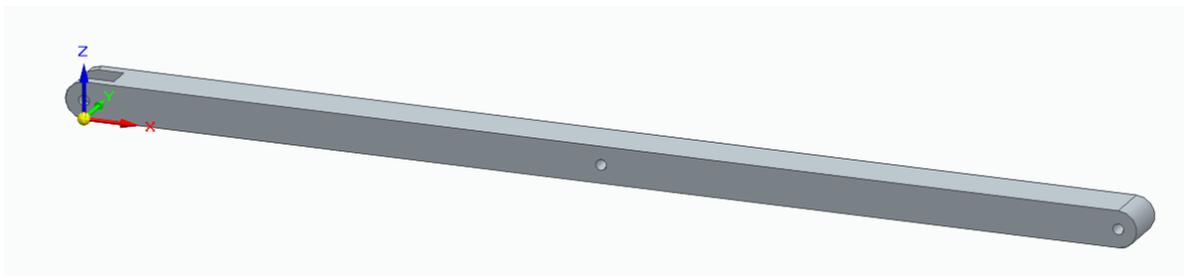


Ilustración 10. Bars of the arms that were analyzed

These components were selected because they are the most relevant for the study, as they account for the majority of the total mass of the assembly. In other words, these bars contain areas where material can be removed without compromising the functionality of the system.

#### 4. Resultados

For the fabrication of the prototypes—the original part without mass reduction and the optimized one—a study was conducted to determine whether the same material or different materials would be used, and which would be most appropriate. Additionally, the additive manufacturing method to be employed for each prototype was selected.

After several iterations studying the behavior of the part with different levels of mass reduction, a final result was achieved where the total mass of the studied bar was reduced by 60%. It was then verified whether this new geometric restructuring could withstand the forces experienced by the part at its most critical moment throughout the vertical displacement of the platform. A simulation showed that the yield strength was not exceeded. Prior to this simulation, a refinement of the topological optimization was proposed using Altair software.

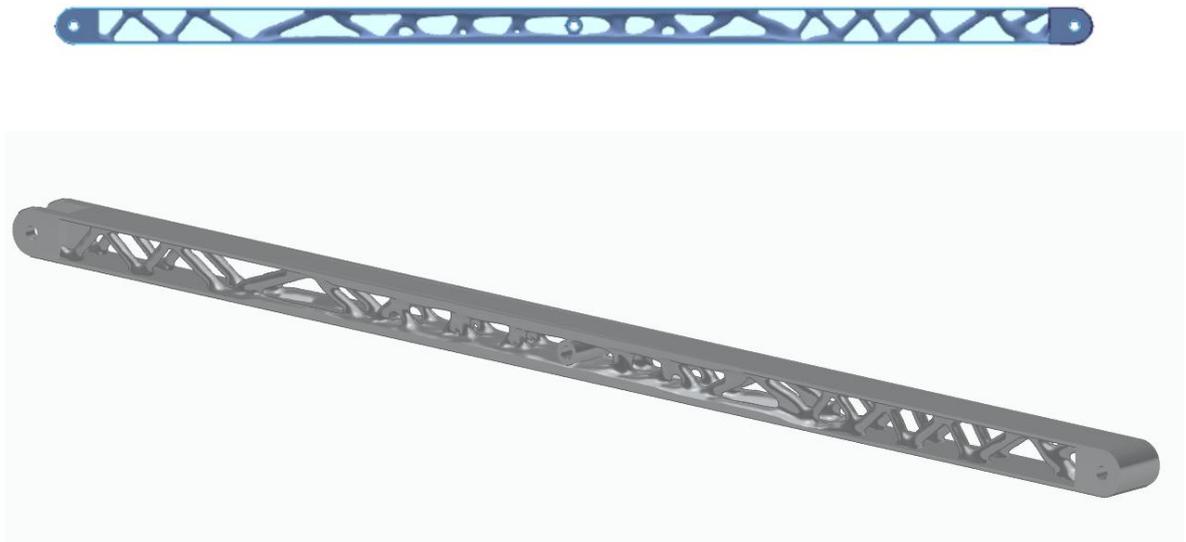


Illustration 11. Bar with a 60% mass reduction

For the fabrication of the prototypes—the original part without mass reduction and the optimized one—a study was conducted to determine whether the same or different materials would be used, and which would be the most appropriate. Additionally, the additive manufacturing method to be used for each prototype was selected.

## 5. Conclusiones

After the development of this work, we have observed that the studied part can be topologically optimized in order to reduce material usage. At the same time, it became evident that there is a need for the development of larger 3D printers, since the main issue in manufacturing these bars was the limited dimensions of the printers currently available on the market. In general, metal 3D printers are designed for small and medium-sized parts, mainly intended for the automotive and aerospace sectors.

An alternative way to manufacture these bars using less material is water jet cutting. Although this method cannot produce geometries as complex as those achievable with 3D printing, it still allows for a significant reduction in mass. In the development of these new geometries, shape optimization has proven to yield very good results.

The main challenge in manufacturing with water jet cutting is working with very large thicknesses (greater than 500 mm) or with hard materials, such as the steel used in this study.

In summary, large parts usually achieve the best results through machining or casting. However, these methods involve a high amount of unnecessary material waste and limit the production of complex geometries, which is a major drawback for some industries. For future projects, it would be interesting to explore and develop improvements in 3D printing to enable the fabrication of large-scale parts, as well as enhancements in water jet cutting to make it more economical and efficient when working with large thicknesses and hard materials.

## 6. Referencias

- [1] *Vista de Diseño de la estructura de una Impresora 3d didáctica de gran escala.* (s. f.).  
<http://revistas.santototunja.edu.co/index.php/ingeniomagno/article/view/2179/1857>

## *Índice de la memoria*

<i>Índice de la memoria</i> .....	<i>XV</i>
<i>Índice de figuras</i> .....	<i>XVIII</i>
<i>Índice de tablas</i> .....	<i>XXII</i>
<b>Capítulo 1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>23</b>
1.1 MOTIVACIÓN DEL PROYECTO .....	23
1.2 OBJETIVOS.....	24
1.3 OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE (ODS) .....	25
1.4 METODOLOGÍA DEL TRABAJO.....	26
<b>Capítulo 2. ESTADO DE LA CUESTIÓN</b> .....	<b>27</b>
2.1 OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA.....	27
2.2 IMPRESIÓN 3D.....	31
2.2.1 IMPRESIÓN 3D METÁLICA .....	35
2.3 PROCESOS COMPLEMENTARIOS DE CORTE EN FRÍO.....	41
2.3.1 CORTE POR CHORRO DE AGUA.....	41
2.3.2 CORTE POR OXICORTE .....	44
2.3.3 CORTE POR LÁSER .....	46
2.4 MECANIZADO .....	47
2.4.1 TORNEADO .....	50
2.4.2 FRESADO .....	51
2.4.3 TALADRADO .....	53
<b>Capítulo 3. METODOLOGÍA</b> .....	<b>55</b>
3.1 PROPUESTA DE ESTUDIO.....	55
3.1.1 GEOMETRÍA.....	55
3.1.2 MATERIAL .....	56

3.1.3 FUERZAS Y REACCIONES.....	58
<b>Capítulo 4. DESARROLLO DEL TRABAJO, IMPRESIÓN 3D.....</b>	<b>63</b>
4.1 ENTORNO DE DISEÑO 3D.....	63
4.1.1 DISEÑO.....	63
4.1.2 MATERIAL DE LA BARRA.....	64
4.1.3 RESTRICCIONES Y FUERZAS.....	65
4.1.4 MALLADO.....	67
4.2 SIMULACIÓN DEL DISEÑO.....	68
4.3 ITERACIONES.....	69
4.3.1 ITERACIÓN 1.....	70
4.3.2 ITERACIÓN 2.....	71
4.3.3 ITERACIÓN 3.....	73
4.3.4 ITERACIÓN 4.....	74
4.3.5 ITERACIÓN 5.....	75
4.3.6 ITERACIÓN 6.....	76
<b>Capítulo 5. DESARROLLO DEL TRABAJO, OPTIMIZACIÓN DE FORMA.....</b>	<b>77</b>
5.1 PROPUESTAS.....	77
5.1.1 PROPUESTA 1.....	78
5.1.2 PROPUESTA 2.....	79
5.1.3 PROPUESTA 3.....	81
5.1.4 PROPUESTA 4.....	82
<b>Capítulo 6. PROTOTIPOS.....</b>	<b>85</b>
6.1 BARRA SIN OPTIMIZAR.....	85
6.2 BARRA OPTIMIZADA TOPOLOGICAMENTE.....	86
6.3 BARRA OPTIMIZADA EN FORMA.....	87
<b>Capítulo 7. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....</b>	<b>88</b>
7.1 PRESUPUESTOS 3D.....	88
7.1.1 COSTES MARKFORGED X7.....	89
7.1.2 COSTES HP JET FUSION 580.....	90
7.2 PRESUPUESTOS CORTE POR CHORRO DE AGUA.....	91

<i>Capítulo 8. Conclusiones y Trabajos Futuros.....</i>	<i>94</i>
<i>Capítulo 9. Bibliografía.....</i>	<i>96</i>
<i>ANEXO I</i>	<i>99</i>

## Índice de figuras

Ilustración 1. Plataforma de elevación de carga .....	4
Ilustración 2. Brazo diseñado para ser optimizado.....	5
Ilustración 3. Curvas Fuerza motor-tiempo (Azul) y Ángulo brazo-tiempo (Roja).....	6
Ilustración 4. Barras de los brazos que se estudiaron .....	6
Ilustración 5. Barra con una reducción de masa del 60%.....	7
Ilustración 6. Diseño CAD de la estructura de la impresora (Fuente: <i>Vista de Diseño de la Estructura de una Impresora 3d Didáctica de Gran Escala</i> , s. f.) .....	8
Illustration 7. Load-lifting platform.....	10
Illustration 8. Arm designed for topological optimization .....	11
Illustration 9. Motor Force-Time Curve (Blue) and Arm Angle-Time Curve (Red) .....	12
Ilustración 10. Bars of the arms that were analyzed.....	12
Illustration 11. Bar with a 60% mass reduction.....	13
Ilustración 12. Optimización topológica aplicada al diseño de un brazo de control superior de automóvil realizada con GENESIS Topology para ANSYS Mechanical (GTAM) de Vanderplaats Research & Development y ANSYS SpaceClaim(Fuente: PADT, 2016) [2] .....	27
Ilustración 13. Proceso de trabajo de la optimización topológica (Fuente: Formlabs) [4]..	28
Ilustración 14. Diagrama de flujo para optimizar topológicamente .....	29
Ilustración 15. Implante diseñado por optimización topológica (Fuente: C & C, 2025) [7]	30
Ilustración 16. Férulas impresas en 3D (Fuente: Alfonso, 2023) [8] .....	31
Ilustración 17. Impresora 3D en un barco de guerra (Fuente: Meltio, 2024) [9] .....	33
Ilustración 18. Ventajas de la impresión 3D (Fuente: Impresion3d, 2024) [10].....	34
Ilustración 19. Esquema típico de una impresora DMLS (Fuente: De Naoum & Piccoli, 2024) [11] .....	37

Ilustración 20. Pieza de aluminio impresa con DMLS ( <i>Servicios de Impresión 3D de Metales Online (DMLS)   Xometry Europe, 2025</i> ) [12].....	38
Ilustración 21. Esquema del Láser Cladding (Fuente: <i>Láser Cladding: Un Método Para Diferentes Aplicaciones</i> , s. f.) [13].....	40
Ilustración 22. Componentes impresos por el método Láser Cladding (Fuente: <i>Impresión 3D de Componentes Metálicos Mediante Láser Cladding En Hilo</i> , s. f.) [14] .....	40
Ilustración 23. Ejemplo de corte por chorro de agua (Manufactures Cusell, 2022) [17] ....	42
Ilustración 24. Corte por chorro de agua mejorado con abrasivo, grano de arena (Fuente: Quora, s.f.) [18] .....	43
Ilustración 25. Granos de granate (Fuente: Watson, 2025) [27] .....	44
Ilustración 26. Esquema del proceso de Oxicorte (Fuente: <i>Oxicorte. Proceso y Productos - Gestión de Compras</i> , 2021) [19] .....	45
Ilustración 27. Plancha cortada por Láser (Fuente: <i>Corte Por Láser - Dassault Systèmes</i> , 2023) [20] .....	47
Ilustración 28. Ejemplo de diagrama de Flujo, proceso de mecanizado de piezas (Fuente: DarwinA.Milla, s. f.) [22].....	48
Ilustración 29. Pieza siendo mecanizada por una fresadora (Fuente: Aceromafe, 2025) [23] .....	49
Ilustración 30. Pieza siendo mecanizada por un torno (Fuente: Umesal, 2024) [24].....	50
Ilustración 31. Partes de una fresadora (Fuente: Admin, 2024) [25] .....	52
Ilustración 32. Operaciones de taladrado industrial (Fuente: Savour, 2025) [26].....	53
Ilustración 33. Diagrama de flujo del estudio.....	55
Ilustración 34. Plano de la barra para optimizar .....	56
Ilustración 35. Tipos de acero de cementación (Fuente: <i>Thyssenkrupp Materials Ibérica   Acero, Inoxidable y Aluminio</i> , s. f.) [21] .....	57
Ilustración 36. Propiedades físicas del Acero-DIN 17CrS3 .....	58
Ilustración 37. Curvas Fuerza motor-tiempo (Azul) y Ángulo brazo-tiempo (Roja).....	59
Ilustración 38. Plataforma/Estructura en 2D en su punto crítico.....	60
Ilustración 39. Plataforma/Estructura simplificada en 2D en su punto crítico .....	61

Ilustración 40. Barra de la plataforma .....	64
Ilustración 41. Acero DIN 17CrS3 en la tabla de materiales de Solid Edge.....	65
Ilustración 42. Cara articulada de la barra.....	66
Ilustración 43. Fuerzas que experimenta la barra.....	66
Ilustración 44. Barra mallada .....	67
Ilustración 45. Propiedades de la malla empleada en la barra.....	67
Ilustración 46. Resultado de la tensión de Von Mises en la simulación original.....	68
Ilustración 47. Resultado del desplazamiento simulación original .....	69
Ilustración 48. Regiones de la barra que se quieren preservar para las distintas iteraciones .....	70
Ilustración 49. Barra con una reducción de masa del 25%.....	71
Ilustración 50. Barra refinada con una reducción de masa del 25%.....	71
Ilustración 51. Barra con una reducción de masa del 35%.....	72
Ilustración 52. Barra refinada con una reducción de masa del 35%.....	72
Ilustración 53. Barra con una reducción de masa del 40%.....	73
Ilustración 54. Barra refinada con una reducción de masa del 40%.....	73
Ilustración 55. Barra con una reducción de masa del 45%.....	74
Ilustración 56. Barra refinada con una reducción de masa del 45%.....	74
Ilustración 57. Barra con una reducción de masa del 50%.....	75
Ilustración 58. Barra refinada con una reducción de masa del 50%.....	75
Ilustración 59. Barra con una reducción de masa del 60%.....	76
Ilustración 60. Barra refinada con una reducción de masa del 60%.....	76
Ilustración 61. Patrón que sigue la optimización de forma .....	77
Ilustración 62. Barra con la propuesta 1 de la optimización de forma .....	78
Ilustración 63. Resultado de la tensión de Von Mises en la propuesta 1 .....	79
Ilustración 64. Barra con la propuesta 2 de la optimización de forma .....	80
Ilustración 65. Resultado de la tensión de Von Mises en la propuesta 2 .....	80
Ilustración 66. Barra con la propuesta 3 de la optimización de forma .....	81
Ilustración 67. Resultado de la tensión de Von Mises en la propuesta 3 .....	82

Ilustración 68. Barra con la propuesta 4 de la optimización de forma .....	83
Ilustración 69. Resultado de la tensión de Von Mises en la propuesta 4 .....	84
Ilustración 70. Visualización de la barra sin optimizar en Cura.....	85
Ilustración 71. Visualización de la barra optimizada topológicamente en Cura .....	86
Ilustración 72. Prototipo, optimizado topológicamente, impreso.....	86
Ilustración 73. Visualización de la barra optimizada en forma en Cura.....	87
Ilustración 74. Prototipo, optimizado en forma, impreso .....	87
Ilustración 75. Simulación de la impresión 3D .....	88
Ilustración 76. Simulación de la fabricación por chorro de agua .....	91

## *Índice de tablas*

Tabla 1. Costes de impresión de una barra con la impresora Markforged X7 .....	90
Tabla 2. Costes de impresión de una barra con la impresora HP Jet Fusion 580.....	90
Tabla 3. Costes de fabricación de una barra con la máquina OMAX MAXIEM 1530 30KM (22kW).....	92

## **Capítulo 1. INTRODUCCIÓN**

### ***1.1 MOTIVACIÓN DEL PROYECTO***

La impresión 3D ha revolucionado por completo la industria de la fabricación, permitiendo que lo que antes era imposible de conseguir ahora esté al alcance de los fabricantes. Los métodos de fabricación tradicionales limitaban enormemente al diseñador para que se crearan algunas de sus figuras o patrones, debido a su gran complejidad. La fabricación aditiva no solo permite la obtención de diseños atractivos para el consumidor, sino que también permite la reducción del material empleado en la elaboración de los componentes. Esto se puede traducir a su vez en menos contaminación, menos desperdicios y menos masa.

Reducir cierta cantidad de material para algunas industrias está muy cotizado y se realizan estudios muy costosos para conseguir que los elementos pesen lo mínimo posible como la industria de la automoción o la aeronáutica. Así que el análisis y diseño generativo son herramientas clave, ya que permiten mejorar los componentes y sus rendimientos, optimizando su geometría.

La idea principal de este proyecto es la optimización de los brazos de una plataforma de elevación de carga para que esta pueda seguir realizando su función sin ningún problema, consiguiendo que pese menos y si emplee menos material para reducir los costos. La optimización topológica busca determinar la mejor geometría de una pieza, para maximizar el rendimiento de su estructura en unas condiciones determinadas.

## ***1.2 OBJETIVOS***

Los principales objetivos de este TFG son cinco, siendo estos los que guardan mayor relación con la meta de este proyecto.

- 1) Familiarizarse con distintos Softwares de diseño 3D y conocer las herramientas que nos proporciona cada uno, así como su manejo. Se trabajó con SolidWorks para el modelado del ensamblaje, y el Solid Edge fue empleado para las simulaciones de FEM.
- 2) Se quiere conocer otros softwares relacionados con el diseño generativo y la optimización estructural, para este objetivo se empleó el Software Altair Inspire.
- 3) Desarrollar la habilidad de detección de zonas que experimenten menor tensión y que puedan ser rediseñadas para así conseguir objetos más ligeros y aprovecharse de todas las ventajas que esto conlleva.
- 4) Conocer los procesos de fabricación aditiva, sus ventajas y desventajas, así como los diferentes criterios que se emplean para la elección del material o para el tipo de impresión 3D que es más adecuada para cada caso particular.
- 5) Conocer los criterios que se emplean en el diseño generativo y saber las diferencias que tiene con respecto a la impresión 3D, pese a su estrecha relación

### ***1.3 OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE (ODS)***

En el año 2015 los estados miembros de la ONU, en conjunto con ONGs y ciudadanos de todo el mundo, generaron una propuesta para desarrollar 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), los cuales buscan alcanzar de manera equilibrada tres dimensiones del desarrollo sostenible: el ámbito económico, social y ambiental. Los siguientes objetivos se ven involucrados en el proyecto: [5]

**ODS 9: Industria, Innovación e Infraestructura:** Este objetivo fomenta la construcción de infraestructuras sostenibles, así como el impulso de la industrialización en todos los países. La impresión 3D es claramente un ejemplo de innovación en el ámbito de la industria, gracias a la nueva visión que nos abre para la fabricación de los productos, y con ello su diseño. Con la incorporación de estas tecnologías avanzadas, las industrias aumentan su productividad y mejoran la calidad de los productos. Lo que nos lleva a un entorno industrial más competitivo.

**ODS 12: Producción y Consumo Responsable:** Este objetivo se centra en la reducción de residuos tanto en la producción de productos como en el consumo de estos. Con el desarrollo y la incorporación de la fabricación aditiva a la industria se podrán realizar una mayor cantidad de elementos reduciendo al máximo el material sobrante en su fabricación. Gracias a que este método es mejor que el resto para la fabricación bajo demanda se hace un uso de los recursos más responsable. Promover la producción sostenible también implica considerar la vida útil de los productos y su reciclado, aspecto clave para realizar un consumo responsable.

**ODS 13: Acción por el Clima:** Este objetivo se centra en que el medio ambiente se vea mínimamente afectado por la vida industrial y social de los países, para mitigar en gran medida el cambio climático. El producto desechado es menor y la huella de carbono de la fabricación aditiva es considerablemente inferior al resto de métodos de fabricación

tradicionales, ya que habilita la posibilidad de realizar una producción local. Si las empresas adoptan estas tecnologías se alinearán con las metas de reducción de emisiones acordadas.

## ***1.4 METODOLOGÍA DEL TRABAJO***

Para empezar el proyecto hay que definir cuál es el objetivo principal de este, diseñar y aplicar la optimización topológica para la producción, mediante fabricación aditiva, de las barras de los brazos de una plataforma de elevación de carga. Teniendo en cuenta las limitaciones estructurales y de materiales que se van a emplear en el producto final, así como en el prototipo.

Se hará una revisión de la literatura existente sobre las impresoras 3D y sus tecnologías, centrándose en su aplicación en estructuras que soporten cargas. Además, se buscarán casos previos de sistemas de elevación de cargas para conocer los distintos problemas y limitaciones que han ido apareciendo, así como las soluciones que se han desarrollado.

Para el análisis estructural y de diseño se emplearán softwares como SolidEdge, SolidWorks o Altair Inspire los cuales nos ayudarán con el desarrollo del diseño de los componentes. Dando la oportunidad de poder estudiar distintas geometrías y configuraciones con los que se puedan desarrollar estas barras. Para poder maximizar la eficiencia de la estructura se deberá hacer un estudio de los diferentes materiales con los que las impresoras 3D trabajan hoy día, desde filamentos de materiales reciclados y naturales a filamentos de metales con los que ya se encuentran impresoras que pueden trabajar con ellos.

Cuando se encuentre un rediseño optimizado, el cual cumpla con las cargas que se le adjuntarán a la barra, se realizará un prototipo, no a escala, de los brazos de la plataforma. Esperándose que este pueda soportar las cargas. Hay que mencionar que antes de realizar este prototipo habrá que realizar un análisis económico para ver si la producción de estas componentes es económicamente viable. Y ver la diferencia de coste entre el método de producción convencional y la fabricación aditiva.

## Capítulo 2. ESTADO DE LA CUESTIÓN

### 2.1 OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA

Según la Real Academia Española (RAE) el término optimizar se define como “Buscar la mejor manera de realizar una actividad” [1]. La optimización topológica se puede definir como la búsqueda de la mejor manera de utilizar las propiedades de las figuras con independencia de su tamaño o forma.



Ilustración 12. Optimización topológica aplicada al diseño de un brazo de control superior de automóvil realizada con GENESIS Topology para ANSYS Mechanical (GTAM) de Vanderplaats Research & Development y ANSYS SpaceClaim(Fuente: PADT, 2016) [2]

La optimización topológica es una técnica para el diseño estructural que permite determinar la distribución óptima del material en una pieza, buscando minimizar una función objetivo bajo ciertas restricciones (como las condiciones de carga). [3]

La optimización topológica parte de un diseño que debe de adaptarse de forma que no se pierdan prestaciones a pesar del ahorro. A continuación, se realiza un modelo mallado el

pasa por un análisis de elementos finitos el cual nos devuelve una respuesta adaptada a las restricciones que se han impuesto sobre la pieza.

