



Máster en Ingeniería en Tecnologías Industriales

Trabajo Fin de Máster

ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA DE ELEMENTOS PARA PRODUCTOS DE CONSUMO

Autor: Álvaro Montero Ballesteros

Director: Mariano Jiménez Calzado

Madrid

Julio 2024

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
Análisis y optimización topológica de elementos para productos de consumo
en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico 2023/2024 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 Montero Ballesteros

Fecha: 19/07/2024

Autorizada la entrega del proyecto



Fdo.: Mariano Jiménez Calzado

Fecha: 19/07/2024



Máster en Ingeniería en Tecnologías Industriales

Trabajo Fin de Máster

ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA DE ELEMENTOS PARA PRODUCTOS DE CONSUMO

Autor: Álvaro Montero Ballesteros

Director: Mariano Jiménez Calzado

Madrid

Julio 2024

ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN TOPOLOGICA DE ELEMENTOS PARA PRODUCTOS DE CONSUMO

Autor: Montero Ballesteros, Álvaro

Director: Jiménez Calzado, Mariano

Entidad Colaboradora: ICAI-Universidad Pontificia Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO

Se ha realizado la optimización topológica de varios elementos para productos de consumo. Para ello, se han diseñado dichos elementos (llave fija, soporte de bomba hidráulica y biela de bicicleta) en SolidEdge y se han realizado las iteraciones necesarias de reducción de masa hasta conseguir una estructura óptima, para posteriormente realizar su impresión 3D y analizar los costes finales de fabricación.

Palabras clave: Fabricación aditiva, optimización topológica, elementos finitos.

La optimización topológica es una técnica esencial para lograr productos más resistentes y económicos sin comprometer su rendimiento ni durabilidad. Este método mejora la calidad y la economía de los productos, obteniendo beneficios significativos. La optimización topológica es un desafío en la ingeniería estructural que busca la configuración más eficiente de materiales en un espacio de diseño, teniendo en cuenta las restricciones y condiciones necesarias.

Este proceso se emplea en diversas industrias. En la aeroespacial, se utiliza para fabricar componentes internos y soportes de motores. En la automotriz, se aplica en el diseño de chasis y elementos de suspensión. En medicina, permite diseñar implantes ortopédicos adaptados a cada paciente. En la industria del deporte, se usa para fabricar bicicletas, cascos y suelas de zapatillas. La optimización topológica tiene múltiples aplicaciones y continúa desarrollándose.

La optimización topológica utiliza algoritmos computacionales para explorar opciones que maximizan la eficiencia en el uso de materiales sin comprometer la integridad estructural. Esto permite alcanzar soluciones óptimas que mejoran el rendimiento del producto y reducen costos.

La optimización topológica se plantea como un problema matemático, que utiliza un método matemático conocido como Método de Elementos Finitos (FEM). Este método, que se utiliza para resolver los problemas de optimización topológica, se basa en discretizar una pieza en elementos más pequeños. Estos elementos suelen tener una estructura triangular, aunque también puede ser tetraédrica, prismática, hexaédrica... Cada elemento finito se conecta por nodos, que es el punto de unión los elementos contiguos. El objetivo de dividir la geometría inicial en numerosos elementos finitos es pasar de un sistema inicial con infinitos grados de libertad a otro sistema que tiene un

número finito de grados de libertad. Así, se puede analizar el comportamiento de todos y cada uno de los elementos finitos en los que se ha deseado dividir la geometría inicial, ya que cada elemento tendrá su propio comportamiento. Finalmente, se podrá analizar y sacar conclusiones de cómo se comporta realmente la estructura inicial ante las condiciones de contorno establecidas.

El método de elementos finitos nos permitirá realizar el mallado de la geometría. Mallar una geometría es el proceso fundamental de este método que permite manejar de manera computacional los elementos finitos.

El proceso generalmente comienza con una pieza maciza a la que se aplican las condiciones de contorno necesarias para su optimización topológica. El objetivo es remover material de áreas no críticas, resultando en una geometría que utiliza el mínimo material posible mientras mantiene la integridad estructural, funcionalidad y eficiencia de la pieza.

Para ello, se ha seguido una metodología de trabajo en la que, primeramente, se elige la pieza de diseño a optimizar (llave fija, soporte de bomba hidráulica y biela de bicicleta) y su respectivo material. Posteriormente, se realiza un estudio de todas las restricciones y fuerzas que intervienen en el proceso de aplicación, para así poder realizar simulaciones por elementos finitos. Luego, se procede a realizar reducciones de masa de manera iterativa hasta conseguir un diseño que, al realizar su respectiva simulación por elementos finitos, cumpla las restricciones establecidas.

Finalmente, para la llave fija se ha conseguido una reducción de material del 20%, para el soporte de la bomba se ha reducido la cantidad de material un 51% y para la biela de la bicicleta se ha logrado una reducción de material del 50%. Es decir, para estas reducciones de masa, la tensión máxima que aparece en cada pieza es la mayor de entre todas las iteraciones realizadas y siempre inferior al límite elástico del material asignado para cada pieza.

Una vez conseguidas las piezas optimizadas, se necesita hacer un refinamiento de las piezas, ya que la resolución de diseño generativo que proporciona SolidEdge no deja las superficies totalmente pulidas. Para ello, se utiliza el software Altair Inspire, que es un programa de diseño industrial que permite eliminar las rugosidades presentes en las superficies de las piezas, resultando una pieza con las superficies lisas y de mayor eficiencia y rendimiento.

Con las piezas refinadas, se realiza una última simulación por elementos finitos para comprobar que las piezas optimizadas no superan el límite elástico (que, por lo general, no lo harán).

Con todo esto, las piezas ya están listas para la impresión 3D. Los prototipos, tanto optimizados como sin optimizar, se imprimirán empleando la tecnología FDM (Fused Deposition Modeling) en la impresora DT del laboratorio de fabricación, utilizando PLA como material de impresión (un polímero termoplástico con buena calidad de impresión

y biodegradable). Se elige esta técnica de fabricación aditiva debido a su simplicidad y su bajo coste, en comparación con otras técnicas de impresión; además de conseguir una producción ideal para prototipos funcionales.

Al ser FDM la técnica de impresión 3D, se ha de utilizar el programa UltiMaker Cura para la preparación de las piezas (orientación, velocidad de impresión...), que han de ser guardadas anteriormente como archivo .stl. Una vez ejecutada la simulación de impresión 3D en este software, se obtendrá la longitud de material utilizado, el tiempo de impresión y la masa de material empleada.

La impresión de los prototipos ha tenido una duración de 21 horas y 51 minutos, empleándose una masa de 511,34 gramos y un volumen de 412,368 cm³. Una vez finalizada la impresión de los prototipos, se realiza el postprocesado, que es una fase que consiste en la extracción de los prototipos de la impresora DT, la eliminación del material de soporte de las piezas impresas y el lijado de las superficies más rugosas para conseguir un prototipo pulido.

Posteriormente, se procede a evaluar los costes de fabricación de las piezas originales y las piezas optimizadas. Para ello, se utilizará el fabricante *Hubs* para conocer el coste aproximado de fabricación de las piezas originales. Las geometrías originales se deben guardar como archivo .stp, y abrirlas en la página web del mismo fabricante. Ha de especificarse algunos parámetros como el acabado superficial, la tolerancia general, el tipo de material... También se elige el tipo de tecnología, que para los tres casos será CNC machining, ya que es un proceso de fabricación con buena eficiencia, precisión y versatilidad. Con todos los datos introducidos, la empresa Hubs proporciona los costes de fabricación de las piezas originales.