Este método ya es conocido desde hace tiempo, pero su integración con la fabricación aditiva representa una evolución reciente con gran potencial. La impresión 3D permite reproducir geometrías complejas que serían inviables por los métodos de fabricación tradicionales. Esto proporciona al ingeniero la posibilidad de obtener aquellas ideas y geometrías que antes solo podían ser plasmadas en un plano.

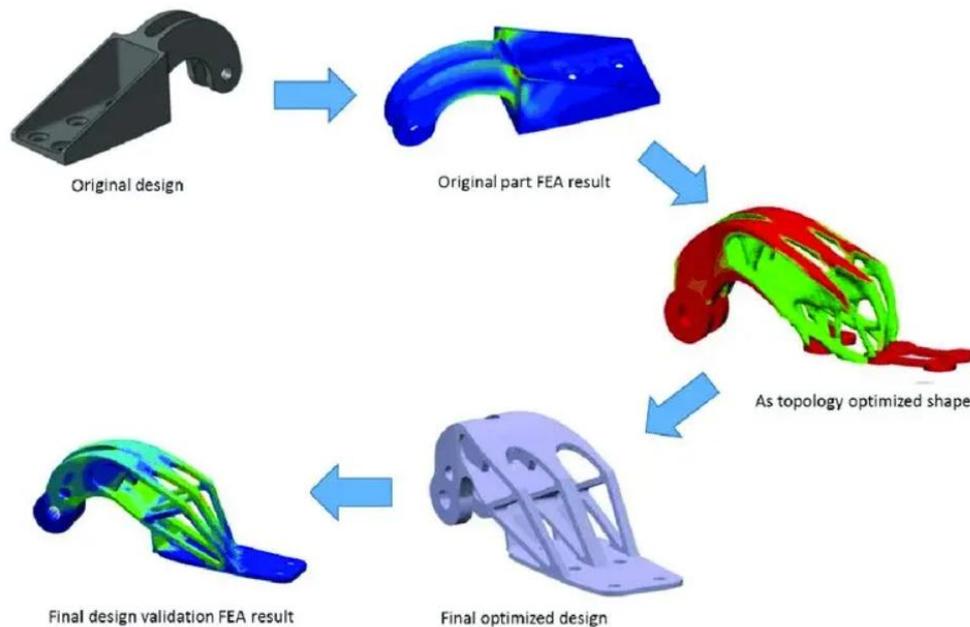


Ilustración 13. Proceso de trabajo de la optimización topológica (Fuente: Formlabs) [4]

En la industria aeroespacial y automotriz, la reducción de peso conlleva en mejoras en la eficiencia y en el consumo de combustible. Uno de los beneficios más destacados de la optimización topológica es su capacidad de reducir la masa de componentes sin comprometer su resistencia, también permite diseñar piezas más eficientes en términos de uso de material y energía. Esto último es relevante en la ingeniería de sistemas mecánicos,

donde cada pequeña mejora en la eficiencia reduce costos de operación y aumenta su durabilidad.

En términos de costos, se reduce considerablemente el uso de material, lo cual se traduce en un menor gasto en materias primas. Además, al simplificar las formas y eliminar características innecesarias del diseño, también se abaratan los procesos de fabricación, especialmente en métodos complejos como el mecanizado o la fundición. Desde una perspectiva ambiental, la optimización topológica aporta un valor importante. Al emplear solo el material necesario y evitar desperdicios, se reduce el impacto.

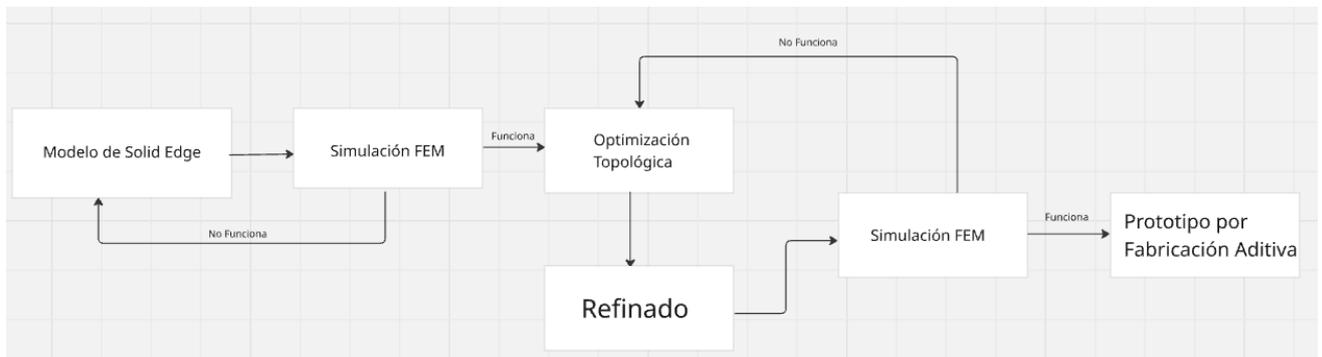


Ilustración 14. Diagrama de flujo para optimizar topológicamente

El flujo general que siguen los distintos tipos de optimización topológica comienza con un diseño básico de una pieza, la cual es estudiado por el método de elementos finitos (FEM). Si este diseño original cumple con las condiciones de contorno que va a experimentar la pieza se puede empezar a optimizar topológicamente. Estos nuevos rediseños son también estudiados por FEM y si estos cumplen con las especificaciones se puede seguir trabajando, buscando un prototipo final.

Conseguir una geometría óptima de un cuerpo que minimice o maximice una cierta función, a la vez que satisface sus condiciones de contorno, es uno de los problemas de la ingeniería.

Para este problema se puede encarar empleando dos caminos, siguiendo la ruta de la optimización de forma o la de la optimización de la topología.

La optimización de forma es un proceso de ingeniería que consiste en modificar la geometría de un objeto, ajustando suavemente los contornos de una geometría existente, para mejorar su rendimiento, sin cambiar su funcionalidad general o sus condiciones de carga y apoyo. En este camino no se modifica su topología, es decir, la pieza conserva su estructura interna.

La optimización topológica, como su propio nombre indica, permite la modificación de su topología. Esto permite obtener un resultado final más próximo al óptimo. Los métodos de homogeneización son posiblemente los más utilizados para la optimización topológica. Estos consisten en caracterizar la topología a través de su densidad, es decir, los huecos se identifican con regiones de densidad nula. [6]



Ilustración 15. Implante diseñado por optimización topológica (Fuente: C & C, 2025) [7]

La optimización topológica sigue un flujo en el cual hay constantes iteraciones para así ir viendo las distintas situaciones que van mejorando el diseño. No siempre se darán pasos

hacia delante, de hecho, en muchas ocasiones nuevos diseños que se creen que serían mejores que los anteriores acaban siendo un error.

## **2.2 IMPRESIÓN 3D**

Con la llegada de la impresión 3D al mundo de la fabricación se abrió un abanico gigantesco de posibilidades para empezar a fabricar piezas que con los métodos tradicionales antes eran imposibles. En las últimas décadas, la impresión 3D ha pasado de ser una tecnología experimental a una herramienta, que ha transformado el sector.

También conocida como fabricación aditiva, esta técnica permite crear objetos tridimensionales superponiendo capas de material. Industrias como la automoción o la medicina se están viendo revolucionadas debido al gran potencial que la impresión 3D ha creado.



Ilustración 16. Férulas impresas en 3D (Fuente: Alfonso, 2023) [8]

Algunos de los avances claves de la fabricación aditiva son: la diversidad de materiales, al principio solo se podía trabajar con plásticos, pero ahora el catálogo de materiales con los que se puede trabajar ha aumentado enormemente. Entre los materiales utilizados para la impresión 3D ahora se puede trabajar con metales, cerámica, resinas biocompatibles o materiales elastoméricos.

Tener los productos a tiempo es fundamental para ser competitivos en el mercado actual, de ahí que se hayan realizado muchos avances para que la impresión 3D no se quede atrás debido a su lentitud. Las impresoras actuales consiguen resultados en un margen de tiempo muy inferior al de las impresoras clásicas, y no solo eso, también han conseguido que se puedan producir piezas con alta resolución y tolerancias muy ajustadas. Siendo esto último muy relevantes en sectores donde el más mínimo error en la metrología puede costar grandes sumas de dinero, como la industria aeronáutica.

Gracias a la impresión 3D, es posible obtener piezas donde y cuando sea, sin depender de fábricas mayores las cuales pueden tardar con el pedido o ser exigentes con el número de piezas que se pidan. Esto permite que el número de recambios que se llevan en ciertas expediciones se reduzca enormemente ya que no serán necesarios, lo que reduce el coste en transporte y material. Se empezó a ver en grandes buques de la marina americana lo cual como dijo el contralmirante Jason Lloyd e ingeniero jefe de NAVSEA “Estas impresoras tienen la capacidad de ayudar a la Armada a superar tanto los problemas de obsolescencia de buques y sistemas cuya vida útil se mide en décadas como de contribuir directamente a mejorar la disponibilidad operativa de nuestros sistemas y buques”.[9]



Ilustración 17. Impresora 3D en un barco de guerra (Fuente: Meltio, 2024) [9]

Uno de los avances más sorprendentes y recientes es el de la posibilidad de imprimir tejido humano o de alimentos. La bioimpresión abre nuevas puertas en la medicina regenerativa, lo cual permite crear órganos en desarrollo o prótesis personalizadas.

La personalización de los productos sin coste adicional es unas de las principales ventajas de la impresión 3D, no se tiene que crear o modificar una línea de producción entera solo para un pedido. Esto abarata los costes de producción a pequeña escala. Una de las ideas base de este nuevo estilo de fabricación es que el material sobrante se reduce enormemente, lo cual en un mundo cada vez más comprometido con el medio ambiente y consciente de que los recursos de la tierra son limitados, siendo un paso muy importante para la disminución del desperdicio.

La creación rápida y sencilla de prototipos permite a ingenieros y diseñadores probar y modificar los productos sin tener que esperar a que se les fabrique en otro lugar, olvidándose de todo el tiempo que esto conlleva. Esto permite que las nuevas ideas y avances se vayan viendo de forma más rápida, lo que acelera el ciclo de desarrollo e investigación. La impresión 3D elimina el uso de moldes o herramientas adicionales costosas lo cual permite que producciones no grandes puedan entrar en el mercado.



Ilustración 18. Ventajas de la impresión 3D (Fuente: Impresion3d, 2024) [10]

La fabricación aditiva, no es perfecta y aún tiene que desarrollarse más para entrar hasta el fondo del sector de la fabricación. Todavía no puede competir con la eficiencia y la velocidad de las líneas de producción tradicionales para grandes volúmenes, lo cual la limita enormemente en el ámbito de producción a gran escala. Hay materiales que no suelen proporcionar las mismas propiedades físicas o químicas cuando han sido utilizados en la impresión 3D, lo cual supone una desventaja cuando se quiere tener una gran fiabilidad en ámbitos de resistencia o fatiga. Encontrar filamentos económicos en cualquier material es complicado, sigue habiendo un gran número de filamentos o polvos metálicos con precios que incrementan el coste de fabricación.

En la fabricación aditiva hay múltiples tecnologías donde podemos mencionar:

- Fotopolimerización en tanque o cuba (SLA-DLP-CDLP)
- Proyección de material (MJ-NPJ-DOD)
- Proyección de aglutinante (Binder Jetting)
- Fusión de lecho de polvo (SLS-EBM-MJF-SLM-DMLS)
- Extrusión de material (FDM)
- Deposición de energía focalizada (LENS-EBAM)
- Laminado de hojas (LOM) [15]

### **2.2.1 IMPRESIÓN 3D METÁLICA**

Beneficiarse de las ventajas que la optimización topológica o el diseño generativo nos brindan no es igual para cualquier material con el que se quiera fabricar el elemento que se quiere obtener. En el caso de aquellas piezas que se tienen que elaborar con metales, debido a sus exigencias o condiciones de contorno, la impresión 3D metálica ofrece una alternativa variable frente a los métodos convencionales como el mecanizado o moldeo, los cuales son los más habituales cuando se quiere trabajar con metales en la industria.

Hay industrias como la aeroespacial, médica o automoción donde la fabricación aditiva metálica supone una revolución para sectores que demandan en estructuras complejas: rapidez, personalización y precisión. Aunque sigue limitada en grandes volúmenes y presenta desafíos en coste y acabado. Pero se ha convertido en una pieza clave en la industria a demanda gracias a su ahorro de tiempo y material. A medida que evolucione tecnológicamente, veremos una adaptación más amplia y su potencial muy desarrollado.

### ***2.2.1.1 DIRECT METAL LASER SINTERING (DMLS)***

El DMLS se emplea para fabricar piezas metálicas. Se utiliza un rayo láser de fibra de alta potencia que traza la sección transversal de cada capa y funde las partículas metálicas. Las máquinas modernas funden completamente el polvo metálico durante el proceso de impresión, lo que cre piezas mucho más resistentes. La nueva capa desciende para estar en contacto con la penúltima capa, la superior, para aplicarla energía y luego se realiza este proceso las veces que sean necesario.

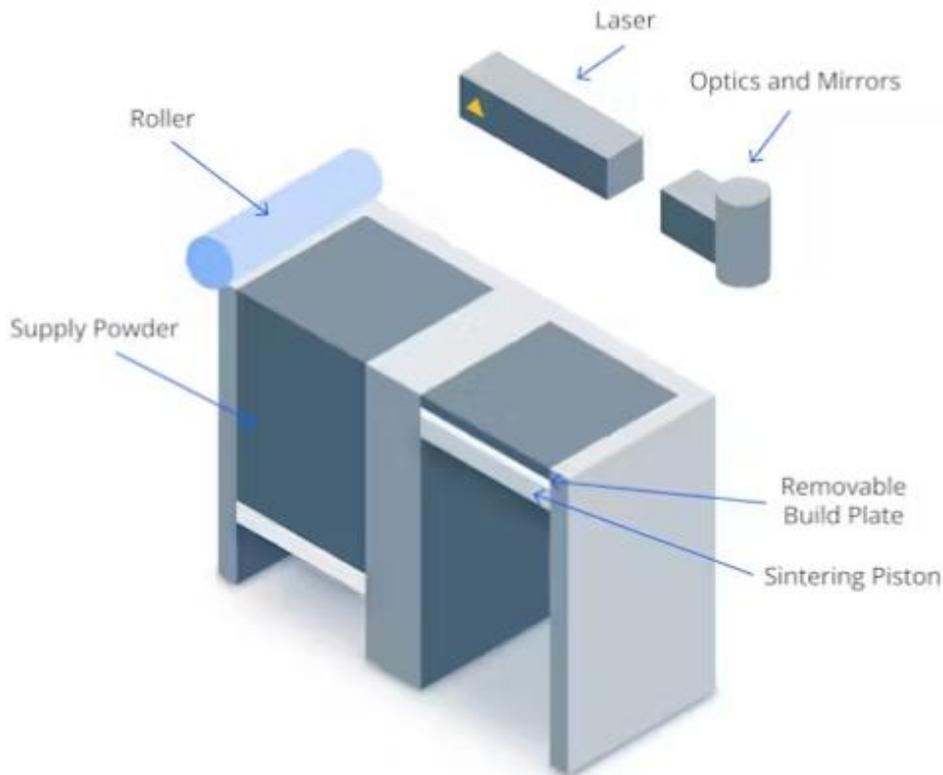


Ilustración 19. Esquema típico de una impresora DMLS (Fuente: De Naoum & Piccoli, 2024) [11]

Con este método de impresión se pueden conseguir piezas muy precisas y detalladas. Además, tiene una compatibilidad buena con una amplia cantidad de materiales. El mayor inconveniente de usar DMLS es el tiempo de espera para obtener los resultados, ya que al consumir poca energía y al emplear pocos láseres se convierte en un proceso muy lento.

Este método solo se puede emplear cuando se quiere trabajar con piezas metálicas de poco espesor, ya que la DMLS solo puede crear pequeños baños de fusión lo que hace imposible que se fabriquen piezas de gran tamaño con esta técnica.

“La fusión de metales por lecho de polvo láser es ideal para proyectos donde los equipos de ingeniería pueden diseñar para la impresión 3D de metal desde el inicio. Dado que los costos de la impresión de metal suelen ser más altos que los del CNC tradicional, por ejemplo, los

equipos deben utilizar las directrices DFM para aprovechar las ventajas de la impresión de metal desde el principio. La impresión de metal rara vez es una mirada al pasado en la fabricación de piezas existentes, sino una mirada al futuro para ver cómo la pieza puede mejorarse con la impresión. “(Mateo Schmidt, Ingeniero de soluciones sénior) [11]



Ilustración 20. Pieza de aluminio impresa con DMLS (*Servicios de Impresión 3D de Metales Online (DMLS) | Xometry Europe, 2025*) [12]

Características y atributos de la impresión 3D por el método de DMLS:

- Diámetro del punto laser: 40 micras (para máquinas más pequeñas).
- 4 láseres.
- No hay espesor de capa variable.
- Tiene propiedades de material isótropo y las piezas deben de enfriarse después de la fabricación.
- Las dimensiones máximas que puede tener la impresión son de 400x400x400 mm.
- Máquinas muy costosas.

- Se emplea para el desarrollo de implantes médicos.

### **2.2.1.2 LÁSER CLADDING**

El láser cladding es una técnica de producción aditiva para metales y mezclas cerámica-metal. Este método permite crear piezas en 3D, así como repararlas o realizar recubrimientos. Se puede emplear para piezas de avión, la fabricación de herramientas o moldes y para proteger los elementos de la corrosión. Se pueden imprimir estructuras gruesas y muy finas, lo que permite altas tasas de producción en comparación a los otros métodos de fabricación aditiva que hemos mencionado.

Se puede emplear un abanico muy importante de materiales, incluso se pueden emplear diferentes polvos al mismo tiempo. Esto permite que piezas las cuales están compuestas por varios materiales y densidades puedan ser fabricadas en un solo proceso, sin la necesidad de ser soldadas.

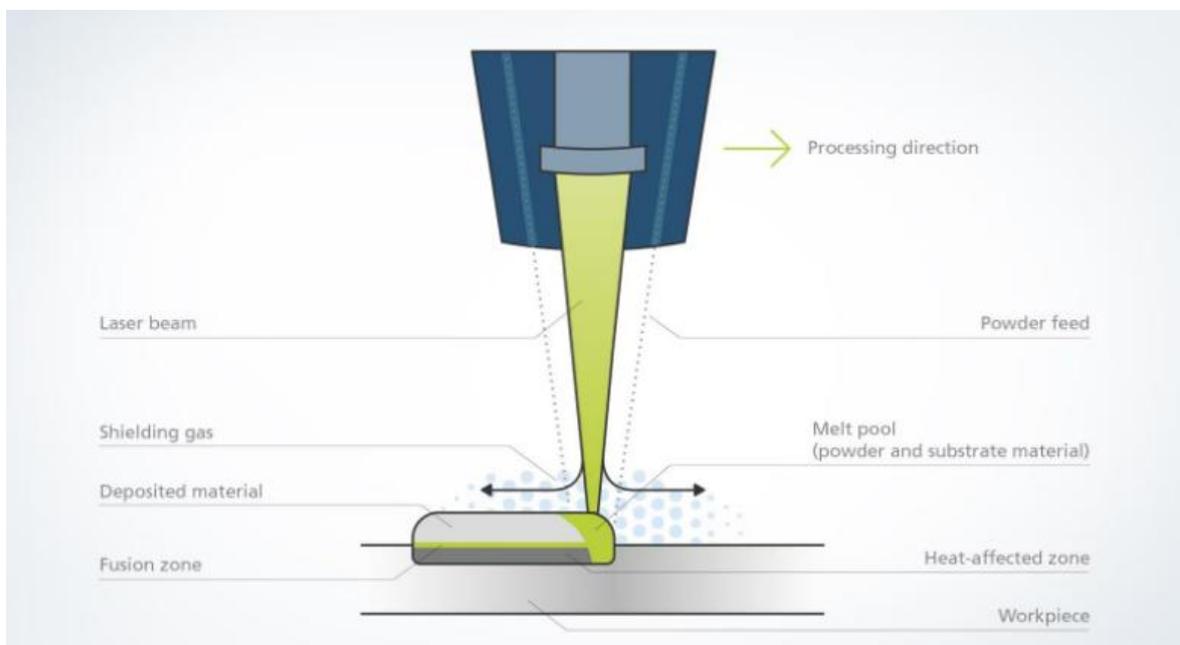


Ilustración 21. Esquema del Láser Cladding (Fuente: *Láser Cladding: Un Método Para Diferentes Aplicaciones*, s. f.) [13]

En el láser cladding convencional, un rayo láser calienta la pieza de trabajo de forma localizada y se genera un baño de fusión. Desde una boquilla se pulveriza polvo metálico fino directamente en el baño de fusión. Aquí se funde y combina con el material base. Se crea algo similar a las costuras de soldadura que dan lugar a estructuras. Si es necesario, se pueden apilar varias capas una encima de la otra. Para aplicar líneas, superficies y formas, la óptica para el procesado se desplaza controlada automáticamente sobre la pieza de trabajo.



Ilustración 22. Componentes impresos por el método Láser Cladding (Fuente: *Impresión 3D de Componentes Metálicos Mediante Láser Cladding En Hilo*, s. f.) [14]

Características y atributos de la impresión 3D por el método de Láser Cladding:

- Diámetro del punto de láser: 0,5-3 mm.
- 1 láser, en ocasiones se pueden encontrar cabezales múltiples.
- Se genera unión metalúrgica.

- Se podría trabajar con piezas superiores al metro de largo, no es lo habitual, pero no mucho más.
- Coste de la máquina alto.
- Se emplea para moldes, refuerzo de zonas críticas o reparación de componentes metálicos.
- No es muy frecuente que se emplea para la fabricación de piezas completas.

### ***2.3 PROCESOS COMPLEMENTARIOS DE CORTE EN FRÍO***

El conformado en frío se emplea en producciones de gran escala, especialmente para aquellas piezas de pequeño tamaño y que requieren una buena precisión dimensional. Se emplea en sectores como la automatización, construcción o la agricultura.

En la fabricación por corte frío hay unos procesos complementarios menos habituales, pero que sirven para el desarrollo de geometrías más complejas. Las cuales no podrían ser fabricadas por los procesos más clásicos del corte en frío. Algunos procesos complementarios son: el corte por chorro de agua, el oxicorte o el corte por láser.

#### **2.3.1 CORTE POR CHORRO DE AGUA**

El corte por chorro de agua es un proceso en el que se aumenta la presión del líquido, gracias a una bomba, y es llevado a través de un pequeño tubo. El agua se acelera al final del tubo, donde hay un orificio de dimensiones limitadas, creándose así un flujo supersónico el cual es capaz de erosionar el material con el que se está trabajando.

Está demandado en todas las aplicaciones en las que se esté trabajando con un material abrasivo o que no sea conveniente que esté en contacto con altas temperaturas. Otras ventajas del corte por chorro de agua son, la inexistencia de tensión residual ya que este proceso no emplea esfuerzos de corte. Se pueden reutilizar piezas de otros proyectos lo cual ayuda a que se reduzca el gasto en materias primas, lo que conlleva menor costo en la fabricación.



Ilustración 23. Ejemplo de corte por chorro de agua (Manufactures Cusell, 2022) [17]

Este procedimiento no sirve para cualquier espesor, el agua cuando avanza por el material, que está cortando, pierde velocidad y presión lo cual hace que no sea útil para piezas de gran espesor. El gasto de inversión inicial es muy costoso, la maquinaria con la que se trabaja es muy cara, ya que se necesita una mesa de corte, una bomba de gran tamaño, una tolva de provisión del abrasivo, conexión de agua, un depurador y un descalcificador. Otra desventaja sobre el corte por chorro de agua es el tiempo de producción, las máquinas no son rápidas, lo cual reduce su utilidad en procesos a gran escala.

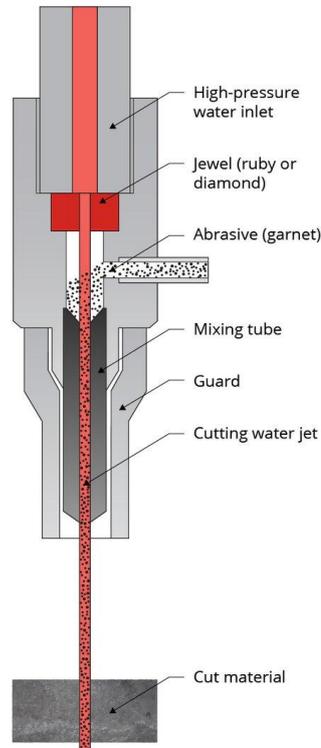


Ilustración 24. Corte por chorro de agua mejorado con abrasivo, grano de arena (Fuente: Quora, s.f.) [18]

El corte por chorro de agua pura no es capaz de trabajar con todos los materiales, corta materiales blandos. Si se añade un abrasivo en el proceso se pueden cortar materiales duros, como metales, materiales cerámicos o vidrio. En resumen, el corte por chorro de agua abrasivo es una técnica de corte versátil y precisa que ofrece numerosas ventajas sobre los métodos tradicionales de corte, especialmente en aplicaciones donde la precisión y las complejidades geométricas, el corte en frío y la ausencia de deformaciones son críticos.

### **2.3.1.1 ABRASIVO**

El abrasivo es un componente esencial, en el corte por chorro de agua, cuando se está trabajando con materiales duros como el acero, la cerámica o el titanio. Es un material granular sólido que se mezcla con el agua para aumentar su capacidad de corte, es un refuerzo

para que el corte de chorro de agua no se limite a simplemente cortar materiales blandos como la madera o la goma.



Ilustración 25. Granos de granate (Fuente: Watson, 2025) [27]

Entre los abrasivos más empleados podemos mencionar, el óxido de aluminio, la arena de sílice o la escoria de cobre. Pero el más común de todos es el granate, cuyo tamaño típico de grano es de 180 micrómetros, su gran uso se debe a que no posee componentes tóxicos y es parcialmente reciclable. Además, tiene una buena dureza, entre 7,5 y 8,5 en la escala de Mohs, lo que ayuda a su función principal, el corte.

### **2.3.2 CORTE POR OXICORTE**

El oxicorte es un proceso de corte térmico en el que se utiliza una mezcla de gases, normalmente oxígeno y un gas combustible, para generar una llama que calienta el material con el que se está trabajando. Cuando se calienta a la temperatura de ignición, se introduce

un chorro de oxígeno puro que reacciona con el metal caliente, provocando su oxidación rápida y formando óxidos, generando así el corte.

Este proceso está especialmente demandado en la industria metalúrgica, en la construcción naval y la fabricación de estructuras metálicas, ya que corta chapas de gran espesor, incluso de más de 300 mm. Entre sus ventajas, el equipo de oxicorte es relativamente económico y portátil, lo cual facilita su uso en trabajos de campo o en condiciones donde no se puede emplear maquinaria pesada. No necesita una fuente eléctrica compleja, lo que amplía sus posibilidades en entornos industriales.

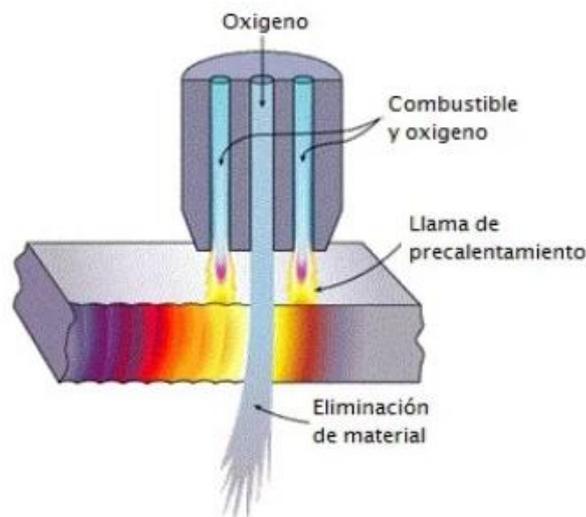


Ilustración 26. Esquema del proceso de Oxicorte (Fuente: *Oxicorte. Proceso y Productos - Gestión de Compras*, 2021) [19]

El oxicorte no es apto para cortar metales no ferrosos, como el aluminio o el acero inoxidable, ya que estos materiales no se oxidan de la misma forma que el acero al carbono. Además, la aplicación de calor genera deformaciones térmicas en el material, lo que puede

ser problemático en trabajos que requieren gran precisión o donde no se toleran tensiones internas.

En resumen, el oxicorte es una técnica de corte económica y robusta, ideal para materiales ferrosos de gran espesor y para entornos industriales exigentes, pero limitada en precisión y aplicabilidad a otros tipos de materiales.

### **2.3.3 CORTE POR LÁSER**

El corte por láser es un proceso de separación térmica que utiliza un haz de luz láser concentrado para fundir o quemar el material. Este láser se enfoca mediante lentes hacia un punto muy pequeño, lo que permite obtener una gran densidad de energía. El material se calienta de forma localizada, y se emplea un gas auxiliar para expulsar el material fundido, completando el corte.

Este proceso es ampliamente demandado en industrias como la automotriz, la aeronáutica, la electrónica, debido a su alta precisión y velocidad. Una de las principales ventajas del corte por láser es que se pueden realizar cortes complejos, incluso en piezas con geometrías detalladas, con una gran precisión. Se minimiza la deformación térmica, gracias a que el área afectada por el calor es muy pequeña. También es un proceso muy flexible, ya que puede trabajar con una amplia variedad de materiales como metales, plásticos, maderas, etc. Se introduce muy cómodamente en las líneas de producción gracias a que es un proceso automatizable.



Ilustración 27. Plancha cortada por Láser (Fuente: *Corte Por Láser - Dassault Systèmes*, 2023) [20]

El corte por láser no es bueno para materiales de gran espesor, ya que el rendimiento del láser disminuye a medida que aumenta el grosor. La inversión inicial es elevada, ya que las máquinas láser son costosas y requieren mantenimiento especializado.

En resumen, el corte por láser es una técnica de alta precisión y eficiencia que se adapta bien a entornos de producción exigentes y detallados. Es ideal para piezas delgadas y trabajos de alta calidad estética, aunque su coste y limitaciones en espesores y materiales deben ser considerados al elegir el método de corte adecuado.

## **2.4 MECANIZADO**

El mecanizado es el conjunto de operaciones con las que se obtiene la geometría deseada de una pieza. Se elimina material de una pieza inicial, con herramientas de corte. Las herramientas de corte más empleadas en la industria son: la sierra de corte, el torno, la fresadora, la taladradora o la rectificadora.

Un proceso de mecanizado se define como la sucesión ordenada de fases, subfases y operaciones para fabricar la pieza requerida.

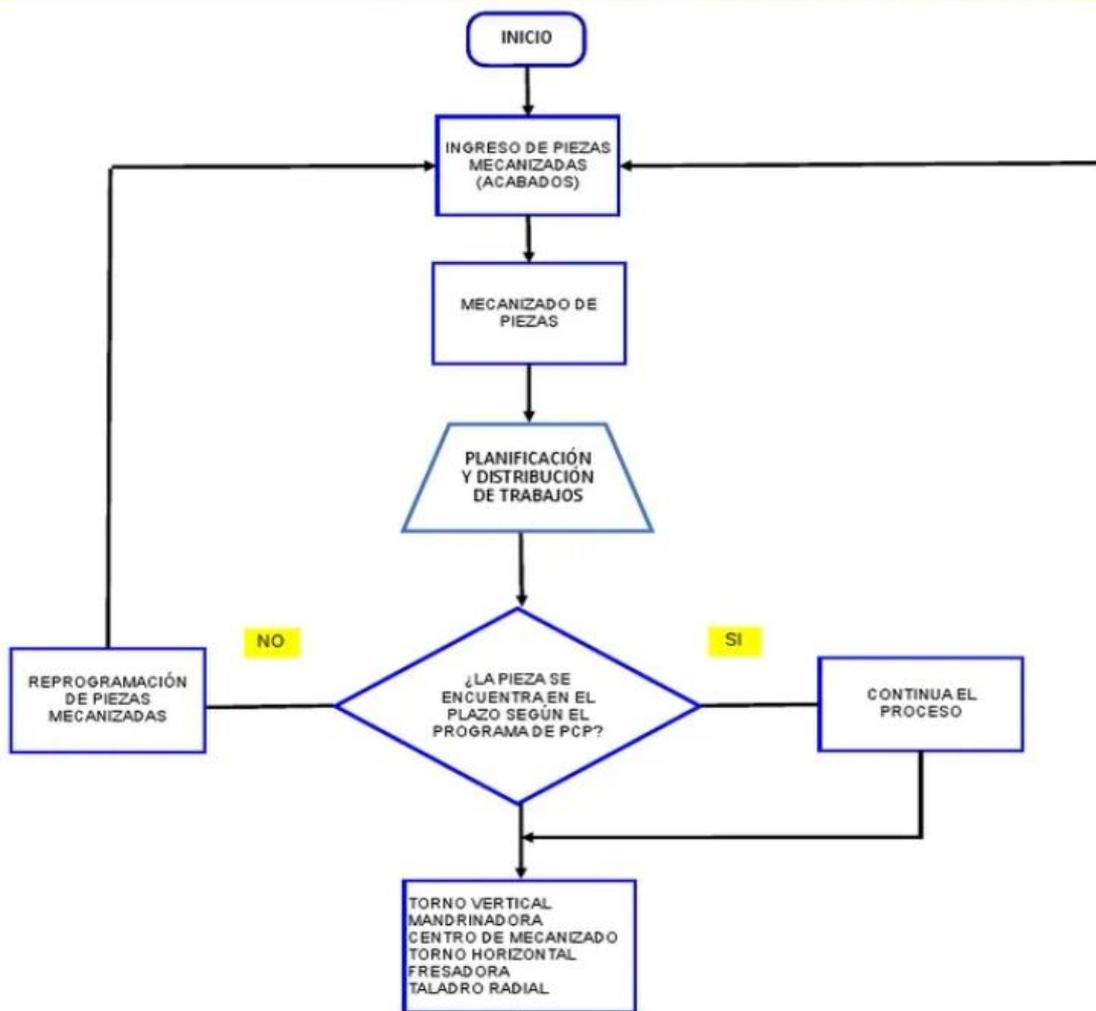


Ilustración 28. Ejemplo de diagrama de Flujo, proceso de mecanizado de piezas (Fuente: DarwinA.Milla, s. f.) [22]

El mecanizado posee una gran precisión dimensional y geométrica, así como buen acabado superficial. Con las distintas máquinas de mecanizado se puede fabricar piezas tanto simples como complejas, además de que se puede introducir perfectamente en líneas de fabricación a pequeña y gran escala.

El mecanizado es fundamental en un gran número de sectores industriales. Algunos ejemplos con: aeronáutica, automotriz, energía o electrónica. Esto se a que el mecanizado puede adaptarse a un amplio rango de tamaños de piezas y al gran abanico de materiales con los que las máquinas pueden trabajar.



Ilustración 29. Pieza siendo mecanizada por una fresadora (Fuente: Aceromafe, 2025) [23]

Entre los problemas del mecanizado se encuentra el desperdicio de material, al retirar virutas se pierde material que en ocasiones no se puede reutilizar. No es un proceso tan rápido como el de fundición lo cual puede ser un problema en lotes de gran tamaño, en estos lotes grandes los precios pueden ser elevados debido al tiempo, al desgaste de las herramientas y al consumo energético. Por último, el mecanizado no trabaja de forma fácil cuando se trata de cavidades internas, ya que en muchos casos la herramienta no es capaz de llegar a esas zonas de difícil acceso.

Entre las fases del mecanizado debemos hablar del desbaste, es cuando se quita mayor cantidad de material. El acabado, mejora de la precisión dimensional de la pieza, y la ultraprecisión, esta fase se realiza cuando las piezas requieren una alta resolución, como en la óptica o la medicina.

### 2.4.1 TORNEADO

El torneado es un proceso de mecanizado que consiste en hacer girar la pieza con la que se va a trabajar mientras una herramienta de corte elimina material de la superficie o del interior. Es útil para la producción de piezas cilíndricas, como ejes. Con el torno se obtienen tolerancias buenas y acabados superficiales de calidad.



Ilustración 30. Pieza siendo mecanizada por un torno (Fuente: Umesal, 2024) [24]

En los tornos hay un segundo movimiento el cual es el avance de la herramienta. Estas deben de tener una resistencia al desgaste y una buena tenacidad, suelen estar fabricadas de metales duros o cerámicos, dependiendo del material que van a cortar.

Entre las operaciones que realizan los tornos hay tres grupos: Exterior (cilindrado, roscado, ranurado, copiado y perfilado), interior (cilindrado, roscado, ranurado) y auxiliares (moleteado, tronzado). Los tornos pueden ser horizontales o verticales, así como otros tipos como los revólveres, copiadores o automáticos.

### **2.4.2 FRESADO**

El fresado es un proceso de mecanizado que consiste en hacer girar una herramienta de corte mientras la pieza a mecanizar se desplaza con un movimiento de avance. Permite eliminar material para obtener superficies planas, prismáticas o de geometría más compleja. Es especialmente útil en la fabricación de componentes con caras planas, ranuras o cavidades.

El movimiento principal es la rotación de la herramienta, y el movimiento secundario es el avance de la pieza, que puede realizarse en varias direcciones. Las herramientas deben tener alta resistencia al desgaste y buena tenacidad, y suelen estar fabricadas de metal duro o incluso cerámicos, dependiendo del material que se mecaniza y del tipo de operación.

## **PARTES DE UNA FRESADORA**

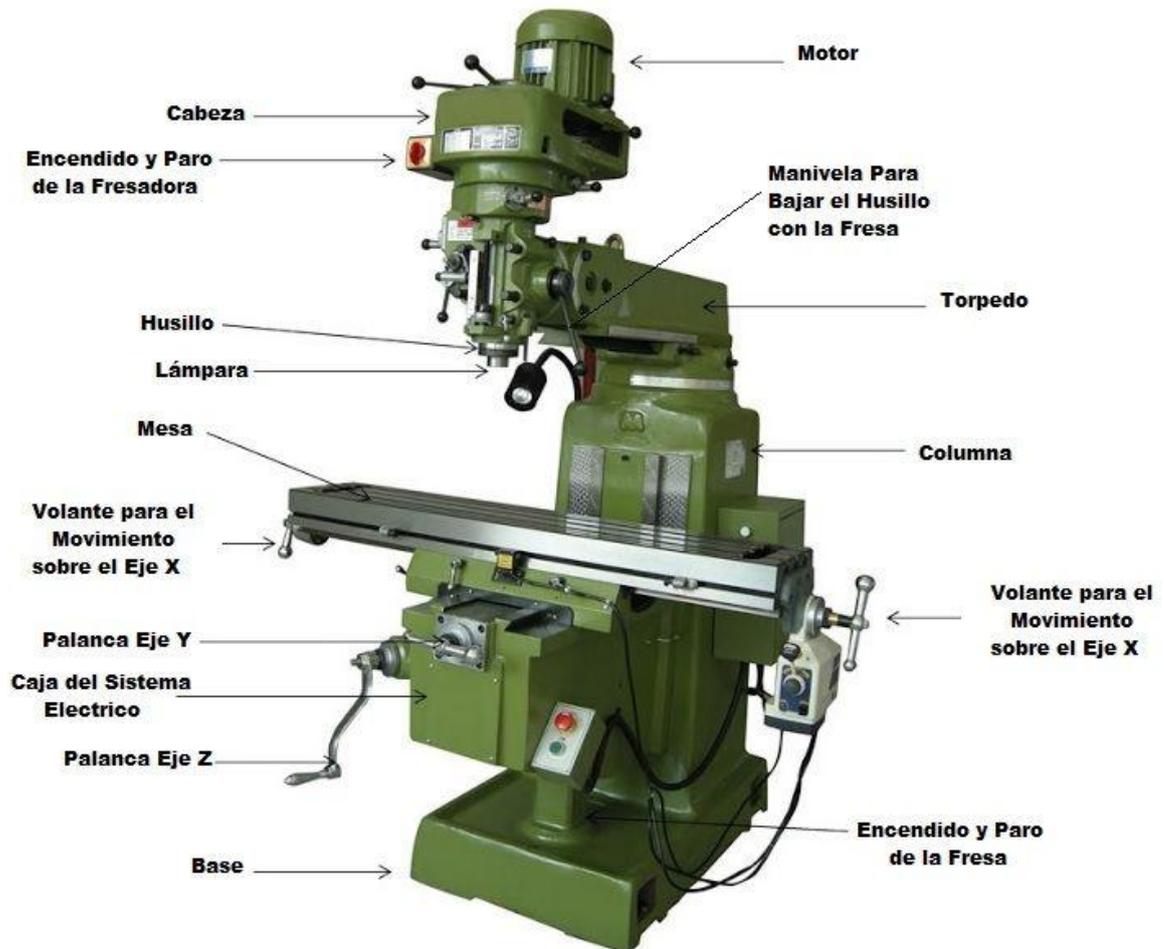


Ilustración 31. Partes de una fresadora (Fuente: Admin, 2024) [25]

Las operaciones de fresado se pueden clasificar en distintos tipos, siendo las más comunes: fresado tangencial, fresado frontal, fresado de ranuras, cavidades o perfiles, y mandrinado y taladrado. Las fresadoras pueden ser de varios tipos: horizontales, verticales o universales. Incorporan accesorios como mesas giratorias, mordazas, divisores o platos magnéticos, que permiten sujetar la pieza con firmeza.

### 2.4.3 TALADRADO

El taladrado es un proceso de mecanizado que consiste en realizar agujeros en una pieza mediante una herramienta de corte llamada broca, que gira sobre su propio eje mientras avanza en sentido axial.

En el taladrado, el movimiento principal es la rotación de la herramienta, mientras que el movimiento de avance se produce en línea recta, generalmente en dirección vertical. Las brocas utilizadas deben tener una alta dureza y resistencia al desgaste. Pueden estar hechas de acero rápido (HSS) o metal duro. Las operaciones que pueden realizarse con una taladradora no se limitan al simple taladrado. También incluyen: avellanado, rebajado, roscado o mandrinado.

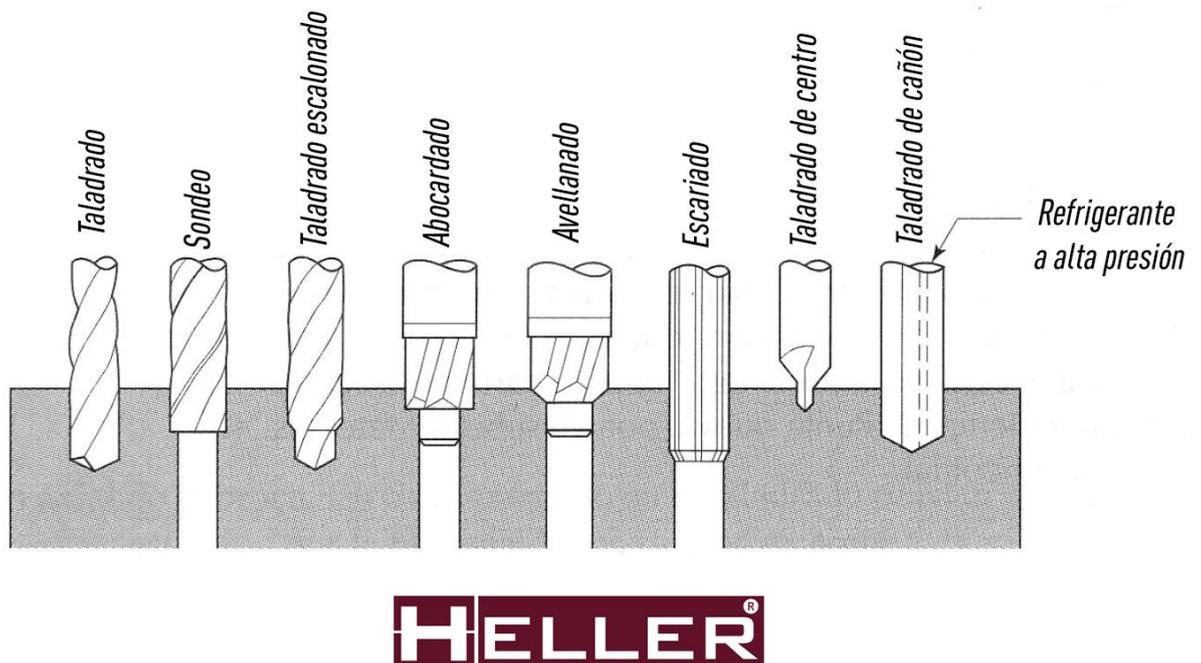


Ilustración 32. Operaciones de taladrado industrial (Fuente: Saviour, 2025) [26]

Existen distintos tipos de taladradoras, como las de columna, radiales, de cabezal múltiple o taladradoras automáticas. La sujeción de la pieza puede hacerse mediante mordazas, mesas, plantillas o sistemas de fijación rápida, garantizando estabilidad durante el proceso.

El taladrado se emplea en una gran variedad de sectores, desde la fabricación de piezas mecánicas hasta estructuras metálicas o moldes, por su rapidez, simplicidad y eficiencia.

## Capítulo 3. METODOLOGÍA

### 3.1 PROPUESTA DE ESTUDIO

Se optimizará topológicamente las barras principales de los brazos de una plataforma de elevación de carga, siguiendo un diagrama de flujo de ciclo de diseño con criterios de optimización topológica. Finalmente se obtendrán unos prototipos mediante impresión 3D o fabricación aditiva.

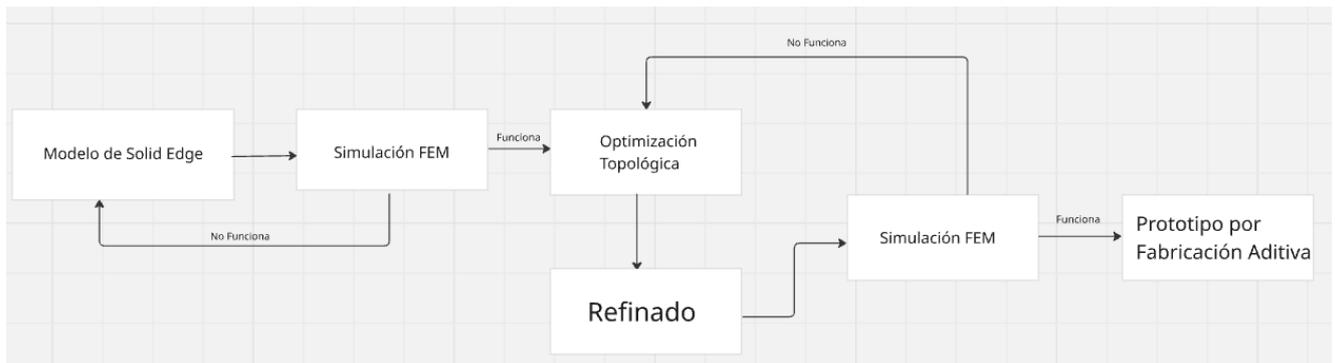


Ilustración 33. Diagrama de flujo del estudio

#### 3.1.1 GEOMETRÍA

La geometría de la barra ha seguido la observación de múltiples plataformas de elevación y el estudio de sus geometrías. Finalmente, tras tener en consideración varias características que se querían cumplir se llegó a un diseño original el cual sería simulado para ver si era adecuado para el estudio.