Es importante comentar que también se ha realizado el cálculo de los costes de fabricación de los prototipos (tanto originales como optimizados), ya que nos proporcionan una primera vista sobre la planificación financiera y presupuestos. Es decir, nos permitirá realizar un estudio desde la viabilidad económica hasta la optimización del diseño y la estrategia de precios.

Finalmente, con todos los costes de fabricación calculados, tanto para piezas sin optimizar como para piezas optimizadas, se realiza un análisis comparativo de los costes obtenidos. Como era de esperar, los costes de fabricación de las piezas optimizadas son menores que los de las piezas originales. Por lo tanto, se puede concluir que la optimización topológica ha resultado exitosa en términos económicos. Además, se ha conseguido conservar la funcionalidad para los tres productos de consumo tratados en el presente proyecto, mejorando la eficiencia y el rendimiento de cada uno de ellos.

La optimización topológica está alineada con numerosos Objetivos de Desarrollo Sostenible, ya que es una técnica de ingeniería de diseño muy innovadora y que está cada vez más implementada en las industrias. Además, contribuye a la sostenibilidad económica y ambiental, la reducción de costes y desechos, y la disminución de la huella ecológica de los productos.

ANALYSIS AND TOPOLOGICAL OPTIMISATION OF ELEMENTS FOR CONSUMER PRODUCTS

Author: Montero Ballesteros, Álvaro

Supervisor: Jiménez Calzado, Mariano

Collaborating Entity: ICAI-Comillas Pontifical University

ABSTRACT

The topological optimisation of several elements for consumer products has been carried out. For this purpose, these elements (fixed spanner, hydraulic pump support and bicycle crank) have been designed in SolidEdge and the necessary iterations of mass reduction have been carried out until an optimal structure has been achieved, in order to subsequently carry out 3D printing and analyse the final manufacturing costs.

Keywords: Additive manufacturing, topological optimisation, finite elements.

Topological optimisation is an essential technique for achieving stronger and cheaper products without compromising performance and durability. This method improves the quality and economy of products, obtaining significant benefits. Topological optimisation is a structural engineering challenge that seeks the most efficient configuration of materials in a design space, taking into account the necessary constraints and conditions.

This process is used in a variety of industries. In aerospace, it is used to manufacture internal components and engine mounts. In automotive, it is applied in the design of chassis and suspension elements. In medicine, it is used to design orthopaedic implants adapted to each patient. In the sports industry, it is used to manufacture bicycles, helmets and shoe soles. Topological optimisation has multiple applications and continues to develop.

Topological optimisation uses computational algorithms to explore options that maximise material efficiency without compromising structural integrity. This allows optimal solutions to be achieved that improve product performance and reduce costs.

Topological optimisation is posed as a mathematical problem, which uses a mathematical method known as the Finite Element Method (FEM). This method, which is used to solve topological optimisation problems, is based on discretising a part into smaller elements. These elements usually have a triangular structure, although they can also be tetrahedral, prismatic, hexahedral...

Each finite element is connected by nodes, which is the junction point of the contiguous elements. The aim of dividing the initial geometry into numerous finite elements is to go from an initial system with infinite degrees of freedom to another system that has a finite number of degrees of freedom. Thus, the behaviour of each and every one of the finite elements into which the initial geometry is to be divided can be analysed, since each element will have its own behaviour.

Finally, it will be possible to analyse and draw conclusions as to how the initial structure really behaves under the established boundary conditions.

The finite element method allows us to mesh the geometry. Meshing a geometry is the fundamental process of this method that allows the computational handling of finite elements.

The process generally starts with a solid part to which the necessary boundary conditions are applied for its topological optimisation. The objective is to remove material from non-critical areas, resulting in a geometry that uses as little material as possible while maintaining the structural integrity, functionality and efficiency of the part.

To this end, a working methodology has been followed in which, firstly, the design part to be optimised (fixed key, hydraulic pump support and bicycle crank) and its respective material are chosen. Subsequently, a study is made of all the restrictions and forces involved in the application process, in order to carry out finite element simulations. Then, iterative mass reductions are carried out until a design is obtained which, when the respective finite element simulation is carried out, complies with the established restrictions.

Finally, a material reduction of 20% has been achieved for the fixed key, a material reduction of 51% has been achieved for the pump bracket and a material reduction of 50% has been achieved for the bicycle crank. In other words, for these mass reductions, the maximum stress appearing in each part is the highest of all the iterations carried out and always lower than the elastic limit of the material assigned for each part.

Once the optimised parts have been obtained, the parts need to be refined, as the generative design resolution provided by SolidEdge does not leave the surfaces completely polished. For this, the Altair Inspire software is used, which is an industrial design program that allows the elimination of the roughness present on the surfaces of the parts, resulting in a part with smooth surfaces and greater efficiency and performance.

With the refined parts, a final finite element simulation is carried out to check that the optimised parts do not exceed the elastic limit (which, in general, they will not).

With all this, the parts are now ready for 3D printing. The prototypes, both optimised and unoptimised, will be printed using FDM (Fused Deposition Modeling) technology on the DT printer in the fabrication lab, using PLA as the printing material (a thermoplastic polymer with good printing quality and biodegradable).

This additive manufacturing technique was chosen due to its simplicity and low cost, compared to other printing techniques, as well as achieving an ideal production for functional prototypes.

As FDM is the 3D printing technique, the UltiMaker Cura programme has to be used for the preparation of the parts (orientation, printing speed...), which have to be previously saved as an .stl file. Once the 3D printing simulation has been run in this software, the length of material used, the printing time and the mass of material used will be obtained.

The printing of the prototypes lasted 21 hours and 51 minutes, using a mass of 511.34 grams and a volume of 412.368 cm³. Once the printing of the prototypes is finished, post-processing is carried out, which is a phase that consists of removing the prototypes from the DT printer, removing the support material from the printed parts and sanding the rougher surfaces to obtain a polished prototype.

Subsequently, the manufacturing costs of the original parts and the optimised parts are evaluated. To do this, the manufacturer Hubs will be used to find out the approximate manufacturing cost of the original parts. The original geometries must be saved as an .stp file and opened on the manufacturer's website. Some parameters must be specified, such as surface finish, general tolerance, type of material, etc.

The type of technology must also be chosen, which in all three cases will be CNC machining, as it is a manufacturing process with good efficiency, precision and versatility. With all the data entered, the Hubs company provides the manufacturing costs of the original parts.

It is important to note that we have also calculated the manufacturing costs of the prototypes (both original and optimised), as they provide us with a first view of the financial planning and budgets. In other words, it will allow us to carry out a study from the economic viability to the optimisation of the design and the pricing strategy.

Finally, with all the manufacturing costs calculated, both for non-optimised and optimised parts, a comparative analysis of the costs obtained is carried out. As expected, the manufacturing costs of the optimised parts are lower than those of the original parts. Therefore, it can be concluded that the topological optimisation has been successful in economic terms. In addition, functionality has been preserved for the three consumer products treated in this project, improving the efficiency and performance of each of them.

Topological optimisation is aligned with numerous Sustainable Development Goals, as it is a highly innovative design engineering technique that is increasingly implemented in industries. Furthermore, it contributes to economic and environmental sustainability, cost and waste reduction, and the reduction of the ecological footprint of products.