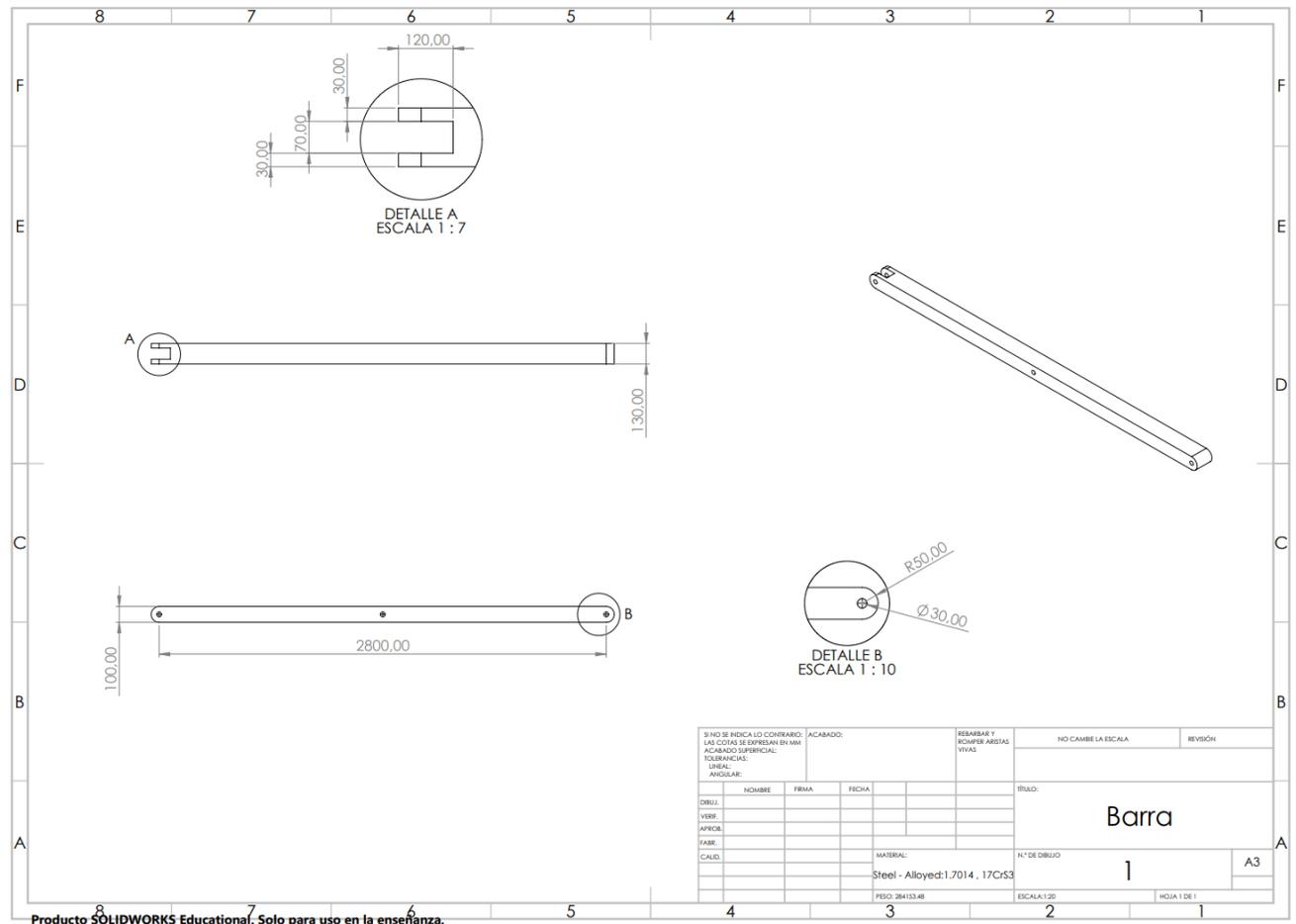


Ilustración 34. Plano de la barra para optimizar

### 3.1.2 MATERIAL

Para poder soportar grandes cargas como es el caso de un vehículo la estructura que eleve la masa debe de estar formado de materiales con propiedades mecánicas de alta resistencia. Debido a las características que se querían para la fabricación de las barras de la plataforma de elevación de carga, se planteó desde un principio elegir un acero para estas piezas. Los aceros tienen unas excelentes propiedades mecánicas y plásticas, así como resistencia a la corrosión o su competitivo precio.

Como estas barras van a estar en un entorno en el que puede haber golpes con elementos muy pesados y rígidos es importante que estas piezas combinen una gran dureza superficial y una buena tenacidad o gran resistencia al choque. Una plataforma de elevación va a estar realizando la misma función ininidad de veces a lo largo de su vida útil, de ahí que sus piezas deban de estar pensadas para la fatiga y que no se produzca ninguna rotura debido a ella.

## Aceros de cementación

MARCA	DESIGNACIÓN		NORMA VIGENTE	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Otros	NORMAS NACIONALES			
	SIMBÓLICA	NUMÉRICA									UNE	AFNOR	DIN	AISI/SAE
TKMI 17C3	17Cr3	1.7016	EN 10084	0,17	-	0,75	0,85	-	-	-	-	18 C 3	17Cr3	5015 / 5115
TKMI 16MC5	16MnCr5	1.7131	EN 10084	0,16	-	1,15	0,95	-	-	-	F 1516	16 MC 4	16MnCr5	5115
TKMI 16MCS5	16MnCrS5	1.7139	EN 10084	0,16	-	1,15	0,95	-	-	S 0,030	F 1516 / F 1517	-	16MnCrS5	5115
TKMI 20MC5	20MnCr5	1.7147	EN 10084	0,20	-	1,25	1,15	-	-	-	F 150 D	20 MC 5	20MnCr5	5120
TKMI 20NCD2-2	20NiCrMo2-2	1.6523	EN 10084	0,20	-	0,80	0,55	0,20	0,55	-	-	-	21NiCrMo2	-
TKMI 20NCDS2-2	20NiCrMoS2-2	1.6526	EN 10084	0,20	-	0,80	0,55	0,20	0,55	S 0,030	F 1522	20 NCD 2	21NiCrMoS2	8620 / 8620 H
TKMI 15NC13	15NiCr13	1.5752	EN 10084	0,17	-	0,55	0,75	-	3,25	-	F 1540	15 NC 13	15NiCr13	4320 / 4320 H
TKMI 18CND7-6	18CrNiMo7-6	1.6587	EN 10084	0,18	-	0,70	1,65	0,30	1,55	-	-	18 NCD 6	17CrNiMo6	-
TKMI 18CDS4	18CrMoS4	1.7243	EN 10084	0,18	-	0,75	1,05	0,20	-	S 0,030	F 1550	-	18CrMoS4	-

Ilustración 35. Tipos de acero de cementación (Fuente: *Thyssenkrupp Materials Ibérica | Acero, Inoxidable y Aluminio, s. f.*) [21]

Según las características mencionadas con anterioridad, se focalizó la búsqueda en unos aceros específicos, los aceros de cementación. En función de los elementos de aleación, estos aceros se clasifican en tres grupos. El primero de ellos está formado por los aceros de cementación al carbono, estos poseen porcentajes de Si, Mn, P, S y O muy pequeños, se suelen utilizar para piezas de pequeño tamaño y de geometrías simples. En los aceros de cementación débilmente aleados, son el segundo grupo, el porcentaje total de Cr, Ni, Mo y Mn no alcanza el 3%. Además, se emplean para la fabricación de piezas de mediano tamaño. El último grupo se conoce como el de los aceros de cementación de alta aleación, su nombre se debe a que el porcentaje total elementos de aleación es superior al 3% lo que hace que su núcleo posea una gran resistencia.

Finalmente, se decidió trabajar con el Acero- DIN 17CrS3, el cual cumplía con los requisitos de la pieza y su entorno.

Propiedades	
Nombre de propiedad	Valor
Densidad	7800,000 kg/m <sup>3</sup>
Coefficiente de expansión térmica	0,0000 /C
Conductividad térmica	0,014 kW/m-C
Calor específico	440,000 J/kg-C
Módulo de elasticidad	210000,003 MPa
Coefficiente de Poisson	0,280
Límite elástico	450,594 MPa
Tensión de rotura	520,000 MPa
Elongación %	0,000

Ilustración 36. Propiedades físicas del Acero-DIN 17CrS3

### 3.1.3 FUERZAS Y REACCIONES

Las cargas que experimenta nuestra estructura serán el peso del coche en la parte superior de la plataforma y la fuerza que tiene que ejercer el pistón para poder subir o bajar el vehículo. Un coche de mediano tamaño pesa en torno a los 1400Kg, es decir, 14000N aproximadamente. Trabajaremos con esa masa en la situación crítica. Dicha situación se encuentra cuando el cilindro hidráulico está ejerciendo la fuerza máxima en los amarres del brazo interior.

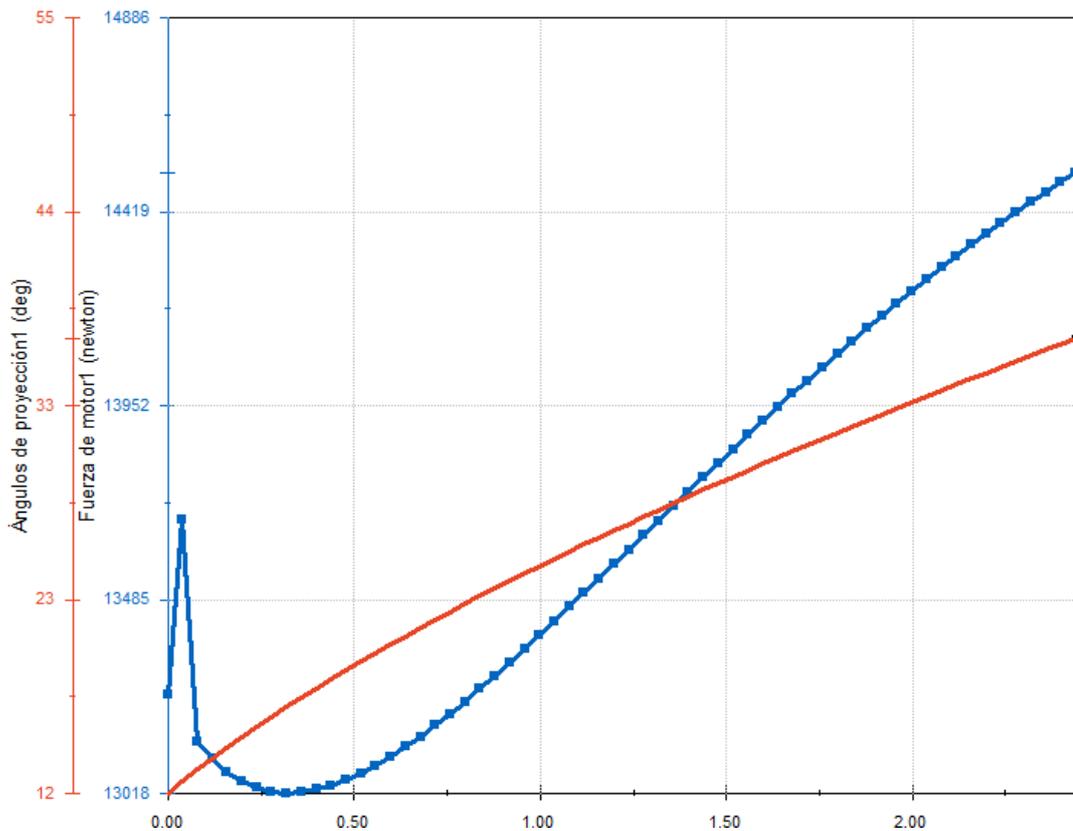


Ilustración 37. Curvas Fuerza motor-tiempo (Azul) y Ángulo brazo-tiempo (Roja)

Con los resultados anteriores, en los que se puede ver la fuerza que sufre el brazo según la altura de la plataforma con respecto al suelo, se puede observar que el cilindro hidráulico imprime una fuerza máxima en el momento que el pistón toca con el cilindro. En ese momento la plataforma no puede desplazarse más hacia arriba entonces el conjunto actúa como una estructura inmóvil.

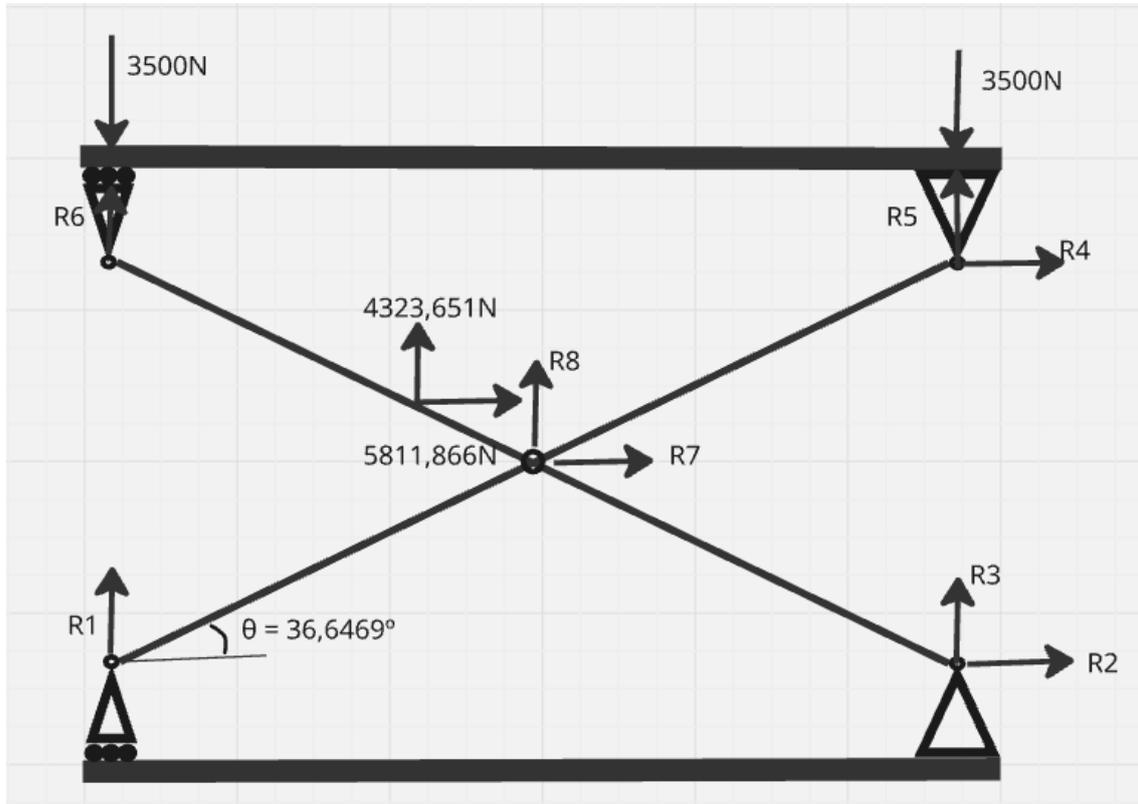


Ilustración 38. Plataforma/Estructura en 2D en su punto crítico

Se realizaron una serie de aproximaciones varias, considera que toda la fuerza que actuaba sobre los amarres se traslada completamente al cilindro que se encuentra en el centro de la barra. Se entiende que ambas barras sufren las mismas cargas lo que reduce el problema a la mitad. Se obtiene una estructura isostática con tres reacciones desconocidas.

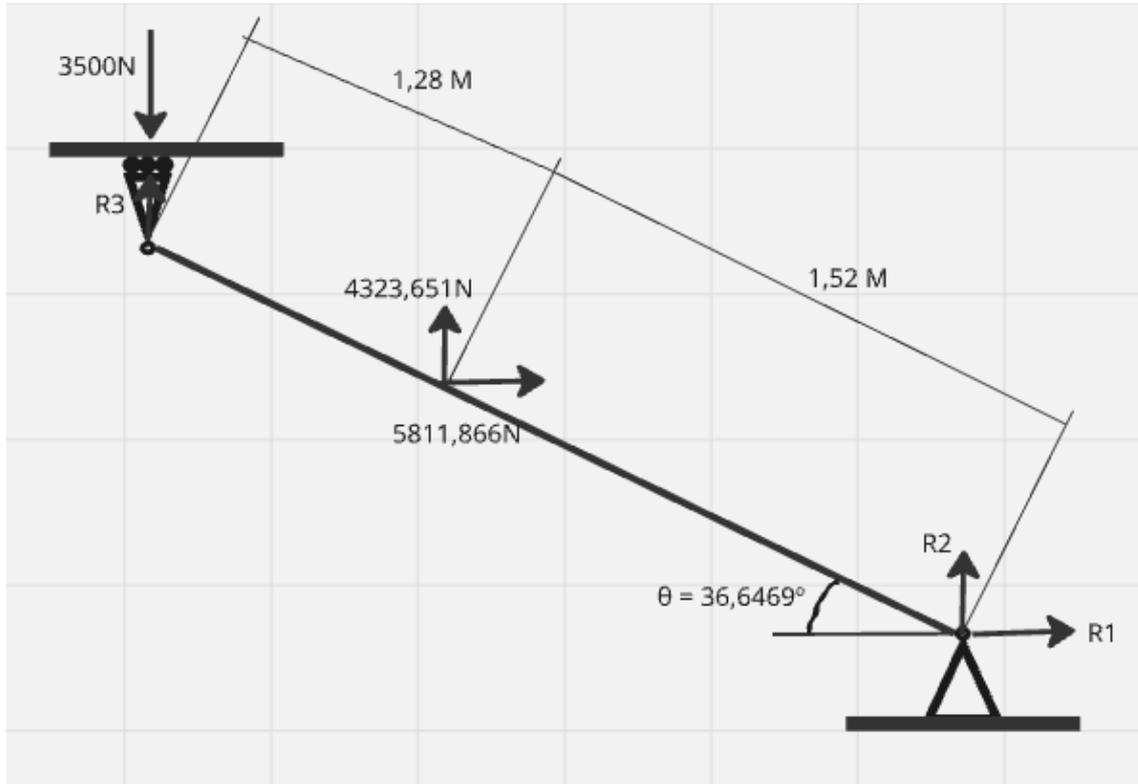


Ilustración 39. Plataforma/Estructura simplificada en 2D en su punto crítico

$$F_x = 5811,866 \text{ N}$$

$$F_y = 4323,651 \text{ N}$$

$$R_2 + R_3 - 3500 + F_y = 0$$

$$R_1 + F_x = 0$$

$$1,52 * R_2 * \cos \theta + 1,52 * R_1 * \sin \theta - (R_3 - 3500) * 1,28 * \cos \theta = 0$$

De las ecuaciones se obtuvieron los siguientes resultados para las reacciones.

$$R_1 = -5811,856 \text{ N}$$

$$R_2 = 370,5986 \text{ N}$$

$$R3 = -1194,2496 N$$

## Capítulo 4. DESARROLLO DEL TRABAJO, IMPRESIÓN 3D

### 4.1 ENTORNO DE DISEÑO 3D

Como se ha indicado previamente, se va a trabajar con las barras de los brazos de una plataforma de elevación de carga. En esta parte del proyecto se explicará el paso a paso que se ha seguido, siguiendo claramente el diagrama de flujo propuesto

#### 4.1.1 DISEÑO

El diseño de toda la plataforma fue realizado de cero, sin copiar ningún conjunto de planos que se pudieran encontrar. Estos planos ayudaron a seguir una lógica para el diseño de las piezas del ensamblaje.

En el caso de las barras que se estudian, tuvieron que ser apartadas de los brazos, debido a que en el diseño original estaba el brazo como una única estructura rígida. Esto no interesaba para el objetivo del proyecto.

Para comenzar el diseño de las barras, se ha de crear una única pieza. No hace falta diseñar las cuatro barras de forma independiente ya que todas tienen las mismas dimensiones. Con respecto a las cargas que experimenta cada una de ellas, hemos tomado la barra con situación más crítica. Como el resto de barras sufren menos tensión, nos aseguramos que si tienen el mismo rediseño que la anterior seguirán cumpliendo con su función sin deformarse.

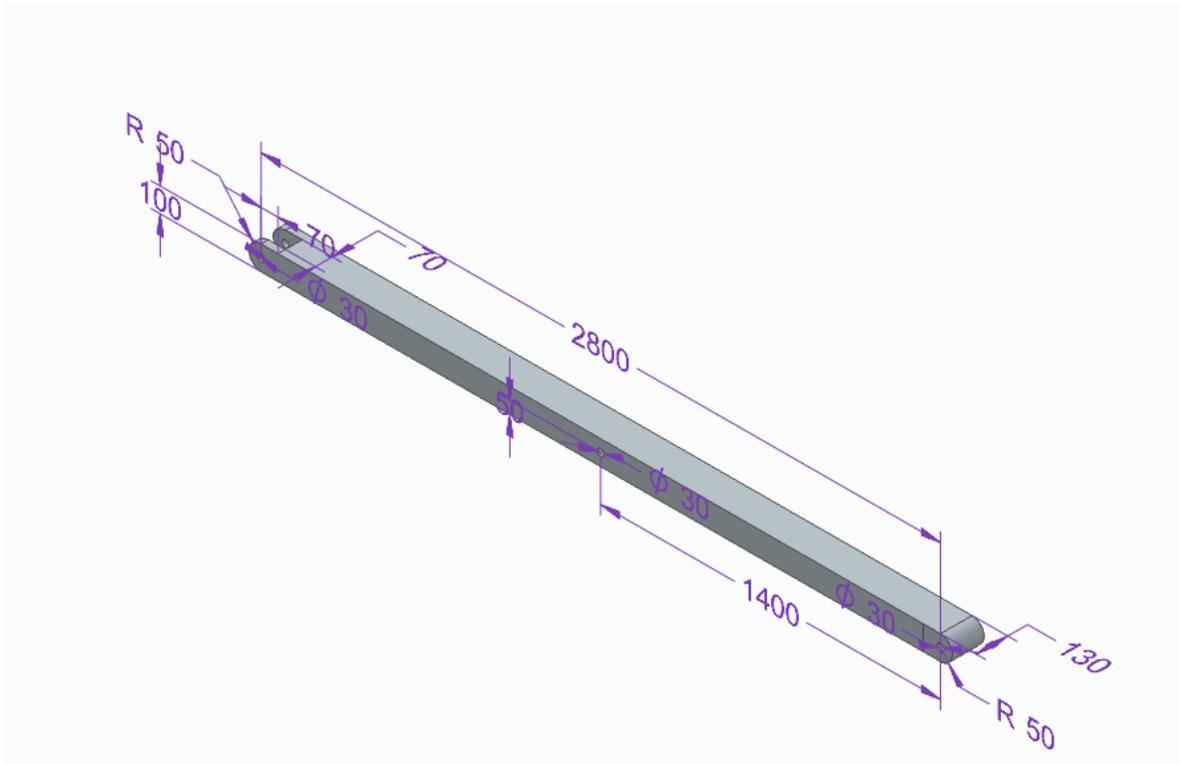


Ilustración 40. Barra de la plataforma

#### **4.1.2 MATERIAL DE LA BARRA**

Según lo mencionado en la propuesta de estudio, la barra va a ser fabricada con el Acero – DIN 17CrS3. Para todas las simulaciones que se realizarán a lo largo del proyecto se va a utilizar el acero mencionado. En la aplicación de Solid Edge ya está incluido en la lista de materiales, que nos es proporcionada.