Índice de contenidos

1. Introducción.....	1
1.1. <i>Introducción a la optimización topológica</i>	1
1.2. <i>Elementos para productos de consumo</i>	5
1.3. <i>Objetivos y motivación del proyecto</i>	7
1.4. <i>Metodología de trabajo</i>	9
1.5. <i>Alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible</i>	11
2. Estado de la cuestión	14
2.1. <i>Contexto de la optimización topológica</i>	14
2.2. <i>Fundamentos de la optimización topológica</i>	15
2.3. <i>Método de elementos finitos en la optimización topológica</i>	17
3. Optimización topológica de las piezas	22
3.1. <i>Optimización topológica de la llave fija</i>	22
3.1.1. <i>Diseño de la llave fija</i>	23
3.1.2. <i>Material de la llave fija</i>	23
3.1.3. <i>Condiciones de contorno de la llave fija</i>	24
3.1.3. <i>Proceso iterativo de optimización topológica de la llave fija</i>	26
ITERACIÓN 1	30
ITERACIÓN 2.....	30
ITERACIÓN 3.....	32
ITERACIÓN 4.....	33
3.2. <i>Optimización topológica del soporte de una bomba</i>	37
3.2.1. <i>Diseño del soporte de una bomba</i>	37
3.2.2. <i>Material del soporte de una bomba</i>	38
3.2.3. <i>Condiciones de contorno del soporte de una bomba</i>	39
3.2.4. <i>Proceso iterativo de optimización topológica del soporte</i>	42
ITERACIÓN 1	43
ITERACIÓN 2.....	45
ITERACIÓN 3.....	46
ITERACIÓN 4.....	48
ITERACIÓN 5.....	49
ITERACIÓN 6.....	51
3.3. <i>Optimización topológica de la biela de una bicicleta</i>	54
3.3.1. <i>Diseño de la biela de una bicicleta</i>	54
3.3.2. <i>Material de la biela de una bicicleta</i>	55

3.2.3. Condiciones de contorno de la biela de una bicicleta	56
3.2.4. Proceso iterativo de optimización topológica de la biela	57
ITERACIÓN 1	59
ITERACIÓN 2	60
ITERACIÓN 3	61
ITERACIÓN 4	62
ITERACIÓN 5	63
ITERACIÓN 6	64
ITERACIÓN 7	65
4. Fabricación aditiva de las piezas	68
4.1. <i>Impresión de los prototipos</i>	68
5. Análisis de resultados	75
5.1. <i>Coste de fabricación de los prototipos</i>	75
5.2. <i>Coste de fabricación de las piezas originales</i>	79
5.2.1. Coste de fabricación de la llave fija original	80
5.2.2. Coste de fabricación del soporte original	81
5.2.3. Coste de fabricación de la biela original	82
5.3. <i>Coste de fabricación de las piezas optimizadas</i>	84
5.3.1. Coste de fabricación de la llave fija optimizada	84
5.3.2. Coste de fabricación del soporte optimizado	85
5.3.3. Coste de fabricación de la biela optimizada	86
5.4. <i>Comparativa de costes entre piezas originales y optimizadas</i>	88
6. Conclusiones	90
7. Referencias	92

Índice de ilustraciones

Ilustración 1. Ejemplo de proceso de optimización topológica.....	2
Ilustración 2. Diagrama de flujo de diseño para impresión 3D.....	2
Ilustración 3. Ejemplo de optimización topológica de una pieza.....	3
Ilustración 4. Ejemplo de elemento para producto de consumo.....	5
Ilustración 5. Objetivos de Desarrollo Sostenible.....	11
Ilustración 6. Diagrama de flujo de optimización topológica.....	16
Ilustración 7. Ejemplo de discretización de una pieza por elementos finitos.....	17
Ilustración 8. Ejemplo de distintos tamaños de mallado.....	18
Ilustración 9. Ejemplo de distintas geometrías de mallado.....	19
Ilustración 10. Ejemplos de mallado estructurado.....	19
Ilustración 11. Ejemplos de mallado no estructurado.....	20
Ilustración 12. Menú de mallado de SolidEdge.....	20
Ilustración 13. Ejemplo de aplicación de la llave fija.....	22
Ilustración 14. Vista 3D de la llave fija.....	23
Ilustración 15. Propiedades del acero inoxidable.....	24
Ilustración 16. Restricción fija de la llave fija.....	25
Ilustración 17. Aplicación de fuerzas en la llave fija.....	25
Ilustración 18. Menú de mallado de SolidEdge.....	26
Ilustración 19. Selección del tipo de estudio.....	27
Ilustración 20. Simulación FEM con el 100% de masa.....	27
Ilustración 21. Opción de "Preservar región" en Diseño generativo.....	28
Ilustración 22. Opción de "Fuerza" en Diseño generativo.....	28
Ilustración 23. Opción de "Fijo" en Diseño generativo.....	29

Ilustración 24. Opción de "Simetría plana" en Diseño generativo	29
Ilustración 25. Menú de generación de reducción de masa	29
Ilustración 26. Llave fija con un 10% de reducción de masa	30
Ilustración 27. Simulación FEM de la llave fija con un 10% de reducción de masa	30
Ilustración 28. Llave fija con un 25% de reducción de masa	31
Ilustración 29. Llave fija con un 25% de reducción de masa redistribuida.....	31
Ilustración 30. Simulación FEM de la llave fija con un 25% de reducción de masa	32
Ilustración 31. Llave fija con un 22% de reducción de masa	32
Ilustración 32. Llave fija con un 22% de reducción de masa redistribuida.....	33
Ilustración 33. Simulación FEM de la llave fija con un 22% de reducción de masa	33
Ilustración 34. Llave fija con un 20% de reducción de masa	34
Ilustración 35. Llave fija con un 20% de reducción de masa redistribuida.....	34
Ilustración 36. Simulación FEM de la llave fija con un 20% de reducción de masa	35
Ilustración 37. Menú PolyNurbs de Altair Inspire.....	35
Ilustración 38. Refinado de la llave fija por Altair Inspire	36
Ilustración 39. Ejemplo de aplicación del soporte de la bomba	37
Ilustración 40. Vista 3D del soporte de la bomba.....	38
Ilustración 41. Propiedades del aluminio 5050	39
Ilustración 42. Restricción fija del soporte de la bomba	40
Ilustración 43. Aplicación de la fuerza 1 en el soporte.....	40
Ilustración 44. Aplicación de la fuerza 2 en el soporte.....	41
Ilustración 45. Menú de mallado de SolidEdge.....	41
Ilustración 46. Selección del tipo de estudio	42
Ilustración 47. Simulación FEM con el 100% de masa.....	43
Ilustración 48. Soporte de la bomba con un 40% de reducción de masa	44

Ilustración 49. Simulación FEM del soporte de la bomba con un 40% de reducción de masa	44
Ilustración 50. Soporte de la bomba con un 60% de reducción de masa	45
Ilustración 51. Simulación FEM del soporte de la bomba con un 60% de reducción de masa	46
Ilustración 52. Soporte de la bomba con un 55% de reducción de masa	47
Ilustración 53. Simulación FEM del soporte de la bomba con un 55% de reducción de masa	47
Ilustración 54. Soporte de la bomba con un 50% de reducción de masa	48
Ilustración 55. Simulación FEM del soporte de la bomba con un 50% de reducción de masa	49
Ilustración 56. Soporte de la bomba con un 52% de reducción de masa	50
Ilustración 57. Simulación FEM del soporte de la bomba con un 52% de reducción de masa	50
Ilustración 58. Soporte de la bomba con un 51% de reducción de masa	51
Ilustración 59. Simulación FEM del soporte de la bomba con un 51% de reducción de masa	52
Ilustración 60. Refinado del soporte de la bomba	53
Ilustración 61. Ejemplo de aplicación de la biela de la bicicleta.....	54
Ilustración 62. Vista 3D de la biela de bicicleta	55
Ilustración 63. Propiedades del aluminio 5050	55
Ilustración 64. Restricción fija de la biela de la bicicleta.....	56
Ilustración 65. Aplicación de la fuerza 1 en la biela de la bicicleta	56
Ilustración 66. Menú de mallado de SolidEdge.....	57
Ilustración 67. Selección del tipo de estudio	58
Ilustración 68. Simulación FEM con el 100% de masa.....	58
Ilustración 69. Biela de la bicicleta con un 30% de reducción de masa.....	59