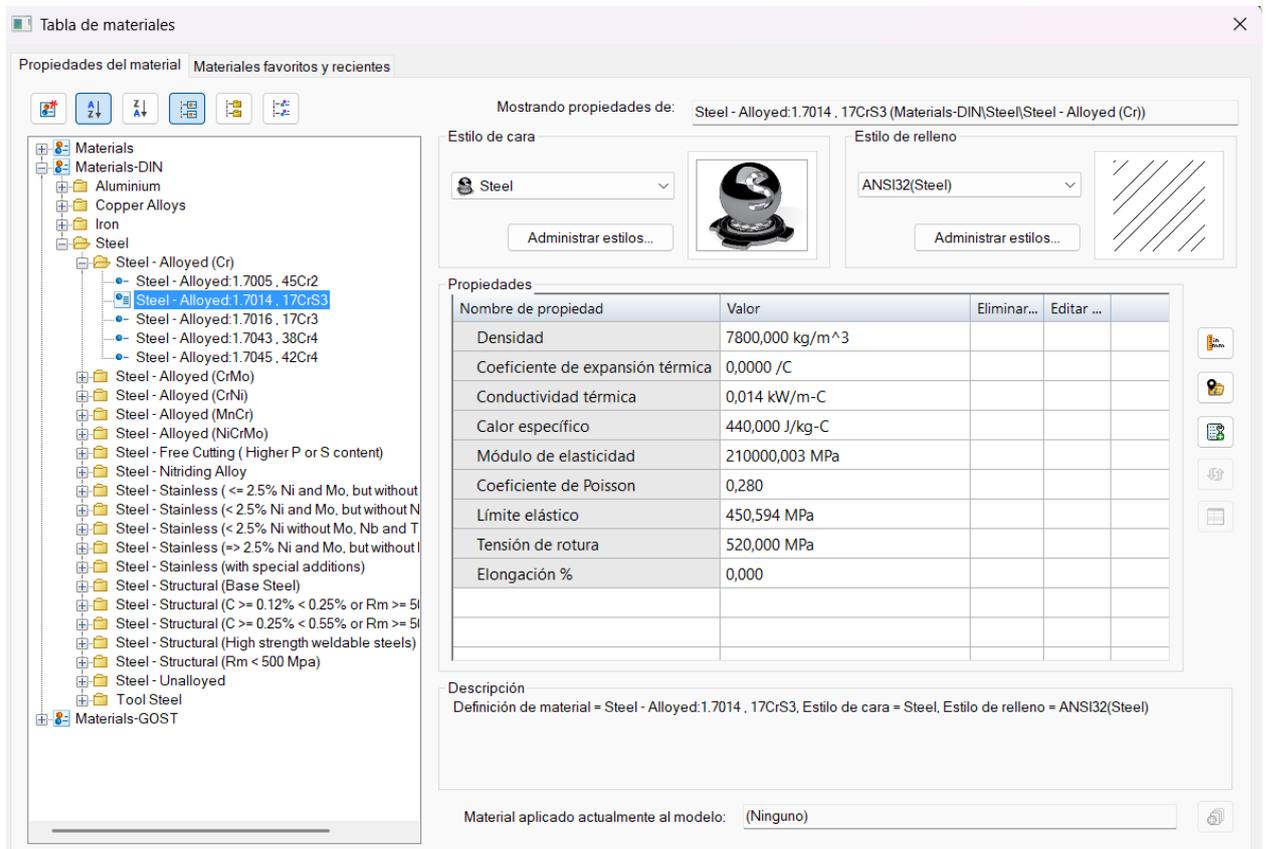


Ilustración 41. Acero DIN 17CrS3 en la tabla de materiales de Solid Edge

### 4.1.3 RESTRICCIONES Y FUERZAS

Para las simulaciones se ha de añadir las cargas que sufre la pieza, las cuales han sido calculadas previamente. Además, hay que poner cualquier tipo de restricción de movimiento si alguna superficie de la pieza lo requiere.

Para comenzar se aplicó una restricción articulada en la cara cilíndrica donde se amarra la barra a la base de la plataforma, se fijan los tres grados de libertad traslacional permaniendo libres los grados de libertad rotacional.

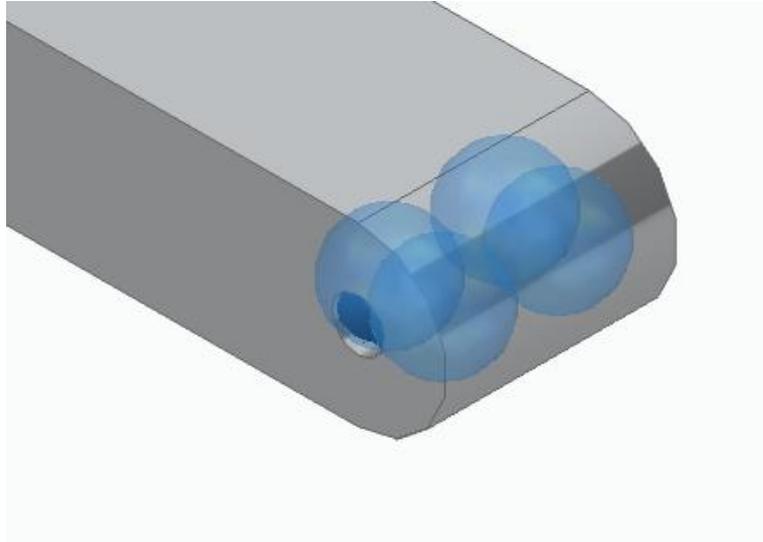


Ilustración 42. Cara articulada de la barra

Luego se añaden las cargas que experimenta la barra. Cada fuerza con sus respectivas dimensiones y direcciones, y en la cara que están actuando. En el estudio se tienen tres fuerzas, cada una de ellas actúa en uno de cilindros con base de 30 mm de diámetro.

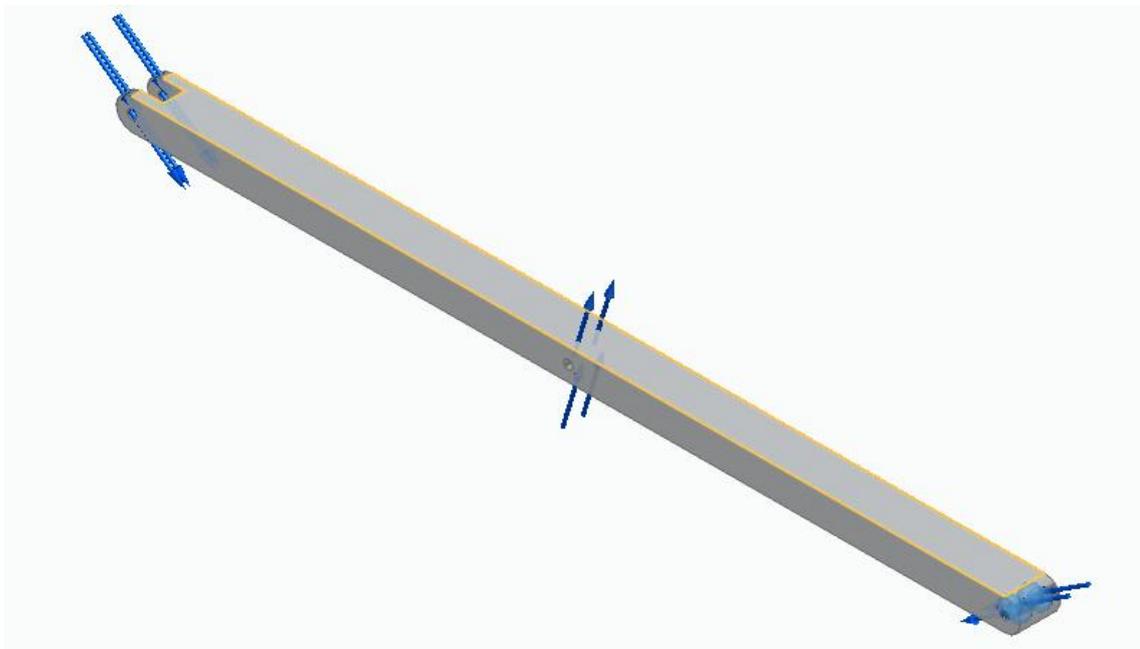


Ilustración 43. Fuerzas que experimenta la barra

#### 4.1.4 MALLADO

El mallado en un análisis de elementos finitos (FEM) es el proceso de dividir una pieza en elementos más pequeños, suelen ser triángulos, conectados por nodos. Este proceso es crucial para la precisión y eficiencia de la simulación, ya que el software utiliza estos elementos para aproximar el comportamiento físico de la pieza.



Ilustración 44. Barra mallada

Como el tamaño de nuestra barra es muy grande no hará falta realizar un mallado fino, ya que este se suele aplicar en piezas más pequeñas o en partes particulares de algunas piezas las cuales necesitan una mayor precisión, debido a su complejidad geométrica.

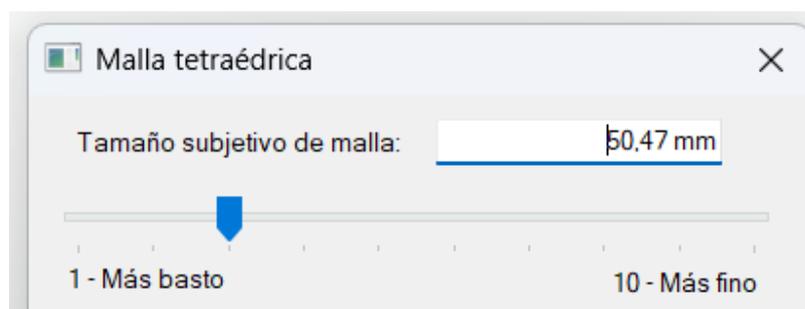


Ilustración 45. Propiedades de la malla empleada en la barra

## 4.2 SIMULACIÓN DEL DISEÑO

Para ver si se tiene que volver a diseñar las barras se hace una primera simulación la cual dirá si el diseño original es conveniente para esta estructura particular o si se tiene que hacer un rediseño en el que se refuercen zonas o se cambie la geometría de la barra.

En esta simulación se establecieron todas las características que se han mencionado antes, material, mallado, restricciones y cargas.

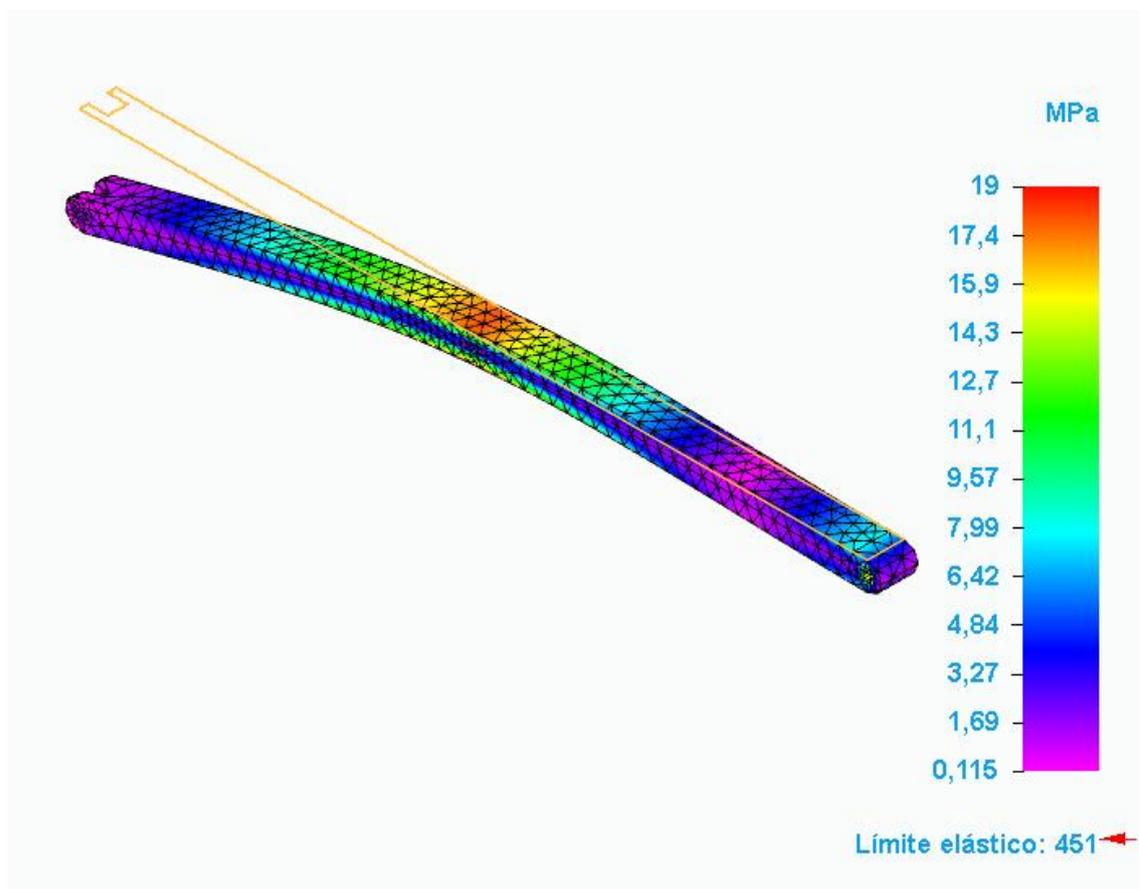


Ilustración 46. Resultado de la tensión de Von Mises en la simulación original

Como se puede ver en los resultados anteriores, la tensión máxima que experimenta la barra es muy inferior al límite elástico del material. Con esto podemos asegurarnos que se puede

quitar una gran cantidad de masa de la barra. En esta simulación también se puede ver el desplazamiento de cada zona de la pieza, esto ayuda a ver el comportamiento de la barra en estas condiciones.

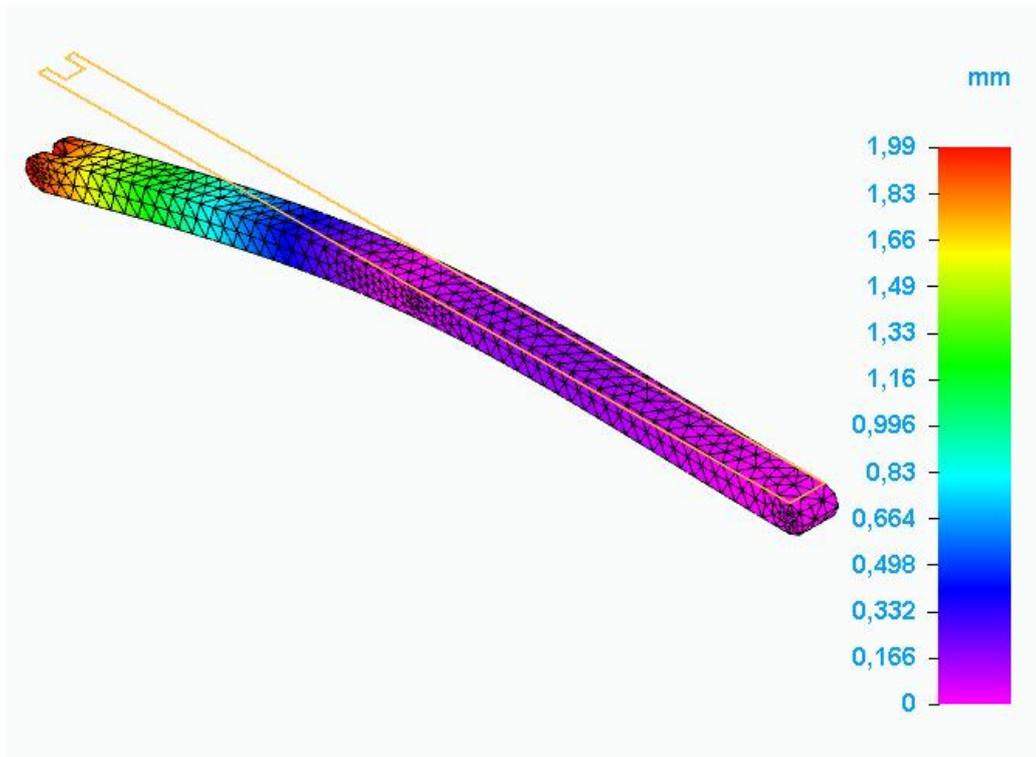


Ilustración 47. Resultado del desplazamiento simulación original

Visto esto podemos empezar a realizar las iteraciones para buscar la mejor optimización topológica.

### ***4.3 ITERACIONES***

En las distintas iteraciones que se realizaron en el proyecto se siguió el siguiente camino. En primer lugar, se introdujeron las siguientes características mencionadas antes, material, restricciones y cargas. En estos estudios de diseño generativo es conveniente que se reserven regiones las cuales no van a ser optimizadas topológicamente, ya sea porque esas zonas van a estar en contacto con otras piezas o por protección.

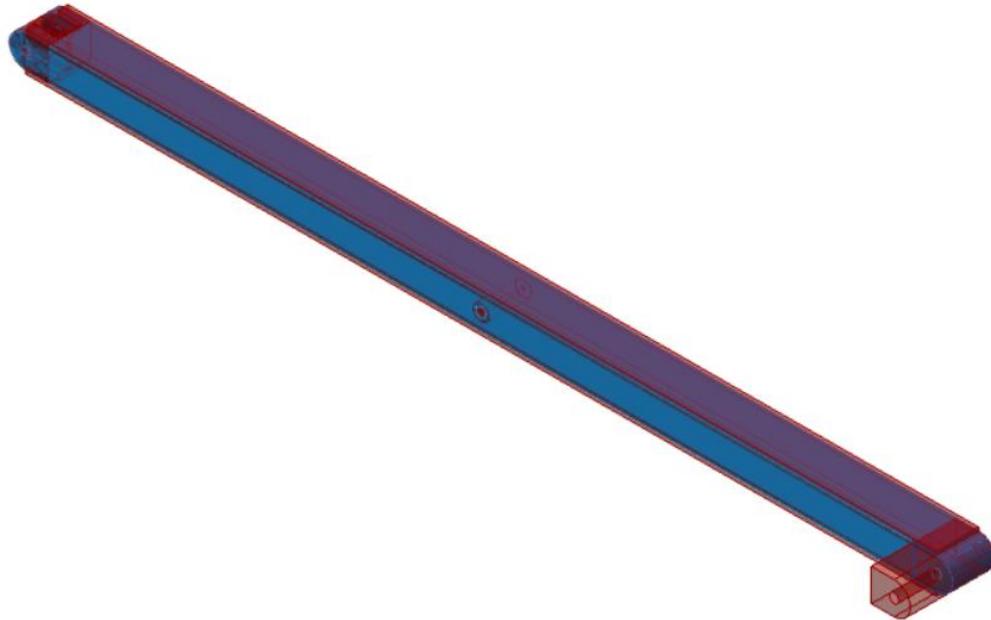


Ilustración 48. Regiones de la barra que se quieren preservar para las distintas iteraciones

En el caso de la barra se quieren preservar aquellas regiones con agujeros, en este caso tres, y también la cara superior e inferior, así como las regiones cercanas al amarre con la base y a la rueda. Estas zonas se protegen para asegurarse que la plataforma siga funcionando correctamente pese a la reducción de masa.

Después de poner todas las condiciones de contorno y restricciones, se obtendrá una solución con cierta reducción de masa la cual tendrá que ser refinada con el software Altair Inspire, y posteriormente ver si la barra optimizada no supera su límite elástico.

### **4.3.1 ITERACIÓN 1**

En esta primera iteración se quiere hacer una reducción de masa del 25%, lo cual haría que la pieza pasara a pesar 213,115Kg.

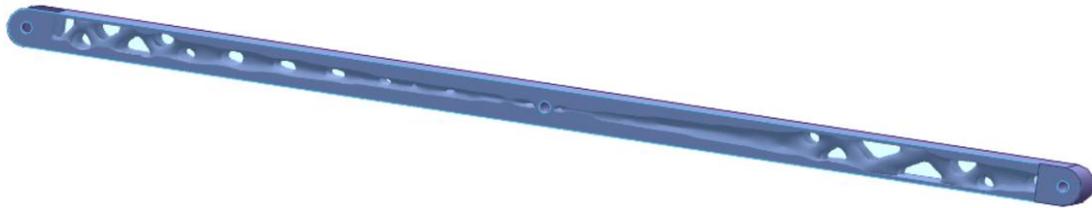


Ilustración 49. Barra con una reducción de masa del 25%

En ocasiones Solid Edge no te devuelve una solución exacta de lo que le has pedido y en este caso se ha reducido la masa del espacio de diseño en aproximadamente 27%, con una masa resultante de 206,952 Kg. Tras hacer el refinado y realizar la simulación con la nueva estructura interna de la pieza se comprobó que no se superaba el límite elástico, es decir, se puede hacer una reducción de masa superior.

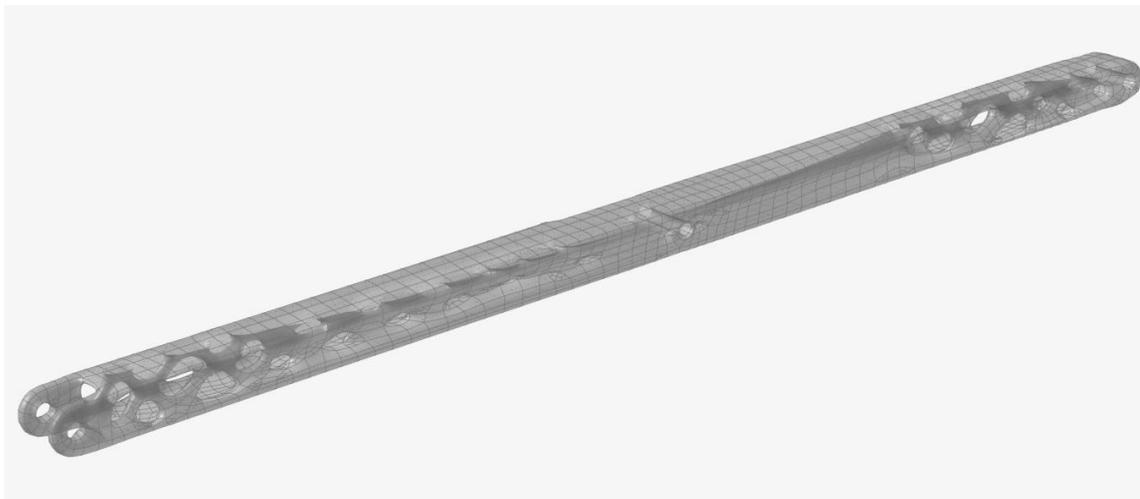


Ilustración 50. Barra refinada con una reducción de masa del 25%

### 4.3.2 ITERACIÓN 2

En esta primera iteración se quiere hacer una reducción de masa del 35%, lo cual haría que la pieza pasara a pesar 184,7Kg.



Ilustración 51. Barra con una reducción de masa del 35%

En ocasiones Solid Edge no te devuelve una solución exacta de lo que le has pedido y en este caso se ha reducido la masa del espacio de diseño en aproximadamente 37%, con una masa resultante de 178,582 Kg. Tras hacer el refinado y realizar la simulación con la nueva estructura interna de la pieza se comprobó que no se superaba el límite elástico, es decir, se puede hacer una reducción de masa superior.

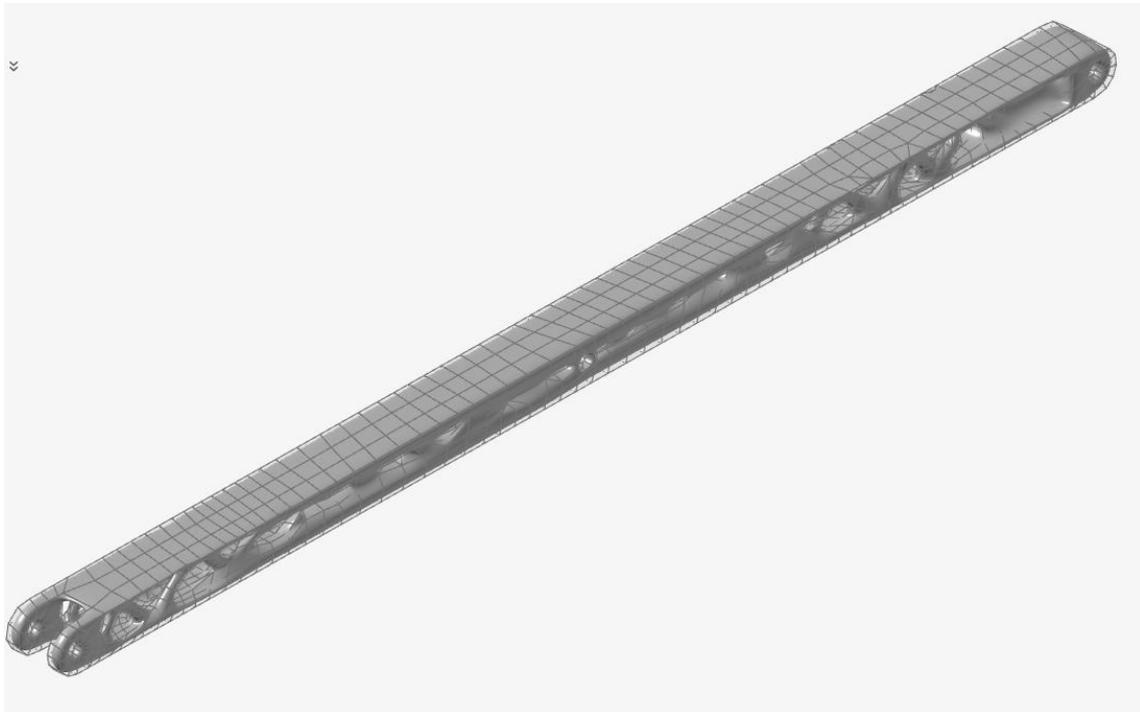


Ilustración 52. Barra refinada con una reducción de masa del 35%

### 4.3.3 ITERACIÓN 3

En esta primera iteración se quiere hacer una reducción de masa del 40%, lo cual haría que la pieza pasara a pesar 170,492Kg.



Ilustración 53. Barra con una reducción de masa del 40%

En ocasiones Solid Edge no te devuelve una solución exacta de lo que le has pedido y en este caso se ha reducido la masa del espacio de diseño en aproximadamente 42%, con una masa resultante de 164,672 Kg. Tras hacer el refinado y realizar la simulación con la nueva estructura interna de la pieza se comprobó que no se superaba el límite elástico, es decir, se puede hacer una reducción de masa superior.

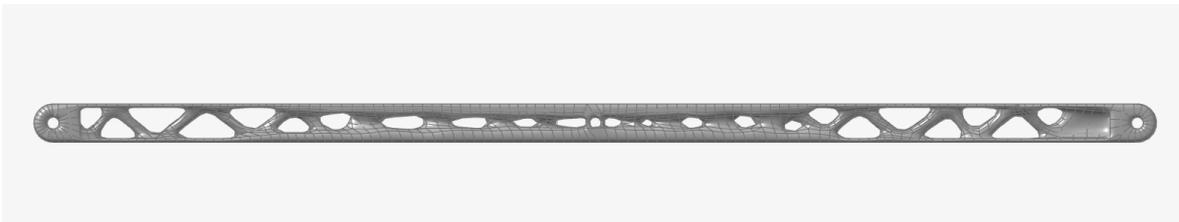


Ilustración 54. Barra refinada con una reducción de masa del 40%

#### 4.3.4 ITERACIÓN 4

En esta primera iteración se quiere hacer una reducción de masa del 45%, lo cual haría que la pieza pasara a pesar 156,284 Kg.



Ilustración 55. Barra con una reducción de masa del 45%

En ocasiones Solid Edge no te devuelve una solución exacta de lo que le has pedido y en este caso se ha reducido la masa del espacio de diseño en aproximadamente 46%, con una masa resultante de 153,812 Kg. Tras hacer el refinado y realizar la simulación con la nueva estructura interna de la pieza se comprobó que no se superaba el límite elástico, es decir, se puede hacer una reducción de masa superior.

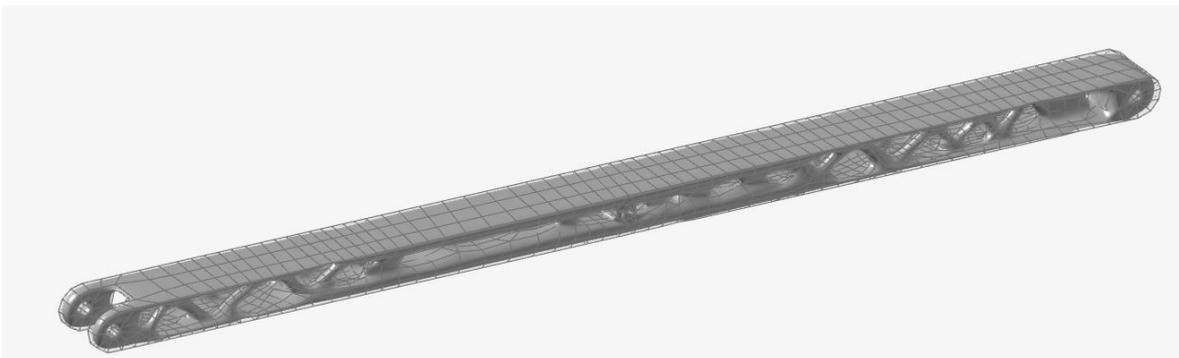


Ilustración 56. Barra refinada con una reducción de masa del 45%

### 4.3.5 ITERACIÓN 5

En esta primera iteración se quiere hacer una reducción de masa del 50%, lo cual haría que la pieza pasara a pesar 142,077 Kg. Para que se pudiera obtener una solución se tuvo que modificar los espesores de algunas regiones preservadas.



Ilustración 57. Barra con una reducción de masa del 50%

En ocasiones Solid Edge no te devuelve una solución exacta de lo que le has pedido y en este caso se ha reducido la masa del espacio de diseño en aproximadamente 52%, con una masa resultante de 135,483 Kg. Tras hacer el refinado y realizar la simulación con la nueva estructura interna de la pieza se comprobó que no se superaba el límite elástico, es decir, se puede hacer una reducción de masa superior.

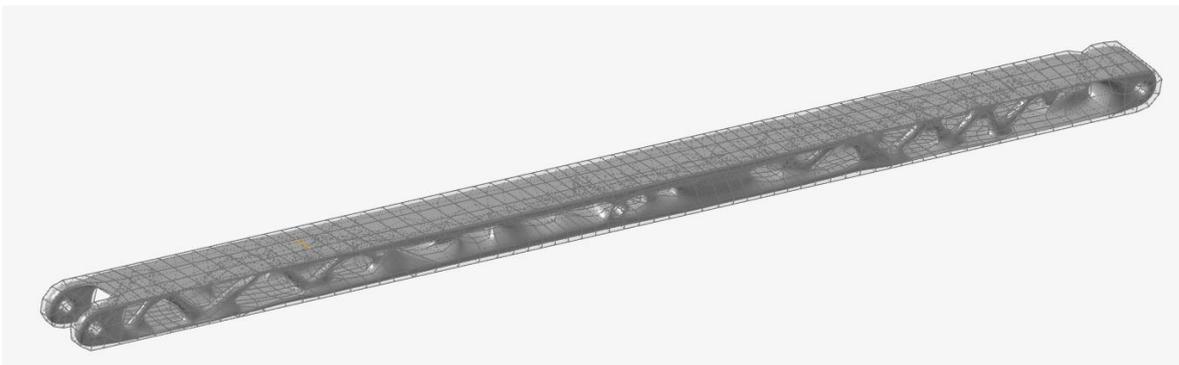


Ilustración 58. Barra refinada con una reducción de masa del 50%

### 4.3.6 ITERACIÓN 6

En esta primera iteración se quiere hacer una reducción de masa del 60%, lo cual haría que la pieza pasara a pesar 113,661 Kg. Para que se pudiera obtener una solución se tuvo que modificar los espesores de algunas regiones preservadas.



Ilustración 59. Barra con una reducción de masa del 60%

Tras hacer el refinado y realizar la simulación con la nueva estructura interna de la pieza se comprobó que no se superaba el límite elástico, es decir, se puede hacer una reducción de masa superior.

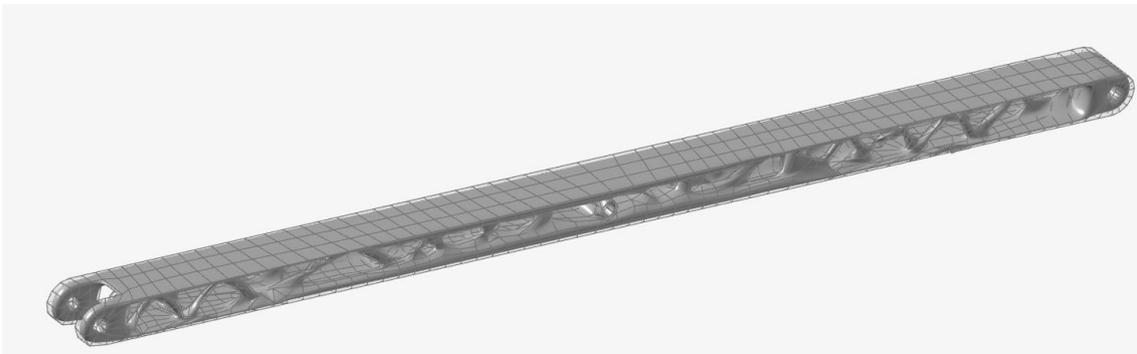


Ilustración 60. Barra refinada con una reducción de masa del 60%

## Capítulo 5. DESARROLLO DEL TRABAJO, OPTIMIZACIÓN DE FORMA

Debido a las enormes dimensiones que tiene la pieza, que se está estudiando, encontrar impresoras que puedan fabricar esta pieza es muy complicado. La mayoría de las impresoras 3D están pensadas para piezas de menor tamaño. Hay algunas empresas que trabajan con máquinas de gran escala las cuales son muy costosas y necesitan espacios muy grandes para poder trabajar, es el caso de Addere Additive Manufacturing o Sciaky Inc.

Para poder desarrollar estas barras ha decidido realizar una optimización de forma, la cual consiste en realizar cortes más sencillos en las piezas. Estas geometrías van a seguir el patrón que la optimización topológica ha dejado en la pieza original, pero sin tener esas estructuras tan complejas que caracterizan a la optimización topológica.



Ilustración 61. Patrón que sigue la optimización de forma

### 5.1 PROPUESTAS

Para cada propuesta que se realiza hay que hacer una comprobación de si ese rediseño es válido para las condiciones en las que la pieza va a trabajar. Para ello se realizará un FEM, con las mismas fuerzas con las que se ha trabajado en la optimización topológica, y se analizarán los resultados para ver si superará el límite elástico o no.

A continuación, se van a mostrar las distintas propuestas que se plantearon para la optimización de forma.

### 5.1.1 PROPUESTA 1

En esta propuesta se puede observar como la pieza ha sido rediseñada siguiendo el patrón marcado con anterioridad. La masa de la barra es de 193,77 Kg con la propuesta 1.



Ilustración 62. Barra con la propuesta 1 de la optimización de forma

Tras diseñar esta propuesta con Solid Edge se realiza una simulación FEM la cual muestra que la pieza puede soportar esas condiciones de contorno, y si se quisiera se podría rediseñar para ver si hubiera otra propuesta, con menos material/masa, que funcionara.

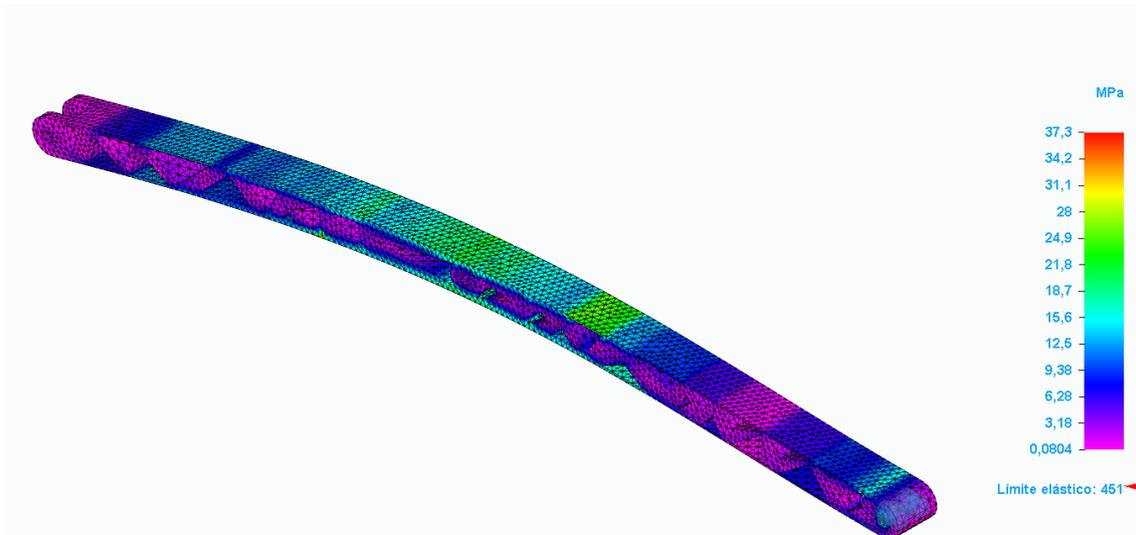


Ilustración 63. Resultado de la tensión de Von Mises en la propuesta 1

### 5.1.2 PROPUESTA 2

Como con la anterior propuesta se observó que el límite elástico del material era muy superior al máximo de la propuesta 1, se quiso realizar un vaciado total del interior de la pieza simplemente conservando aquellas regiones importantes. La masa de la barra es de 59,484 Kg con la propuesta 2.

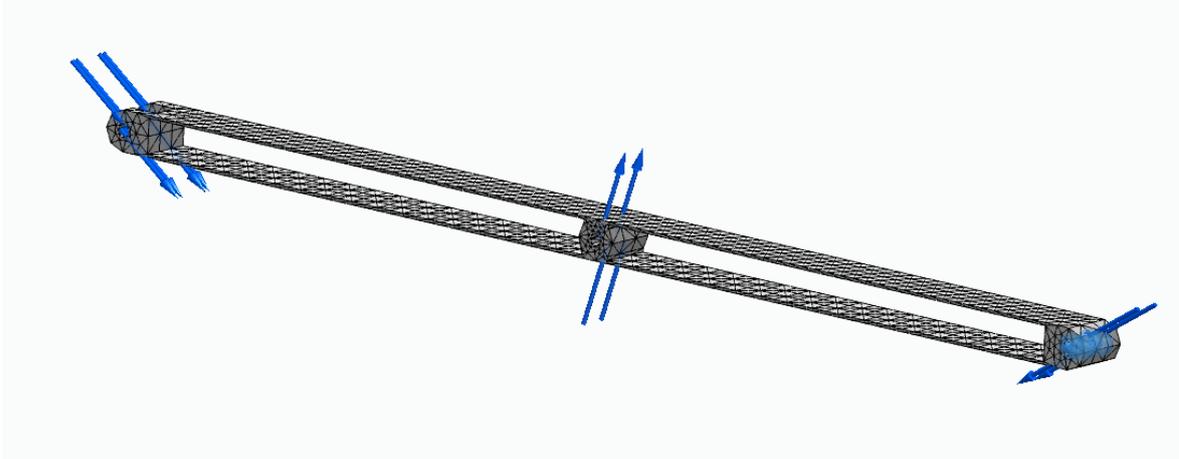


Ilustración 64. Barra con la propuesta 2 de la optimización de forma

Tras ello se realizó una simulación FEM la cual mostró que con esta configuración la pieza se deformaría permanentemente. En los resultados se puede ver como la pieza experimenta tensiones superiores a su límite elástico, lo que nos indica que esta configuración no es válida.

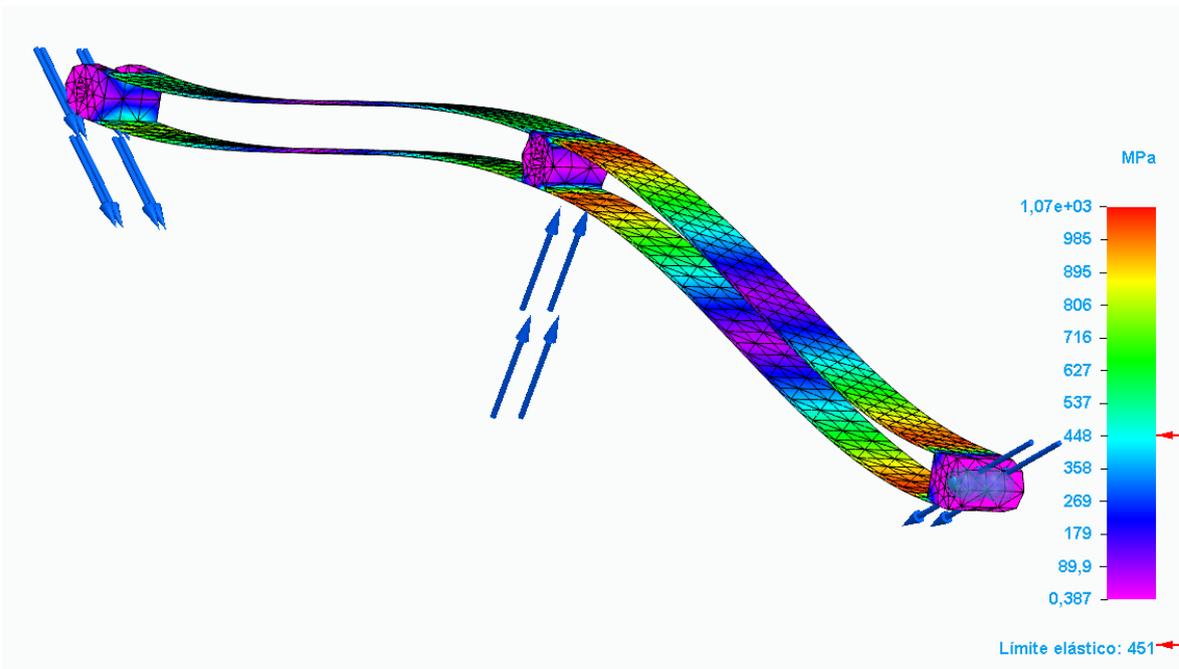


Ilustración 65. Resultado de la tensión de Von Mises en la propuesta 2

### 5.1.3 PROPUESTA 3

En esta propuesta se puede observar como la pieza ha sido rediseñada siguiendo el patrón marcado con anterioridad. En este caso como se quiso quitar aún más material que en la propuesta 1, se decide eliminar material lateral y que el patrón se encuentre en el centro de la barra. La masa de la barra es de 77,979 Kg con la propuesta 3.

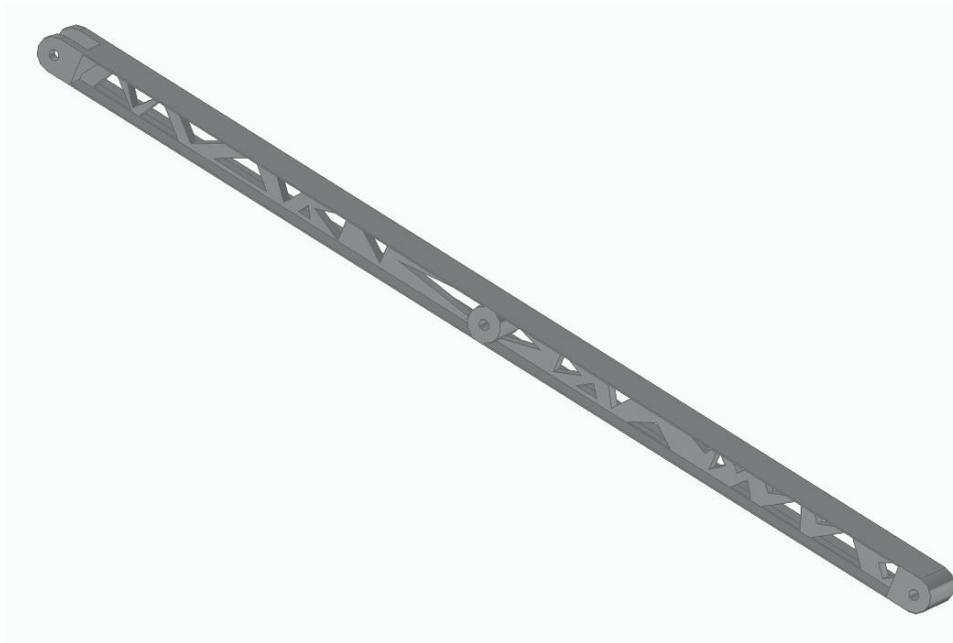


Ilustración 66. Barra con la propuesta 3 de la optimización de forma

Tras diseñar esta propuesta con Solid Edge se realiza una simulación FEM la cual muestra que la pieza puede soportar esas condiciones de contorno, y si se quisiera se podría rediseñar para ver si hubiera otra propuesta, con menos material/masa, que funcionara. Para la fabricación de esta propuesta se debería hacer una fase de desbaste en una fresadora.