Ilustración 70. Simulación FEM de la biela de la bicicleta con un 30% de reducción de masa	60
Ilustración 71. Biela de la bicicleta con un 40% de reducción de masa.....	60
Ilustración 72. Simulación FEM de la biela de la bicicleta con un 40% de reducción de masa	61
Ilustración 73. Mensaje de error al hacer reducción del 60% de masa	61
Ilustración 74. Biela de la bicicleta con un 56% de reducción de masa.....	62
Ilustración 75. Simulación FEM de la biela de la bicicleta con un 56% de reducción de masa	63
Ilustración 76. Biela de la bicicleta con un 50% de reducción de masa.....	63
Ilustración 77. Simulación FEM de la biela de la bicicleta con un 50% de reducción de masa	64
Ilustración 78. Biela de la bicicleta con un 54% de reducción de masa.....	64
Ilustración 79. Simulación FEM de la biela de la bicicleta con un 54% de reducción de masa	65
Ilustración 80. Biela de la bicicleta con un 51% de reducción de masa.....	65
Ilustración 81. Simulación FEM de la biela de la bicicleta con un 51% de reducción de masa	66
Ilustración 82. Refinado de la biela de una bicicleta.....	67
Ilustración 83. Vista preliminar de la impresión 3D de la llave fija original.....	69
Ilustración 84. Vista preliminar de la impresión 3D de la llave fija optimizada	69
Ilustración 85. Vista preliminar de la impresión 3D del soporte original.....	70
Ilustración 86. Vista preliminar de la impresión 3D del soporte optimizado	70
Ilustración 87. Vista preliminar de la impresión 3D de la biela original.....	70
Ilustración 88. Vista preliminar de la impresión 3D de la biela optimizada.....	71
Ilustración 89. Resultado de la impresión de los prototipos.....	71
Ilustración 90. Impresión del prototipo de la llave fija original	72
Ilustración 91. Impresión del prototipo de la llave fija optimizada.....	72

Ilustración 92. Impresión del prototipo del soporte original	73
Ilustración 93. Impresión del prototipo del soporte optimizado.....	73
Ilustración 94. Impresión del prototipo de la biela original	74
Ilustración 95. Impresión del prototipo de la biela optimizada	74
Ilustración 96. Coste de fabricación del modelo de llave fija original por CNC	80
Ilustración 97. Coste de fabricación del modelo de llave fija original por I3D	80
Ilustración 98. Fabricación del modelo de soporte original por CNC.....	81
Ilustración 99. Coste de fabricación del modelo del soporte original por I3D.....	82
Ilustración 100. Coste de fabricación del modelo de la biela original por CNC.....	82
Ilustración 101. Coste de fabricación del modelo de la biela original por I3D.....	83
Ilustración 102. Coste de fabricación del modelo de llave fija optimizada por CNC	84
Ilustración 103. Coste de fabricación del modelo de llave fija optimizada por I3D	85
Ilustración 104. Coste de fabricación del modelo del soporte optimizado por I3D	85
Ilustración 105. Fabricación del modelo de la biela optimizada por CNC.....	86
Ilustración 106. Coste de fabricación del modelo de la biela optimizada por I3D	86

Índice de tablas

Tabla 1. Coste de fabricación del prototipo de la llave fija original.....	76
Tabla 2. Coste de fabricación del prototipo de la llave fija optimizada	76
Tabla 3. Coste de fabricación del prototipo de soporte de la bomba original	77
Tabla 4. Coste de fabricación del prototipo de soporte de la bomba optimizado.....	77
Tabla 5. Coste de fabricación del prototipo de la biela original	78
Tabla 6. Coste de fabricación del prototipo de la biela optimizada.....	78
Tabla 7. Resumen de costes de fabricación de los modelos originales	83
Tabla 8. Resumen de costes de fabricación de los modelos optimizados.....	87
Tabla 9. Resumen de costes de fabricación de las piezas originales y optimizadas.....	88

1. Introducción

1.1. Introducción a la optimización topológica

El diseño y la ingeniería de productos destinados al consumo cotidiano se encuentran constantemente con el desafío de mejorar la eficiencia y la funcionalidad de los elementos que componen dichos productos. En este contexto, el análisis y la optimización topológica emergen como herramientas fundamentales para lograr productos más resistentes y económicos, sin modificar ni comprometer su rendimiento ni su durabilidad en el tiempo. Se hará uso, por lo tanto, de la optimización topológica para mejorar tanto la calidad como la economía de los productos, obteniendo así beneficios.

La optimización topológica se caracteriza por ser un desafío de optimización en el ámbito de la ingeniería estructural, con el propósito de encontrar la configuración más eficiente de materiales dentro de un espacio de diseño particular, considerando restricciones y condiciones de contorno específicas. Utiliza algoritmos computacionales para explorar opciones que maximicen la eficiencia en el uso de materiales sin comprometer la integridad estructural. Esto permite alcanzar soluciones óptimas que mejoran el rendimiento del producto y reducen costos.

Este proceso industrial se emplea en diferentes campos de la industria. Se utiliza en la industria aeroespacial, para la fabricación de componentes internos o soportes de motores, entre otros. También tiene aplicaciones en la industria de la automoción; por ejemplo, para el diseño de chasis o elementos de suspensión. Otro campo de aplicación muy interesante es la medicina; ya que la optimización topológica permite diseñar implantes ortopédicos de manera que se ajusten al paciente. También se emplea en la industria del deporte; desde la fabricación de bicicletas, cascos o hasta suelas de zapatillas. Existen más campos de aplicación de la optimización topológica, ya que es una tecnología que actualmente se está desarrollando cada vez más...

El proceso de optimización topológica, generalmente, empieza con una pieza o espacio de diseño llena de material (maciza) a la que se aplican todas las condiciones de contorno necesarias para su optimización.

El objetivo de la optimización topológica es quitar material de la pieza original, y remover la masa resultante en las áreas críticas, de manera que resulta una geometría que emplea el mínimo material posible con el fin de mantener la integridad estructural de la pieza, su funcionalidad y su eficiencia. En la siguiente ilustración, se muestra el proceso de optimización topológica en varias iteraciones hasta conseguir la pieza resultante:

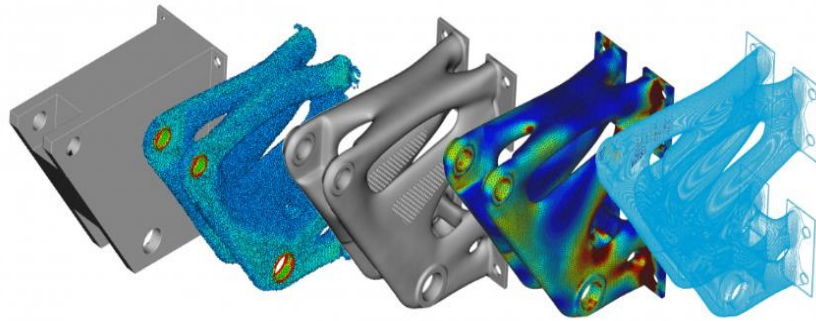


Ilustración 1. Ejemplo de proceso de optimización topológica

En este trabajo, se llevarán a cabo las técnicas necesarias para la obtención de productos más sostenibles y competitivos en el mercado. Se realizará el análisis detallado de la aplicación de elementos empleados en diferentes productos de consumo, de cara a la mejora de la fase de diseño con criterios de optimización topológica (minimizando el peso, conservando los requisitos de resistencia), aplicación de estructura Lattice y la fabricación posterior mediante tecnologías de impresión 3D.