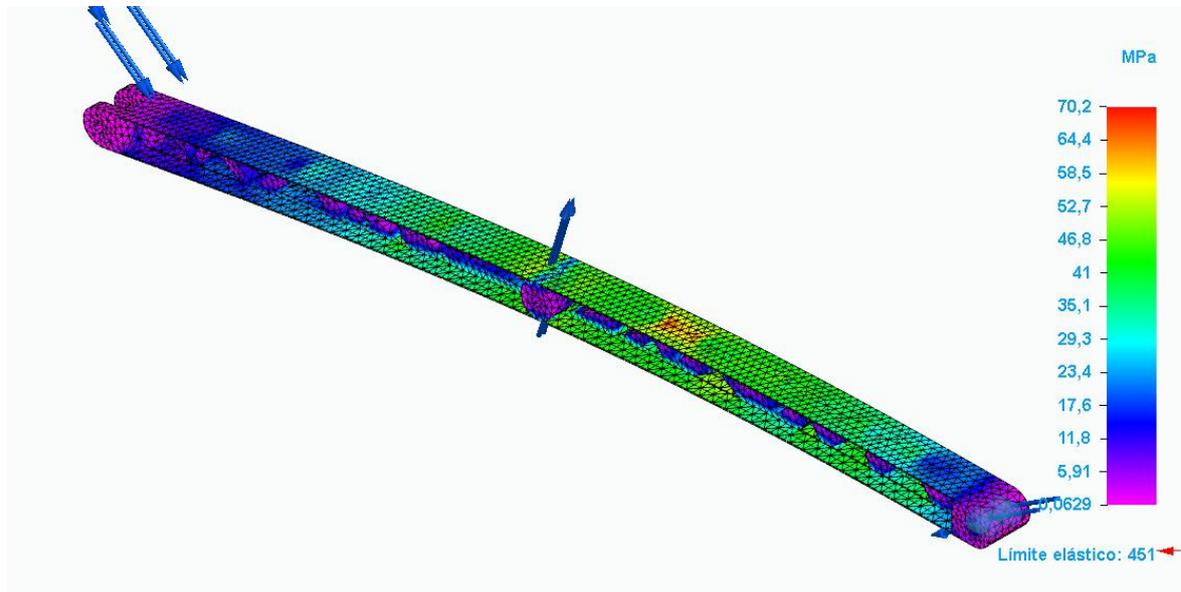


Ilustración 67. Resultado de la tensión de Von Mises en la propuesta 3

#### 5.1.4 PROPUESTA 4

En esta propuesta se puede observar como la pieza ha sido rediseñada siguiendo el patrón marcado con anterioridad, el mismo de las propuestas 1 y 3. En este caso como se quiso quitar aún más material que en la propuesta 3, se decide eliminar más material lateral y que el patrón se encuentre en el centro de la barra. La masa de la barra es de 54,821 Kg con la propuesta 3.

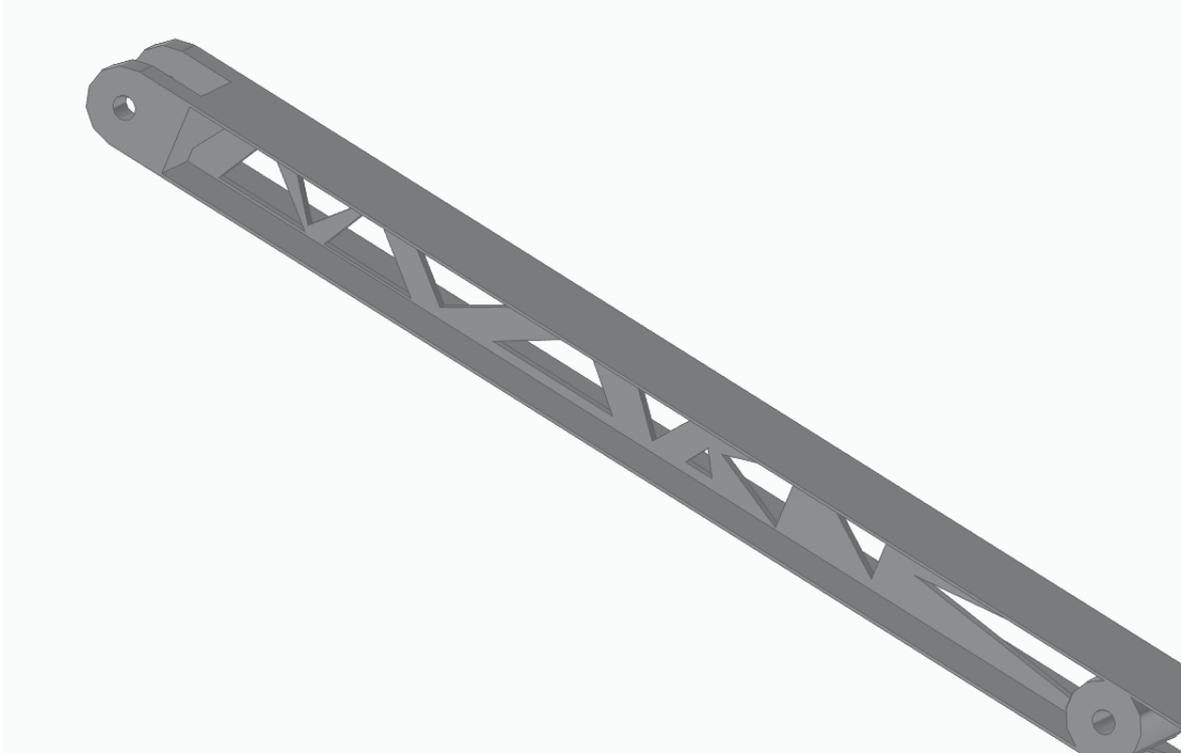


Ilustración 68. Barra con la propuesta 4 de la optimización de forma

Tras diseñar esta propuesta con Solid Edge se realiza una simulación FEM la cual muestra que la pieza puede soportar esas condiciones de contorno, y si se quisiera se podría rediseñar para ver si hubiera otra propuesta, con menos material/masa, que funcionara. Al igual que en la propuesta 3, para la fabricación de esta propuesta se debería hacer una fase de desbaste en una fresadora.

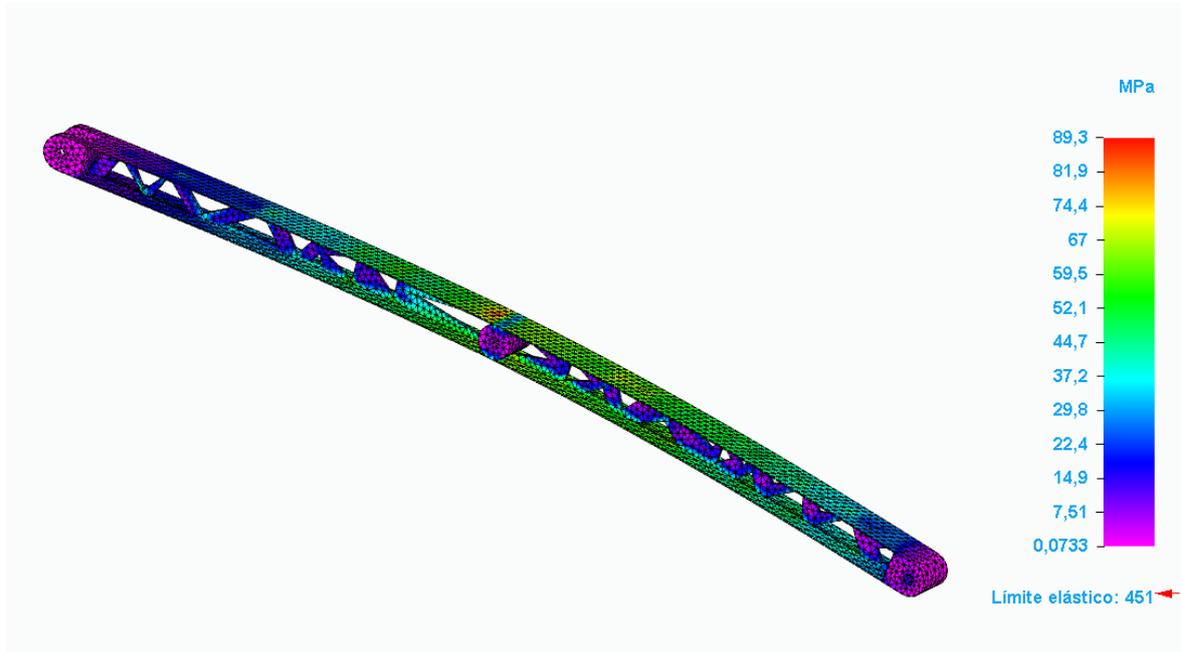


Ilustración 69. Resultado de la tensión de Von Mises en la propuesta 4

## Capítulo 6. PROTOTIPOS

Debido a las dimensiones tan grandes que tiene la barra, para los prototipos se imprimieron solo 500 mm de la pieza. Esto se debe a que si se escalaba toda la barra no se iba a poder observar los detalles de las optimizaciones. Imprimir esas regiones dan una buena idea del resultado que da cada solución.

### 6.1 BARRA SIN OPTIMIZAR

Usando el software Cura, podemos ver la cantidad de material empleado y el tiempo requerido para realizar el prototipo de la barra sin optimizar.

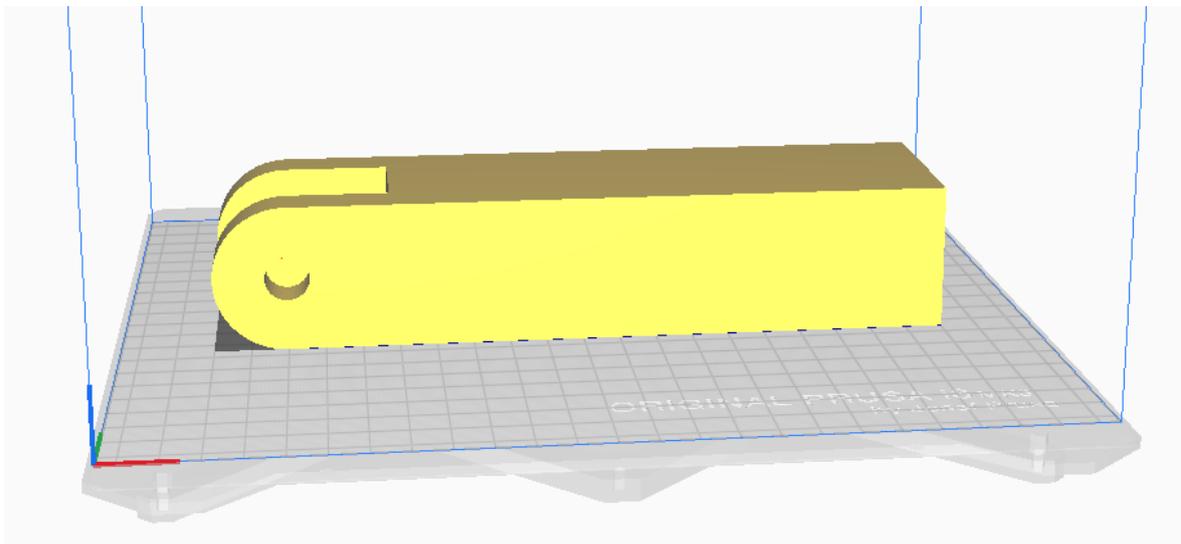


Ilustración 70. Visualización de la barra sin optimizar en Cura

El material del filamento de la simulación es el PLA Genérico, el cual tiene una temperatura de extrusión de 200°C y la base de impresión está a 60°C. Si la pieza se fabricara en la impresora Prusa i3 Mk3s, con estas condiciones, tardará en torno a 11 horas y empleará 124 gramos de material.

## 6.2 *BARRA OPTIMIZADA TOPOLOGÍCAMENTE*

Usando el software Cura, podemos ver la cantidad de material empleado y el tiempo requerido para realizar el prototipo de la barra optimizada topológicamente.

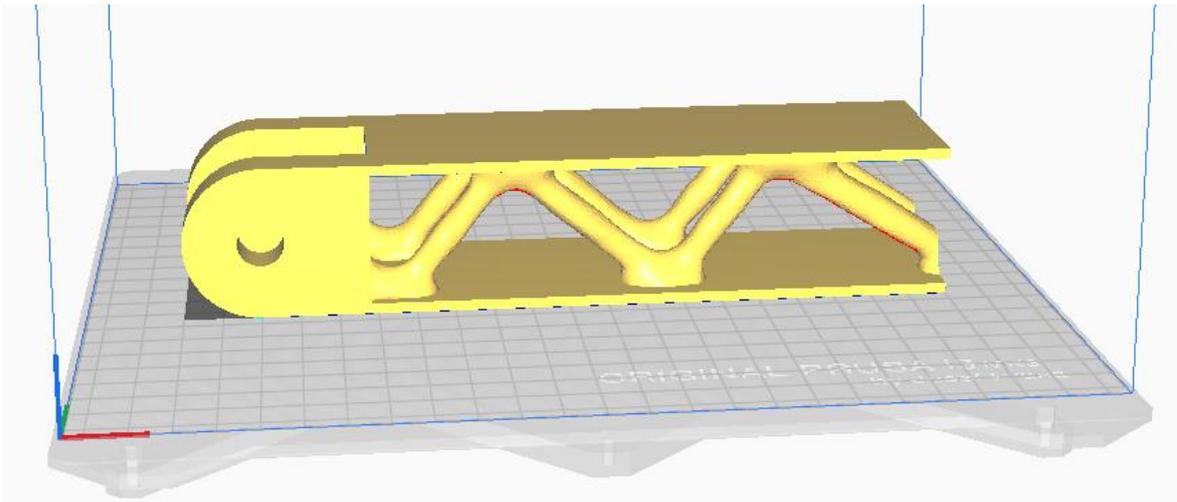


Ilustración 71. Visualización de la barra optimizada topológicamente en Cura

El material del filamento de la simulación es el PLA Genérico, el cual tiene una temperatura de extrusión de 200°C y la base de impresión está a 60°C. Si la pieza se fabricara en la impresora Prusa i3 Mk3s, con estas condiciones, tardará en torno a 13,5 horas y empleará 125 gramos de material.



Ilustración 72. Prototipo, optimizado topológicamente, impreso

### **6.3 BARRA OPTIMIZADA EN FORMA**

Usando el software Cura, podemos ver la cantidad de material empleado y el tiempo requerido para realizar el prototipo de la barra optimizada en forma.

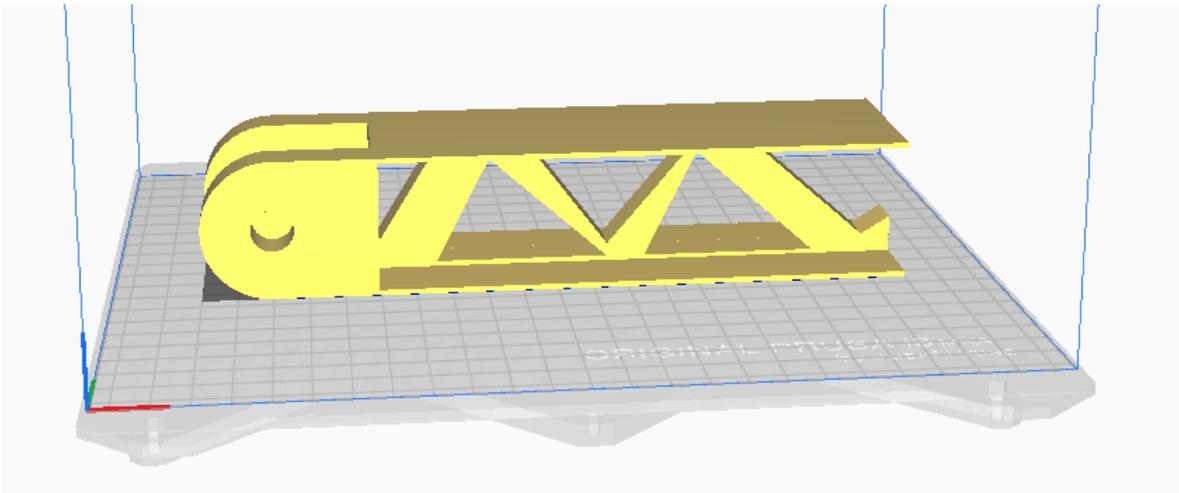


Ilustración 73. Visualización de la barra optimizada en forma en Cura

El material del filamento de la simulación es el PLA Genérico, el cual tiene una temperatura de extrusión de 200°C y la base de impresión está a 60°C. Si la pieza se fabricara en la impresora Prusa i3 Mk3s, con estas condiciones, tardará en torno a 12,5 horas y empleará 119 gramos de material.



Ilustración 74. Prototipo, optimizado en forma, impreso

## Capítulo 7. ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 7.1 PRESUPUESTOS 3D

Para el cálculo del coste de fabricación por impresión 3D de las piezas optimizadas se empleó el Excel desarrollado por la universidad, ICAI. En este Excel se tiene en cuenta varias variables, pero no todas las que se deben considerar. Se considera la amortización de la máquina, el coste del material que se va a emplear, el gasto de tener a un técnico analista, así como el tiempo de fabricación.

Antes de hablar de los costos que se han calculado, se ha de mencionar que no se ha encontrado ninguna impresora 3D en el mercado que sirva para la fabricación de estas barras. Principalmente, el tamaño de las piezas que se quieren fabricar es muy grande para la mayoría de las impresoras que se encuentran en la industria, y las que pueden desarrollar este trabajo no son viables, ya sea por los precios, sus dimensiones o que no pueden trabajar con el acero propuesto.

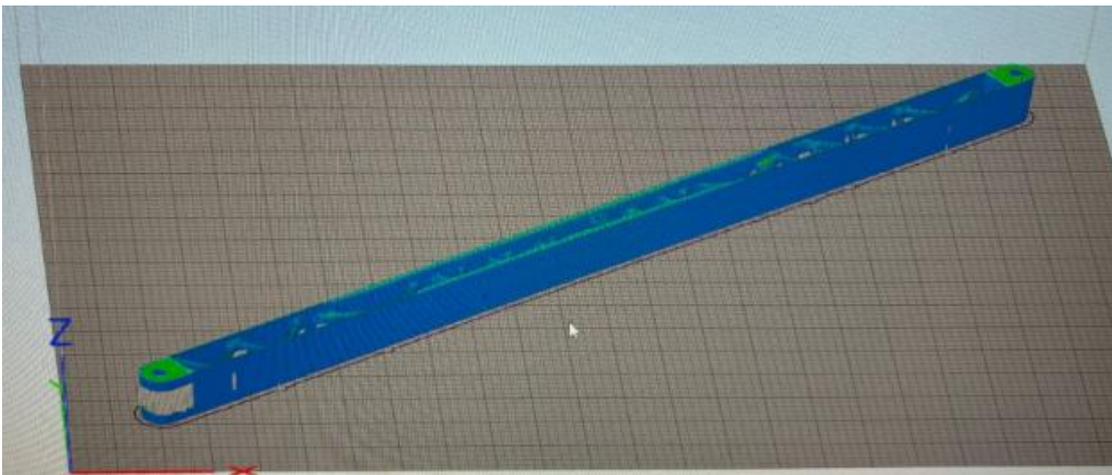


Ilustración 75. Simulación de la impresión 3D

Pese a que se supiera que la pieza no se iba a fabricar con una impresora 3D se quiso hacer los cálculos de los costos de fabricación, si se realizaran en las dos impresoras más grandes que se encuentran en el laboratorio de la universidad. Estas máquinas son la Markforged X7 y la HP Jet Fusion 580.

Para calcular cuánto material se iba a emplear para la fabricación de las barras se realizó una simulación con el Software Simplify3D. Este no solo calcula cuanto material se emplea, sino que también te muestra el tiempo de impresión de las piezas, así como el coste de material y su peso. Gracias a estos valores se puede hacer una buena aproximación de los costos de fabricación de las barras si estas impresoras tuvieran las dimensiones apropiadas para este trabajo.

### 7.1.1 COSTES MARKFORGED X7

ANÁLISIS DE COSTES PARA PROTOTIPADO DE PIEZAS EN IMPRESORA 3D -FDM		
<b>DATOS AMORTIZACIÓN MÁQUINA</b>		
Precio máquina (€)	66.000	
Coste mantenimiento anual (€)	6.600	
Años de amortización	5	
Amortización (h/año) - 223 días-año / 12 horas-día	2000	
Precio Hora máquina-amortización (€/h)	<b>8,58</b>	
Precio Hora venta-público (€/h)	<b>8,58</b>	
<b>DATOS COSTE MATERIAL</b>		
Coste material modelo: filamento abs (€/cc) (141 €-950 cc)	0,15	
Densidad de Empaquetado (%)	10,00	
Precio Bandeja (€/bandeja)	100,00	
<b>DATOS COSTE TÉCNICO ANALISTA</b>		
Coste técnico analista del modelo - inc. desmoldeo (€/h)	20	
<b>DATOS TÉCNICOS DE DEPOSICIÓN</b>		
<i>Tipo de modelo</i>	<b>Malla</b>	<b>Sólido</b>
Tasa de deposición (cc/h)	10,37	10,37
Precio hora máquina-deposición (€/h)	1,539126316	1,53912632
<b>PIEZA monica-lucia4-maxilar - Orientación HORIZONTAL</b>		
<b>CONCEPTOS PRESUPUESTADOS</b>		
	<b>Opción Sólido</b>	<b>Costes parciales</b>
Material modelo (cc)	505,60	75,04 €/ud
Soporte modelo (cc)	85,80	858,00 €/ud
Tiempo modelo (h)	48,77	418,45 €/ud
Piezas por bandeja (ud)	1,00	100,00 €/ud
Tiempo técnico-analista (h)	0,25	5,00 €
Cantidad de piezas	1,00	
Coste unitario (€) en ICAI + IVA	1456,49 €/Ud	
Coste total (€) en ICAI + IVA	1456,49 €	

Tabla 1. Costes de impresión de una barra con la impresora Markforged X7

Como se puede observar el precio por pieza es muy elevado, esto se debe al gran tiempo de fabricación y a la gran cantidad de material que se usa. Esto encarece el precio ya que el filamento de acero para la impresión 3D es bastante caro. Un kilo de filamento de acero inoxidable, BASF Ultrafuse 17-4 PH, se puede encontrar en el mercado por 141€. [28]

### 7.1.2 COSTES HP JET FUSION 580

ANÁLISIS DE COSTES PARA PROTOTIPADO DE PIEZAS EN IMPRESORA 3D -HP 580		
<b>DATOS AMORTIZACIÓN MÁQUINA</b>		
Precio máquina (€)		80.000
Coste mantenimiento anual (€)		2.000
Años de amortización		5
Días impresión/año		249
Impresiones/día		0,5
Precio impresión (€)		147,53
Precio Impresión venta-público (€)		147,53
<b>DATOS COSTE MATERIAL</b>		
Coste material: (€/kg)		141,00
Coste material: (€/cc)		0,15
Volumen Total (cc)		505,61
Densidad de Empaquetado		10,00%
<b>DATOS COSTE TÉCNICO ANALISTA</b>		
Coste técnico analista del modelo - inc. limpieza (€/h)		20
<b>PIEZA monica-lucia4-maxilar - Orientación HORIZONTAL</b>		
<b>CONCEPTOS PRESUPUESTADOS</b>	<b>Opción Solido</b>	<b>Costes parciales</b>
Material modelo (cc)	505,61	75,04 €/ud
Impresión	-	1475,30 €/ud
Tiempo técnico-analista (h)	0,50	10,00 €/ud
Tiempo Limpieza (h)	0,50	10,00 €/ud
Cantidad de piezas	1,00	
<b>Coste unitario (€) en ICAI + IVA</b>	<b>1570,34 €/Ud</b>	
<b>Coste total (€) en ICAI + IVA</b>	<b>1570,34 €</b>	

Tabla 2. Costes de impresión de una barra con la impresora HP Jet Fusion 580

Como pasaba con la otra impresora el precio por unidad es muy elevado, se debe a los mismos factores que se han mencionado en el apartado anterior, tiempo, precio y cantidad de material.