Para el diseño del producto, se sigue un proceso que se muestra en la siguiente ilustración:

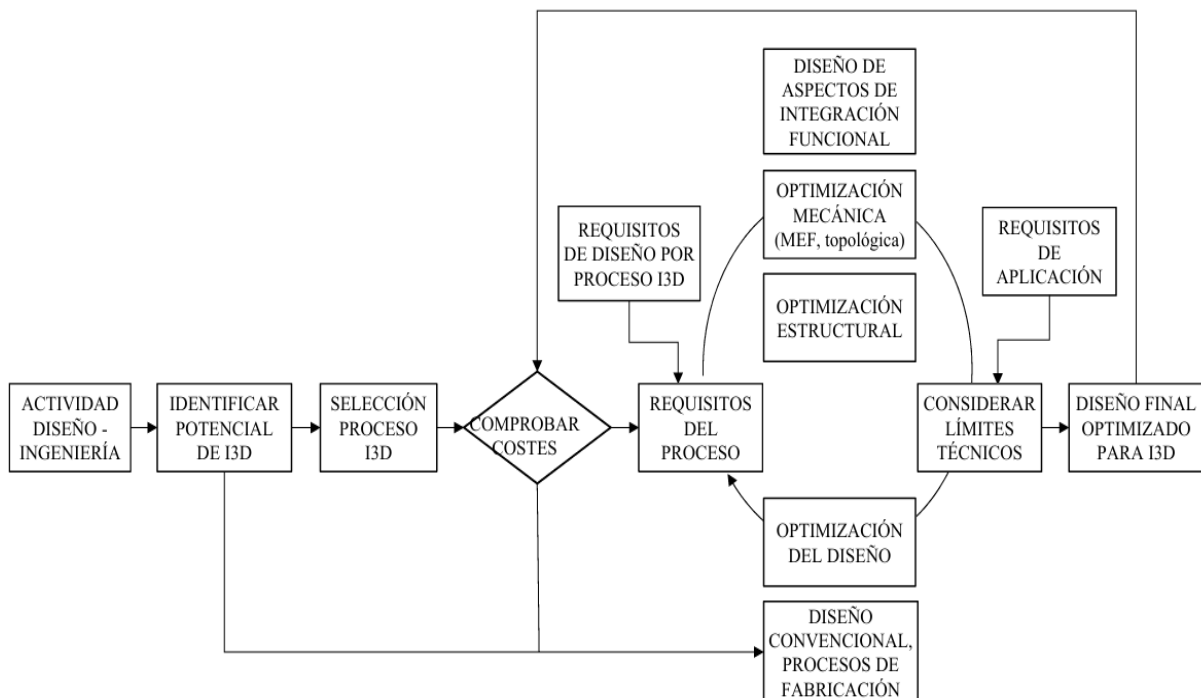


Ilustración 2. Diagrama de flujo de diseño para impresión 3D

El diagrama de flujo anterior es bastante completo en comparación con otros procesos; aunque, realmente, se seguirán otros pasos para la optimización topológica de las piezas que se diseñarán en este trabajo.

Primeramente, se diseñará en SolidEdge la pieza en cuestión. Posteriormente, se le aplica a la pieza todas las condiciones de contorno necesarias para su correcta definición; y finalmente, se genera una nueva pieza optimizada una vez verificado su rendimiento y eficiencia mediante un proceso iterativo. A continuación, se puede ver un ejemplo de optimización topológica de una pieza:



Ilustración 3. Ejemplo de optimización topológica de una pieza

En los siguientes apartados, se observarán ejemplos reales de las piezas que se han optimizado.

El futuro de la optimización topológica es cuanto menos prometedor, ya que se realizan constantes avances en softwares y algoritmos que facilitan la fabricación de piezas por procesos de optimización topológica. Dichos algoritmos se están volviendo cada vez más sofisticados y eficientes, permitiendo la resolución de problemas de complejidad alta en problemas de mayor sencillez; obteniendo una distribución de material en las piezas que nunca antes se podía conseguir.

Además, el software está en constante progreso. Las herramientas utilizadas (CAD, entre otras) integran funciones cada vez más avanzadas, en lo que a la optimización topológica

se refiere. De esta manera, se permite a los ingenieros y diseñadores mecánicos obtener una resolución de la pieza mejor, mejorando su funcionalidad y su eficiencia.

1.2. Elementos para productos de consumo

Los productos de consumo son bienes diseñados y fabricados en la vida cotidiana para los consumidores, y satisfacen las necesidades del consumidor. Estos productos abarcan un gran abanico de campos: automoción, aviación, dispositivos electrónicos, electrodomésticos... Desde el ámbito de la ingeniería, se debe diseñar y fabricar estos productos con la mayor eficiencia, durabilidad y rendimiento posibles, minimizando los costes; para la aceptación en el mercado masivo.

En el contexto de la ingeniería mecánica, los elementos para productos de consumo son aquellos componentes individuales que conforman dicho producto. Estos elementos son piezas específicas y distintas entre sí, cada una de ellas con sus funciones y características. Las principales características de estos elementos son su funcionalidad (cada elemento tiene una función específica), su interdependencia (conectados entre sí para el funcionamiento del producto completo) y material (cada elemento está fabricado con el material que más se ajuste a sus requerimientos).

En el presente proyecto, se diseñarán algunos elementos que forman parte de estos productos. A continuación, se puede observar un ejemplo de elemento y su respectivo producto:



Ilustración 4. Ejemplo de elemento para producto de consumo

En la anterior ilustración, se puede observar el soporte amortiguador de dirección, que es un componente esencial en los sistemas de dirección de los vehículos; ya que proporciona estabilidad y control al absorber las vibraciones que se transmiten de la carretera al volante.

En el presente proyecto, se diseñarán algunos elementos para productos de consumo, muy similares al ejemplo mostrado anteriormente en la imagen. De esta manera, se conseguirá

reducir el uso de material, consiguiendo una mayor eficiencia, rendimiento y una disminución de costes.

1.3. Objetivos y motivación del proyecto

El objetivo del proyecto, y de la optimización topológica, es encontrar la distribución del material más rentable dentro de la estructura/objeto a analizar; siempre y cuando se cumplan los criterios de resistencia y todas las restricciones necesarias para su uso sin ningún tipo de inconveniente.

Sin embargo, no es una tarea fácil de llevar debido a su difícil fabricación. Se ha de analizar, primeramente, la pieza con CAD (o alguna otra tecnología 3D que permita el estudio de la pieza en cuestión), para posteriormente convertirlo a estructura Lattice y finalmente comprobar si la estructura final cumple con los mismos requisitos de resistencia y durabilidad que la estructura inicial. Por lo tanto, los objetivos principales son:

- Minimizar el uso del material
- Reducir el peso de la pieza
- Reducir los costes y aumentar el beneficio
- Mejorar la eficiencia y el rendimiento

En cuanto al ámbito personal, uno de mis principales objetivos es mejorar el manejo en SolidEdge (que será el programa de diseño a utilizar en el presente trabajo). Se utilizarán técnicas de modelado, se emplearán todas las herramientas necesarias para realizar simulaciones en las piezas y se hará uso del diseño generativo que ofrece el programa SolidEdge.

Además, en el presente proyecto se utilizará el software Altair Inspire, que es un programa de diseño industrial que permitirá el suavizado de las superficies de las piezas. Este programa se utilizará con las piezas ya optimizadas (conseguidas con ayuda del programa SolidEdge), y nos permitirá crear un refinamiento en la pieza final sin rugosidades en las superficies.

Otro de mis objetivos es la utilización de impresoras 3D, que será necesaria para la fabricación de la estructura Lattice (que será la pieza resultado final de todo el estudio y análisis realizado en el proyecto).

La motivación de este proyecto consiste en ser capaz de modificar la estructura de una pieza a estructura Lattice, con el objetivo de reducir el uso de material para la fabricación de la pieza y reducir los costes, conservando el rendimiento y mejorando la eficiencia del elemento de consumo.

La optimización topológica de elementos de consumo se realizará con el uso del programa SolidEdge. A nivel profesional, siempre me ha parecido muy interesante este tipo de programas mecánicos para el estudio ingenieril. Por esta razón, es una gran oportunidad realizar el Trabajo de Fin de Máster haciendo uso de SolidEdge para mejorar el manejo con este programa y dedicarme a ello en un posible futuro.

1.4. Metodología de trabajo

Se utilizarán diversos programas en este proyecto. En primer lugar, se utilizará SolidEdge, para representar el elemento de consumo a analizar y optimizar. También se podría utilizar Ansys o SolidWorks, pero se utilizará SolidEdge preferiblemente. Se tratará de definir la pieza en 3D, para luego aplicar todos los esfuerzos y/o momentos que actúan en el elemento de consumo y simular la pieza. Es por ello, que SolidEdge propone con gran precisión la solución que se buscará para minimizar el uso de material para la construcción del elemento de consumo y reducir los costes. También se utilizará el programa Altair Inspire, que es un software de simulación y optimización de diseño que permitirá eliminar las rugosidades que haya en las superficies de la pieza, resultando más eficiente y de mayor rendimiento.

Para la realización de este proyecto, se seguirá una metodología de trabajo. En primer lugar, se debe elegir la pieza a diseñar. En este proyecto se elegirán tres piezas a optimizar.

Primeramente, se diseñarán mediante el programa SolidEdge las piezas. Posteriormente, para cualquiera de las geometrías, se hará un estudio de las condiciones de contorno: todas las fuerzas que intervienen en la pieza, las partes fijas, el material a aplicar y el mallado (que generalmente se escogerá el mallado por defecto que proporciona SolidEdge). Una vez conocidas las condiciones de contorno, se hará una simulación FEM (finite element method) de la pieza en cuestión. Así, se conocerá de primera mano cuál es la tensión máxima que sufre la pieza para un 100% de masa.

Posteriormente, se procede a quitar masa mediante un proceso iterativo hasta conseguir la optimización topológica de la pieza. Para ello, se empezará reduciendo la masa de la pieza un 30%. Al tener ahora menos masa en la pieza, la tensión máxima que sufre la pieza será mayor que la que tendría la pieza con el 100% de masa.

El objetivo es ir aumentando la disminución de masa hasta conseguir que la tensión máxima sea lo más próxima al límite elástico del material de la pieza (en ningún caso la tensión máxima de la pieza debe ser superior a su límite elástico, siempre debe ser inferior).

Una vez conseguida la pieza con su porcentaje de reducción de masa, se guarda dicho archivo de SolidEdge como .stl para abrirlo en el software Altair Inspire. Este programa incluye la opción PolyNurbs, mediante la cual se ajustará toda la pieza para conseguir que la superficie sea más suave y detallada con respecto a la solución que proporciona SolidEdge. De esta manera, se mejorará la estética de la pieza dejando todas las superficies lisas y pulidas, quedando mejor refinada.

Posteriormente, este archivo de Altair Inspire se abre en SolidEdge para realizar una última simulación FEM, con el fin de comprobar que la pieza no romperá en ningún caso. Esta simulación es una mera comprobación, ya que no romperá la pieza, pero siempre viene bien asegurar.

Finalmente, las piezas estarán listas para su impresión en 3D en la impresora 3D del laboratorio de ICAI. Paralelamente, se hará una comparación entre el precio inicial (con el 100% de masa) y el precio de la pieza optimizada (con reducción de material).

Se recogerán todas las conclusiones que sean necesarias a partir de los resultados obtenidos, proporcionando todos los detalles que hacen que la pieza optimizada sea más eficiente, barata y de mayor rendimiento.

1.5. Alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible

En el año 2015, las Naciones Unidas establecieron los Objetivos de Desarrollo Sostenible, que son un conjunto de objetivos a cumplir con el propósito de proteger nuestro planeta, hacer frente a la pobreza y velar por la prosperidad de la sociedad de generación en generación.

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible son el plan a seguir para garantizar un futuro sostenible para la sociedad. En la siguiente imagen, se muestran los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible, para los que, posteriormente, se han seleccionado y explicado brevemente cuales de ellos están directamente relacionados con el proyecto de optimización:



Ilustración 5. Objetivos de Desarrollo Sostenible

En relación con este proyecto, los objetivos más importantes son: Trabajo decente y crecimiento económico (8), Industria, innovación e infraestructura (9), Ciudades y comunidades sostenibles (11), Producción y consumo responsables (12) y Acción por el clima (13).

- Trabajo decente y crecimiento económico

La optimización topológica impulsa la innovación en el diseño de nuevos productos. De esta manera, se pueden crear nuevas oportunidades de empleo en diversos campos como

la ingeniería, la investigación o la manufactura avanzada. Además, al diseñar componentes más ligeros como consecuencia del ahorro de material, se contribuye a un crecimiento económico debido al ahorro de estos costes y a la reducción del desperdicio de material.

➤ **Industria, innovación e infraestructura**

Con ayuda de la optimización topológica, se pueden diseñar elementos más resistentes y de mayor rendimiento. Esto es fundamental para la construcción de infraestructuras más modernas, como puentes o coches.

La capacidad de desarrollar diseños optimizados puede conducir a avances significativos en la producción y fabricación industrial. Esto incluye la fabricación de componentes más ligeros y fuertes, lo que podría tener un impacto significativo en industrias como la automoción, la aeroespacial y la construcción.

➤ **Ciudades y comunidades sostenibles**

Se puede utilizar la optimización topológica para el diseño de infraestructuras más ligeras y más resistentes, contribuyendo a la creación de ciudades y comunidades más sostenibles. De hecho, los diseños optimizados tienen mayor durabilidad y resistencia; por lo que los nuevos diseños favorecen la construcción de comunidades más seguras y sostenibles.

Además, al reducir el material utilizado, se contribuye a reducir la huella ecológica de las ciudades, favoreciendo un desarrollo urbano más sostenible.

➤ **Producción y consumo responsables**

Uno de los objetivos de la optimización topológica consiste en la reducción de material. De esta manera, se diseñan productos que utilizan la cantidad de material necesaria; reduciendo así el desperdicio de material y favoreciendo un uso de los recursos más eficiente. Además, se generan menos residuos en los procesos de fabricación, lo que hace que la producción sea más responsable y sostenible.

➤ **Acción por el clima**

Al realizar productos más ligeros y eficientes, se reducirá el consumo de energía y, por consiguiente, las emisiones de CO₂ (especialmente en el campo de la automoción y la aviación). De esta manera, se contribuye a la mitigación del cambio climático. Además, la optimización topológica se puede emplear para diseñar componentes de equipos de energías renovables, favoreciendo el uso de tecnologías renovables en lugar de combustibles fósiles.

Por otro lado, al aplicarse optimización topológica en el diseño de estructuras y edificios más eficientes, se reduce el uso de energía (refrigeración y calefacción), contribuyendo así a la reducción del consumo energético.

En resumen, la optimización topológica guarda relación con una gran variedad de Objetivos de Desarrollo Sostenible al promover la innovación en tecnologías y procesos industriales, la eficiencia y la reducción de residuos.