## ***7.2 PRESUPUESTOS CORTE POR CHORRO DE AGUA***

Para el cálculo del coste de fabricación por corte por chorro de agua de las piezas optimizadas de forma se empleó un Excel, que sigue la misma idea que el empleado en el cálculo de costes en la impresión 3D. En este Excel se tiene en cuenta varias variables, pero no todas las que se deben considerar. Se considera la amortización de la máquina, el coste del material abrasivo que se va a emplear, el gasto de tener a un técnico analista, así como el tiempo de fabricación y el consumo energético y de agua.

Para calcular cuánto material abrasivo se iba a emplear para la fabricación de las barras se realizó una simulación con el Software ProtoMAX Layout. Este no solo calcula cuanto abrasivo se emplea, sino que también te muestra el tiempo de fabricación de las piezas, así como el número de perforaciones y la ruta que el chorro va a tomar en el proceso. Gracias a estos valores se puede hacer una buena aproximación de los costos de fabricación de las barras.

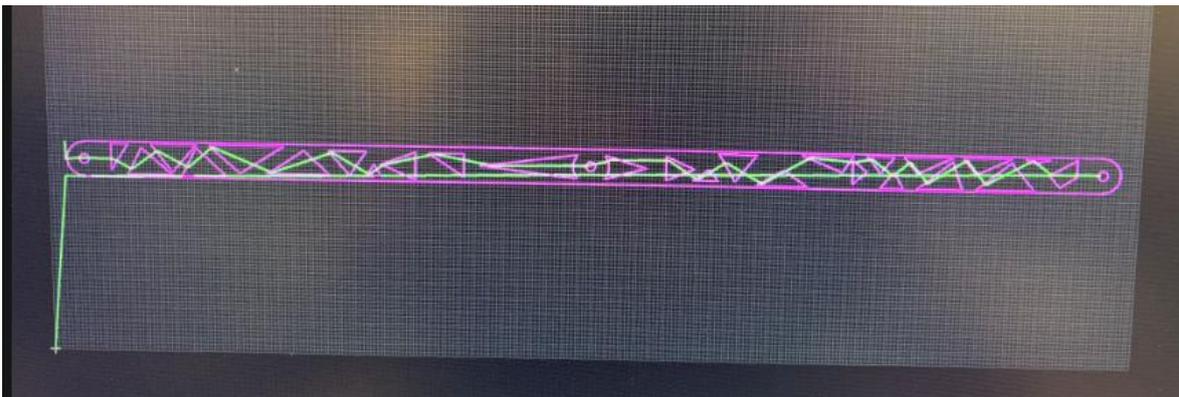


Ilustración 76. Simulación de la fabricación por chorro de agua

Este Software solo trabaja con piezas en 2D por lo que previamente se tuvo que realizar un plano del perfil de la pieza, para así poder cargar en el ProtoMAX Layout el patrón que se quiere cortar.

Una máquina que tiene el tamaño para poder fabricar piezas de estas proporciones es la OMAX MAXIEM 1530 30KM (22kW). Para la Excel se trabaja con los datos proporcionados por la máquina, como su potencia. Como el Software no te calcula la cantidad de agua que gasta dicha máquina, se realizaron los cálculos con la idea de que la máquina consume 3,6 L/min, ya que está alimentada por una bomba de 30 HP.

DATOS AMORTIZACIÓN MÁQUINA		
Precio máquina (€)		175.000
Coste mantenimiento anual (€)		17.500
Años de amortización		5
Amortización (h/año) - 223 días-año / 8 horas-día		1784
Precio Hora máquina-amortización (€/h)		<b>25,50</b>
Precio Hora venta-público (€/h)		<b>38,26</b>
DATOS COSTES		
Coste abrasivo (€/Kg)		0,60
Coste energético (€/kWh)		0,25
Coste agua (€/m <sup>3</sup> )		1,92
DATOS COSTE TÉCNICO ANALISTA		
Coste técnico analista del modelo - inc. desmoldeo (€/h)		30
PIEZA <i>monica-lucia4-maxilar</i> - Orientación HORIZONTAL		
CONCEPTOS PRESUPUESTADOS	Datos fabricación	Costes parciales
Material abrasivo (Kg)	<b>583,33</b>	350,00 €/ud
Potencia consumida (kW)	<b>22,00</b>	5,50 €/ud
Tiempo (h)	<b>85,57</b>	470,65 €/ud
Agua consumida (m <sup>3</sup> )	<b>18,50</b>	35,52 €/ud
Tiempo técnico-analista (h)	<b>0,50</b>	15,00 €
Cantidad de piezas	<b>1,00</b>	
<b>Coste unitario (€) en ICAI + IVA</b>	<b>909,42 €/Ud</b>	
<b>Coste total (€) en ICAI + IVA</b>	<b>909,42 €</b>	

Tabla 3. Costes de fabricación de una barra con la máquina OMAX MAXIEM 1530 30KM (22kW)

Se puede ver que el gasto en material abrasivo y el tiempo de uso de la máquina incrementan el proceso de fabricación, esto se debe a que el espesor de la pieza, que es de 130mm, es muy grande.

## Capítulo 8. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En este proyecto nos hemos centrado en la optimización topológica, así como en el diseño generativo, con el objetivo de reducir la masa de las barras de una plataforma de elevación de carga, lo que supone un menor gasto en material y, por tanto, un mayor compromiso con el uso responsable de los recursos de la Tierra.

Entre las conclusiones obtenidas, se ha podido comprobar que el diseño original de las barras permitía reducir su masa hasta en un 60%, sin perder resistencia ni rigidez. Esto demuestra que la optimización topológica puede mejorar el rendimiento de aquellas máquinas que incorporen piezas rediseñadas bajo este enfoque. Durante el proceso de fabricación se encontraron diversos problemas, entre los cuales destaca la limitada capacidad de la mayoría de impresoras 3D disponibles en el mercado, las cuales están diseñadas principalmente para piezas de pequeño y mediano tamaño.

Como alternativa, se propuso realizar una optimización en forma, la cual permite reducir la masa de las piezas mediante geometrías más simples que las utilizadas en la optimización topológica. Estas geometrías son compatibles con métodos de fabricación más tradicionales, como el mecanizado o el corte en frío. Uno de los procesos complementarios al corte en frío es el corte por chorro de agua, que resultó ser el más apropiado para la fabricación de la pieza de estudio.

En cuanto a los costes de fabricación, se concluyó que, actualmente, tanto la optimización topológica como la optimización en forma no están completamente preparadas para ser aplicadas en piezas de gran tamaño o gran espesor, ya que el elevado consumo de material y el tiempo necesario para su fabricación incrementan considerablemente los costes.

A lo largo del trabajo se utilizaron varios softwares, entre ellos algunos ampliamente conocidos como SolidWorks y Solid Edge, en los cuales se exploraron nuevas herramientas

y funcionalidades. También se emplearon otros programas menos conocidos, pero igualmente útiles, como Altair Inspire, así como softwares de estimación de tiempo y consumo de material en procesos de fabricación, como Cura.

Algunas sugerencias para futuros Trabajos Fin de Grado (TFG) podrían ser las siguientes:

- El desarrollo de impresoras 3D capaces de imprimir piezas de gran tamaño.
- La compatibilidad entre el mecanizado y el corte por chorro de agua en la fabricación de piezas complejas.

En resumen, la fabricación de estas barras debería basarse en un rediseño mediante optimización en forma, seguido de una fase de desbaste y una subfase de acabado por mecanizado, con el fin de reducir el espesor de la pieza. Posteriormente, las piezas podrían ser cortadas por chorro de agua para obtener un patrón adecuado. Todo este proceso permitiría obtener piezas con menor masa sin sacrificar su rigidez ni resistencia.

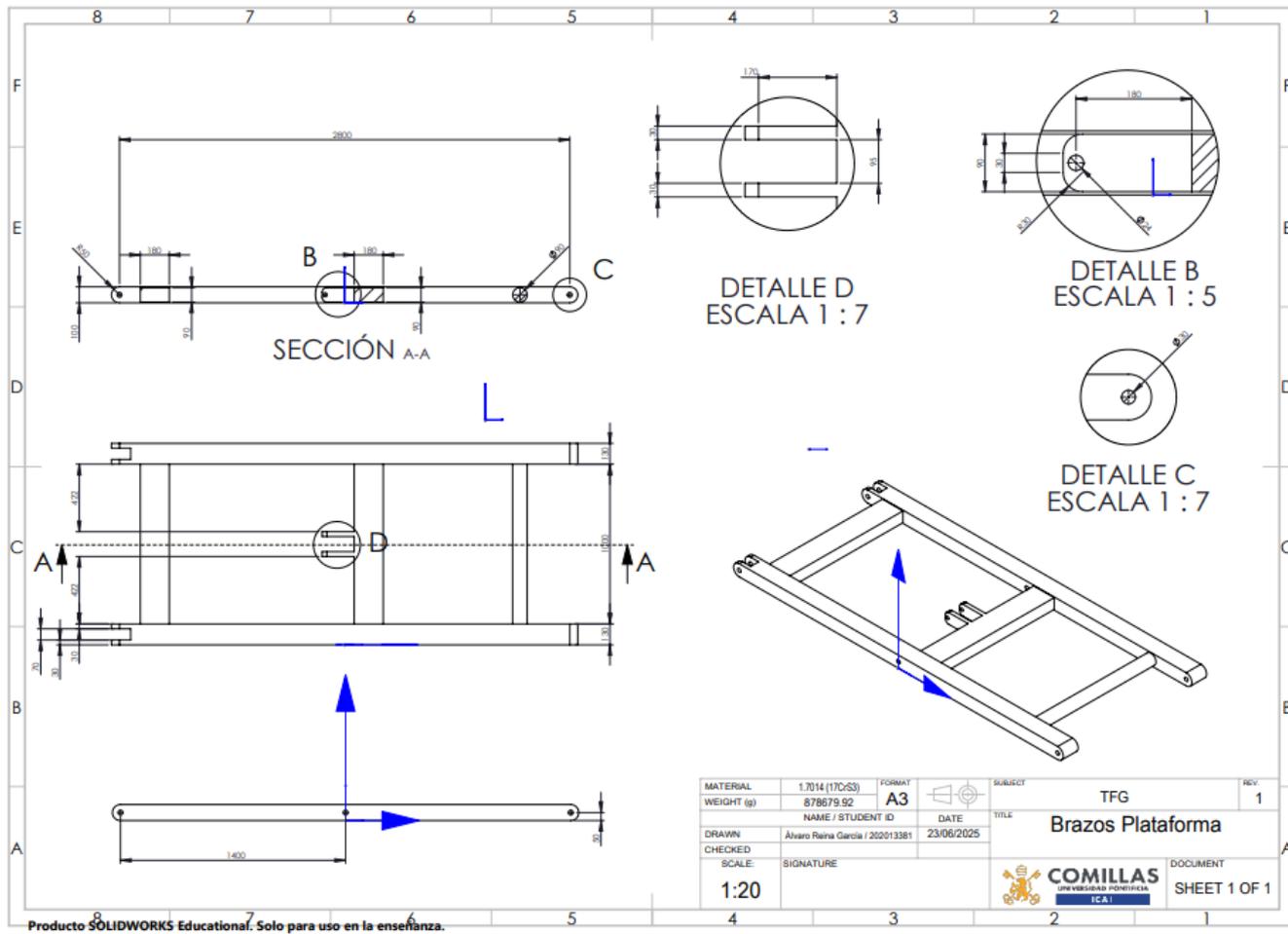
## Capítulo 9. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Real Academia Española. (2024). *Diccionario de la lengua española* (23.<sup>a</sup> ed.). <https://dle.rae.es/>
- [2] Bhate, D. (2016, 28 enero). Additive Manufacturing - Back to the Future! - PADT. *PADT*. <https://www.padtinc.com/2016/01/28/additive-manufacturing-back-to-the-future/>
- [3] Vista de Optimización topológica orientada a fabricación aditiva usando una estrategia de convergencia robusta. Aplicación al diseño de una pieza de motocicleta. (s. f.). <https://publicaciones.asoc-aeim.es/anales/article/view/245/82>
- [4] Nociones básicas de optimización topológica: Cómo usar modelos algorítmicos para crear un diseño ligero. (s. f.). Formlabs. <https://formlabs.com/es/blog/optimizacion-topologica/>
- [5] Gamez, M. J. (2022, 24 mayo). *Objetivos y metas de desarrollo sostenible - Desarrollo Sostenible*. Desarrollo Sostenible. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
- [6] Universidad de Sevilla (s.f.) Capítulo 4, Optimización topológica. <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/4296/fichero/VolumenI%252F4.pdf>
- [7] C, L., & C, L. (2025, 13 mayo). *Guía completa: La optimización topológica en la impresión 3D*. 3Dnatives. <https://www.3dnatives.com/es/optimizacion-topologica-10012017/#!>
- [8] Alfonso, M. (2023, 14 agosto). *Todo sobre las férulas impresas en 3D*. Bitfab. <https://bitfab.io/es/blog/ferulas-impresas-en-3d/>
- [9] Meltio. (2024, 11 diciembre). *Impresora 3D a bordo de un buque de la US Navy*. Meltio. <https://meltio3d.com/primera-impresora-3d-a-bordo-de-un-buque-de-la-us-navy/>
- [10] Impresion3d. (2024, 28 octubre). *¿En qué consiste el prototipado 3D? | Qué es el prototipado*. MANUFACTURAS DE PRECISIÓN I3D | SERVICIO DE IMPRESIÓN 3D. <https://impresioni3d.com/en-que-consiste-el-prototipado-3d/>
- [11] De Naoum, K., & Piccoli, R. (2024, 17 diciembre). *DMLS vs. SLM 3D Printing—What’s the Difference?* Xometry. <https://www.xometry.com/resources/3d-printing/dmls-vs-slm-3d-printing/>

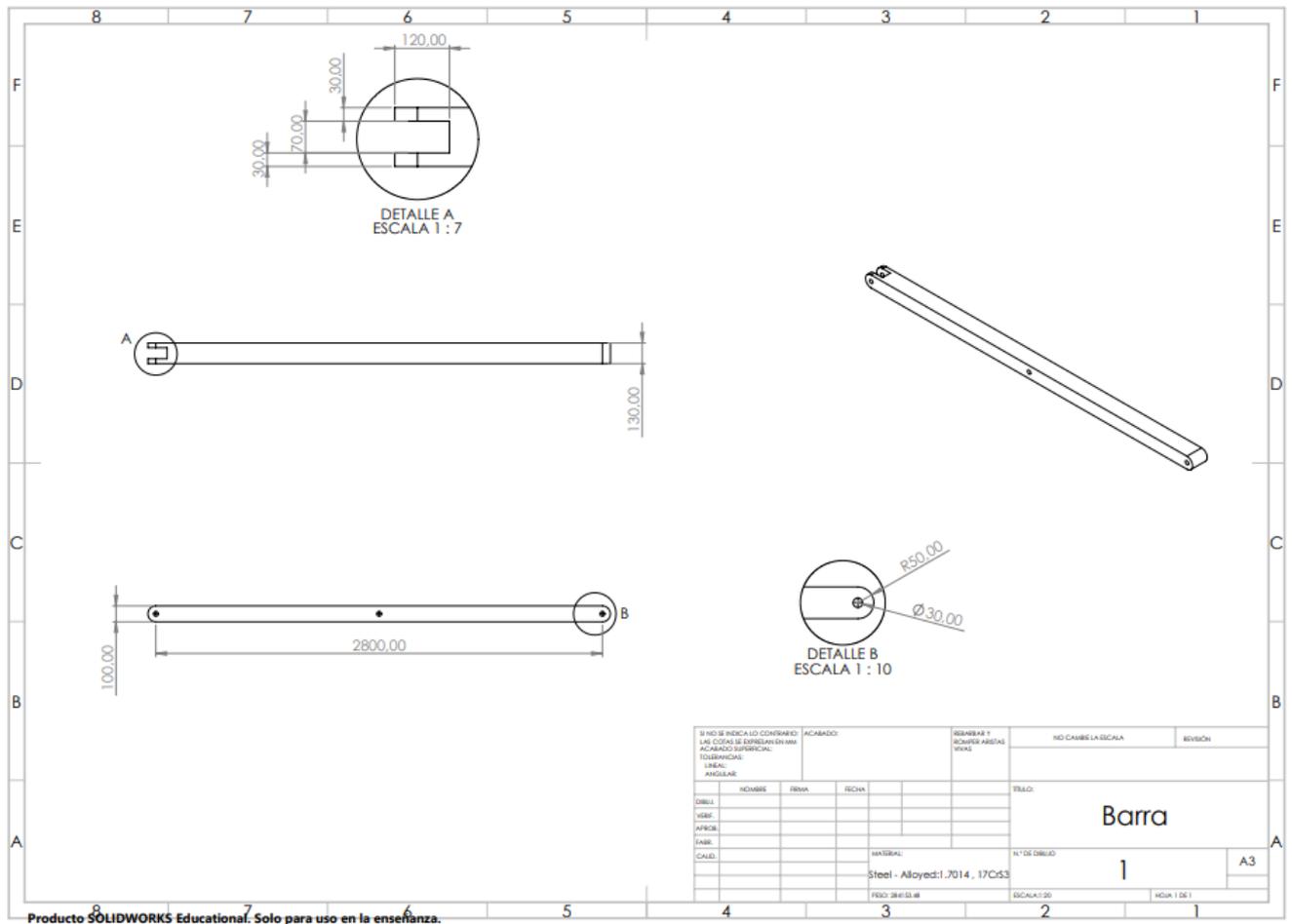
- [12] *Servicios de impresión 3D de metales online (DMLS) | Xometry Europe.* (2025, 23 mayo). Xometry Europe. <https://xometry.eu/es/impresion-3d-en-metal/#gallery-1>
- [13] *Láser cladding: un método para diferentes aplicaciones.* (s. f.). [https://www.trumpf.com/es\\_ES/soluciones/aplicaciones/fabricacion-aditiva/laser-cladding/](https://www.trumpf.com/es_ES/soluciones/aplicaciones/fabricacion-aditiva/laser-cladding/)
- [14] *Impresión 3D de componentes metálicos mediante láser cladding en hilo.* (s. f.). Interempresas. <https://www.interempresas.net/Fabricacion-aditiva/Articulos/211294-Impresion-3D-de-componentes-metalicos-mediante-laser-cladding-en-hilo.html>
- [15] Romo, S. (2018, 18 diciembre). *Las 7 mejores Tecnologías de Impresión 3D del Mundo.* <https://es.linkedin.com/pulse/las-7-mejores-tecnolog%C3%ADas-de-impresi%C3%B3n-3d-del-mundo-sebas-romo>
- [16] Manufactures Cusell. (2022, 21 diciembre). *Corte por chorro de agua y Plotter Barcelona | Cusell.* <https://arandelasyjuntas.com/prod/corte-por-chorro-de-agua-y-plotter/>
- [17] *¿Qué grosor de metal puede cortar un chorro de agua?* (s. f.). Quora. <https://es.quora.com/Qu%C3%A9-grosor-de-metal-puede-cortar-un-chorro-de-agua>
- [18] *Oxicorte. Proceso y productos - Gestión de compras.* (2021, 3 septiembre). Gestión de Compras. <https://www.gestiondecompras.com/es/productos/conformado-de-chapa/oxicorte/>
- [19] *Corte por láser - Dassault Systèmes.* (2023, 9 febrero). Dassault Systèmes. <https://www.3ds.com/es/make/guide/process/laser-cutting>
- [20] *thyssenkrupp Materials Ibérica | Acero, Inoxidable y Aluminio.* (s. f.). Materials Ibérica. <https://www.thyssenkrupp-materials.es/>
- [21] DarwinA.Milla. (s. f.). *GE.* Scribd. <https://es.scribd.com/document/487447984/GE>
- [22] Aceromafe, R. (2025, 13 enero). *¿Cuáles son los principales procesos de maquinado?* Aceromafe. <https://www.aceromafe.com/procesos-de-maquinado/>
- [23] Umesal. (2024, 1 julio). *Qué es un torno: Usos y aplicaciones.* Umesal. <https://umesal.com/que-es-un-torno-definicion-y-explicacion/>
- [24] Admin. (2024, 14 agosto). *Partes de una fresadora y sus usos.* Agri-cutter. <https://agricutter.es/partes-de-una-fresadora-y-sus-usos/>
- [25] Savour. (2025, 2 mayo). *Operaciones de taladrado industrial.* Blog Heller Maquinaria. <https://blog.hellermaquinaria.com/operaciones-taladrado-industrial/>

- [26] Watson, B. (2025, 22 mayo). *Abrasivos de granate para chorro de agua* | Barton International. Barton International. <https://bartongarnet.es/ventajas-del-granate/>
- [27] *BASF Ultrafuse 17-4 PH filamento de acero inoxidable 1kg*. (s. f.). <https://www.3dfilamento.es/es/product/11674269-basf-ultrafuse-17-4-ph-filamento-de-acero-inoxidable-1kg>

## ANEXO I

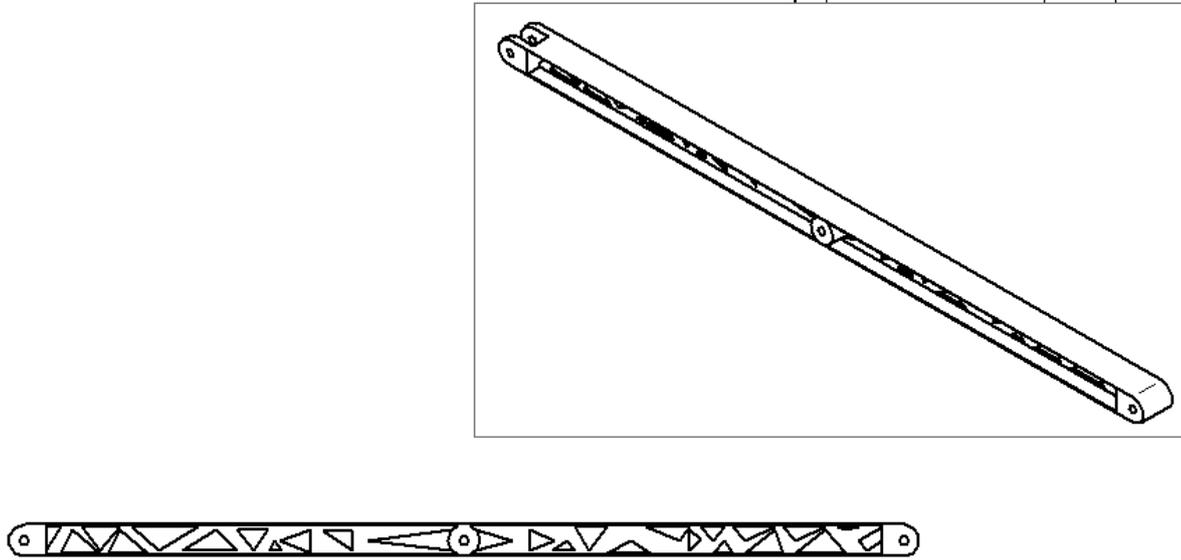


Plano del brazo de la plataforma de la elevación de carga.



Plano de la barra que se ha optimizado.

Revisiones			
Rev.	Descripción	Fecha	Aprobado

Dibujado	Nombre	Fecha	<b>Solid Edge</b>
	Alvaro	Emar 5/1	referencia Siemens PLM
Comprobado			Título <input type="checkbox"/>
Aprobado 1			A3 Plano <input type="checkbox"/>
Aprobado 2			Archivo: Plano 1 <input type="checkbox"/>
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias: ±0,5 y ±1°			Escala <input type="checkbox"/> Peso <input type="checkbox"/> Hoja 1 de 1 <input type="checkbox"/>

Plano propuesta 4 de la optimización en forma