2. Estado de la cuestión

2.1. Contexto de la optimización topológica

La optimización topológica es una herramienta moderna muy importante en la ingeniería de diseño de productos. Esto es debido a la creación de estructuras con la suficiente eficiencia que utilizan la menor cantidad de material posible; dentro de los límites de resistencia, rendimiento y funcionalidad de la pieza. Gracias a los avances en algoritmos, software y técnicas de fabricación, los ingenieros pueden estudiar nuevas formas y configuraciones que antes eran impensables con esta técnica.

La teoría de la optimización estructural, que se desarrolló a mediados del siglo XX, sirve como base para la optimización topológica. Al principio, las técnicas de optimización estructural se enfocaron en el objetivo de maximizar la rigidez y el peso de las estructuras bajo condiciones específicas. La optimización topológica comenzó a ganar popularidad en las décadas de 1980 y 1990 junto con el avance de las habilidades computacionales y los métodos numéricos.

Hoy en día, la optimización topológica es de gran relevancia debido a causas como la eficiencia de material, mejora en el rendimiento de la pieza, compatibilidad con manufactura aditiva, diseño innovador...

Hoy en día los recursos son cada vez más limitados, por lo que es fundamental tener la capacidad de minimizar el uso de materiales en el diseño de productos. Esto, aparte de reducir los costes de producción y fabricación, también reduce el consumo de materiales y la generación de desechos.

Los productos pueden alcanzar un rendimiento mayor en cuanto a resistencia, eficiencia y vida útil al realizar la optimización topológica del material. Esto es crucial para campos de la ingeniería como el sector aeroespacial o el sector de la automoción, donde el rendimiento estructural es fundamental.

El desarrollo de la manufactura aditiva, también conocida como impresión 3D, ha permitido la creación de formas complejas que se derivan de la optimización topológica. Esto ha abierto nuevas perspectivas en el diseño y la fabricación de productos, brindando más libertad de diseño y la capacidad de producir componentes optimizados y personalizados.

2.2. Fundamentos de la optimización topológica

La optimización topológica tiene como objetivo distribuir el material de la pieza dentro de unas condiciones previamente especificadas para aumentar el rendimiento de la pieza y minimizar los recursos y costes.

La optimización topológica es realmente un problema matemático de optimización en el que se busca maximizar la función objetivo (cantidad de masa de material a reducir) sin comprometer la eficiencia, siempre y cuando se cumplan todas las especificaciones de diseño establecidas por el diseñador. Dichas especificaciones, o restricciones, son las condiciones de contorno, límites de volumen, restricciones de desplazamiento y restricciones de tensiones.

Las condiciones de contorno establecen el comportamiento de la pieza en cuestión y todas las restricciones que se deben cumplir durante el proceso de diseño con el objetivo de que la pieza final sea óptima. En el presente trabajo, las condiciones de contorno que se definirán son las partes fijas de la pieza inicial, las zonas de la pieza que se desean conservar, las fuerzas que actúan durante el proceso de optimización, el material de la pieza y simetría plana (para la optimización de la llave fija).

En la siguiente imagen, se puede observar el proceso que se sigue en la optimización topológica para conseguir una pieza de menor material, sin comprometer el límite elástico de la pieza ni su rendimiento:

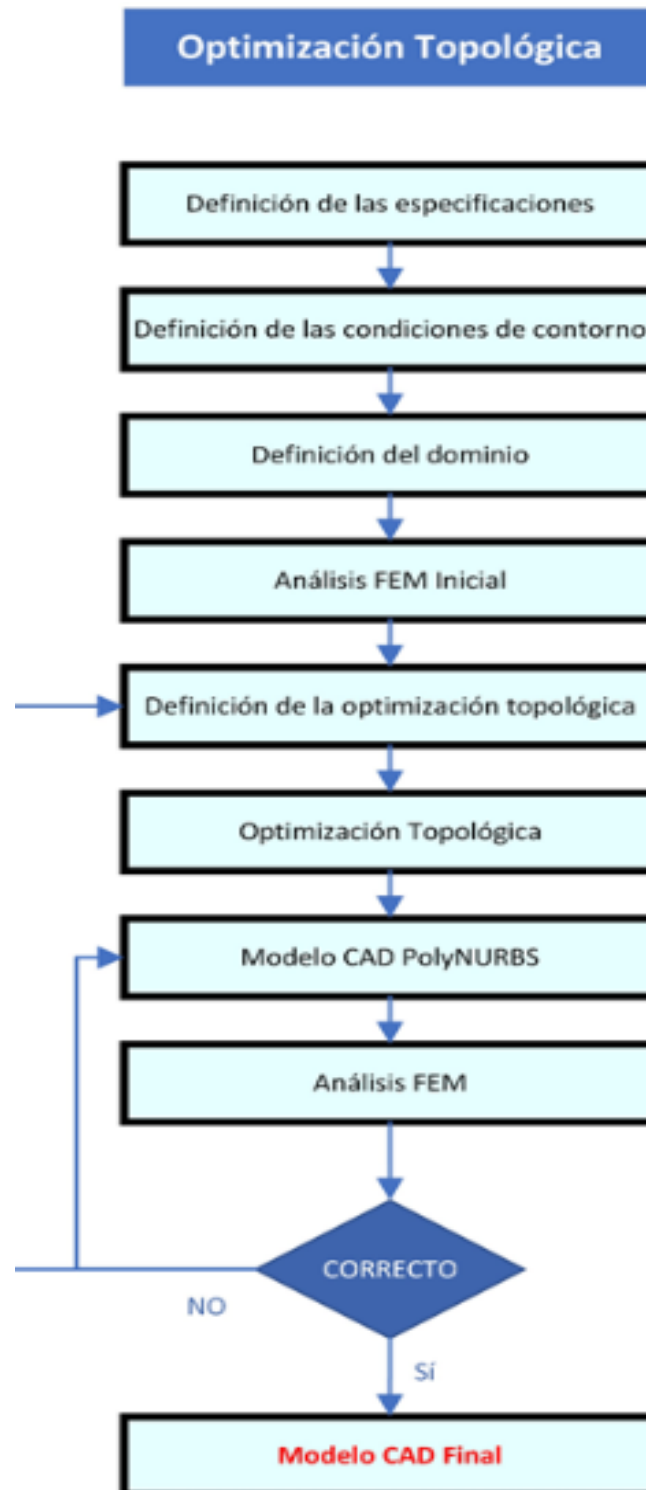


Ilustración 6. Diagrama de flujo de optimización topológica

2.3. Método de elementos finitos en la optimización topológica

La optimización topológica se plantea como un problema matemático, como se ha comentado anteriormente. Es decir, parte de unos métodos matemáticos que utilizan una serie de parámetros y variables que permiten resolver el problema. El principal método matemático para la resolución de los problemas de optimización topológica es el Método de Elementos Finitos (FEM).

El método de Elementos Finitos (FEM) es una herramienta empleada para resolver problemas de optimización, se basa en discretizar una pieza en elementos más pequeños. Estos elementos suelen tener una estructura triangular, aunque también puede ser tetraédrica, prismática, hexaédrica... Cada elemento finito se conecta por nodos, que es el punto de unión los elementos contiguos. A continuación, se puede observar en la siguiente imagen una figura que ha sido discretizada por elementos finitos:

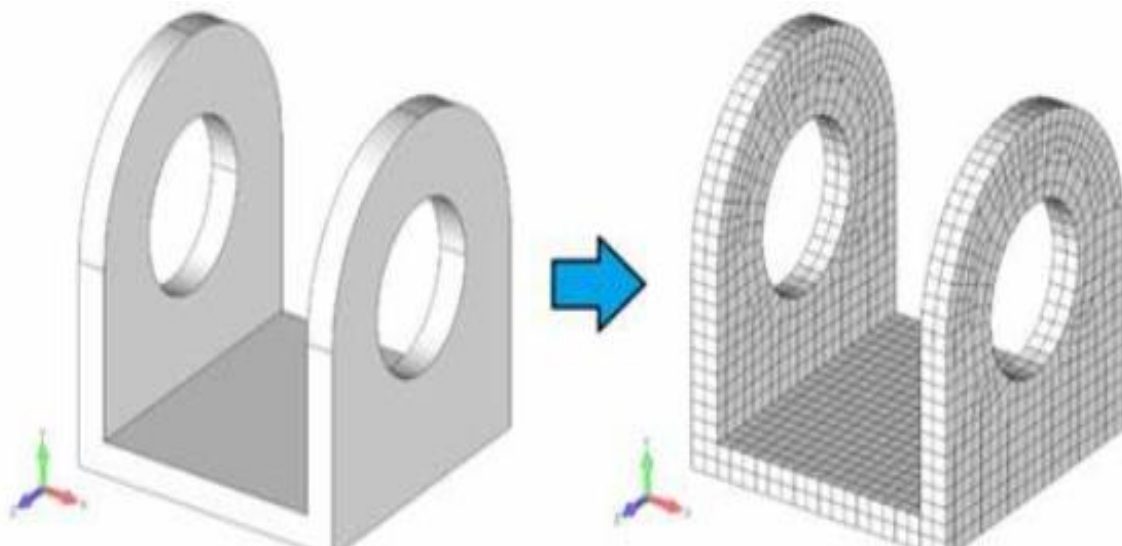


Ilustración 7. Ejemplo de discretización de una pieza por elementos finitos

El objetivo de dividir la geometría inicial en numerosos elementos finitos es pasar de un sistema inicial con infinitos grados de libertad a otro sistema que tiene un número finito de grados de libertad. Así, se puede analizar cómo se comporta todos y cada uno de los elementos finitos en los que se ha deseado dividir la geometría inicial, ya que cada elemento tendrá su propio comportamiento; para finalmente, analizar y sacar conclusiones de cómo se comporta realmente la estructura inicial ante las condiciones de contorno establecidas.

En el presente proyecto se utilizará el método de elementos finitos para mallar la geometría. Mallar una geometría es el proceso fundamental de este método y consiste en

dividir el dominio continuo de una geometría en elementos más pequeños (elementos finitos), que pueden ser manejados de manera computacional. Por lo tanto, una malla está compuesto por el elemento finito (triangular/cuadrilátero en 2D, tetraédrico/hexagonal en 3D) y el nodo; como se ha comentado anteriormente.

A la hora de discretizar una geometría, es fundamental tener en cuenta el tamaño del mallado y la geometría del mismo.

Elegir bien el tamaño del mallado es muy importante en el método de elementos finitos. Una de las principales razones por las que se debe elegir un buen tamaño de mallado es la precisión de los resultados. Esto tiene su fundamento en que un mallado fino permite capturar detalles más finos de la pieza; además, se reduce el error de discretización, ya que se reduce al tener un mallado más fino. Otras razones importantes del tamaño de la malla son la estabilidad numérica, la eficiencia computacional y obtención de resultados más realistas. En la siguiente imagen, se muestra un ejemplo de distintos tamaños de mallado:

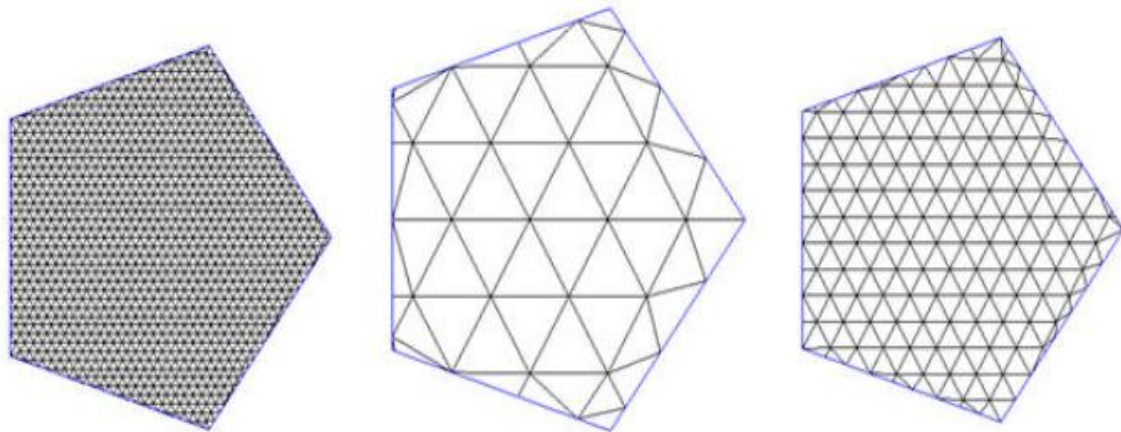


Ilustración 8. Ejemplo de distintos tamaños de mallado

Por otro lado, es importante elegir una buena geometría de mallado, ya que afecta a la precisión y eficiencia del cálculo. Un buen mallado se debe ajustar a la forma de la geometría, ya que una malla que no sigue de manera adecuada el contorno de la pieza puede llevar a errores significativos. Además, en algunas superficies es crucial aplicar una geometría de mallado que se adapte con las características de la pieza (como agujeros o esquinas). Al igual que el tamaño de mallado, se debe elegir una buena geometría de mallado para minimizar los errores de cálculo; una geometría inapropiada puede dar lugar a soluciones poco realistas. A continuación, se muestra un ejemplo de una pieza con distintos mallados geométricos:

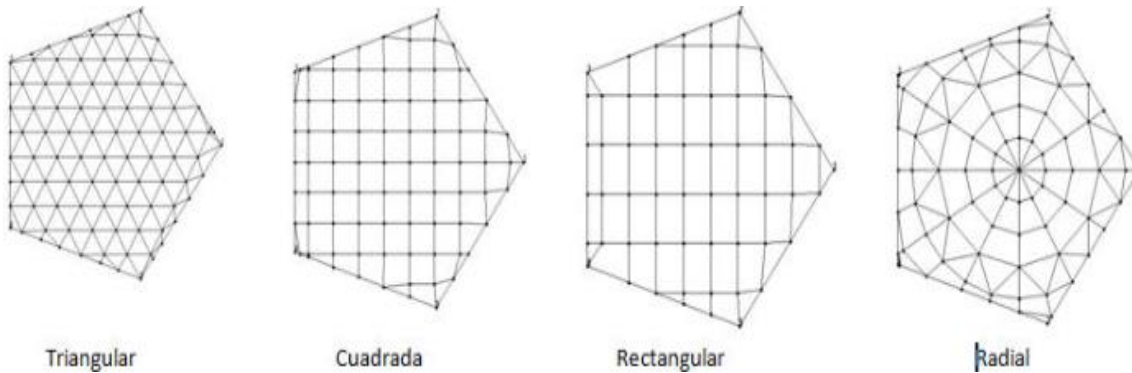


Ilustración 9. Ejemplo de distintas geometrías de mallado

Existen dos tipos de mallado: el mallado estructurado y el mallado no estructurado.

El mallado estructurado se caracteriza por tener una disposición geométrica regular, a diferencia del mallado no estructurado. Las ventajas de tener un mallado estructurado en una geometría son una mayor eficiencia computacional, mayor simplicidad y una mayor facilidad en la derivación de ecuaciones.

En el presente proyecto, se realizará un mallado estructural debido a la simplicidad de la pieza; ya que es irrelevante realizar un mallado no estructurado para las piezas que se desean optimizar topológicamente (ya que son geometrías simples). En la siguiente imagen, se puede observar un ejemplo de mallado estructurado:

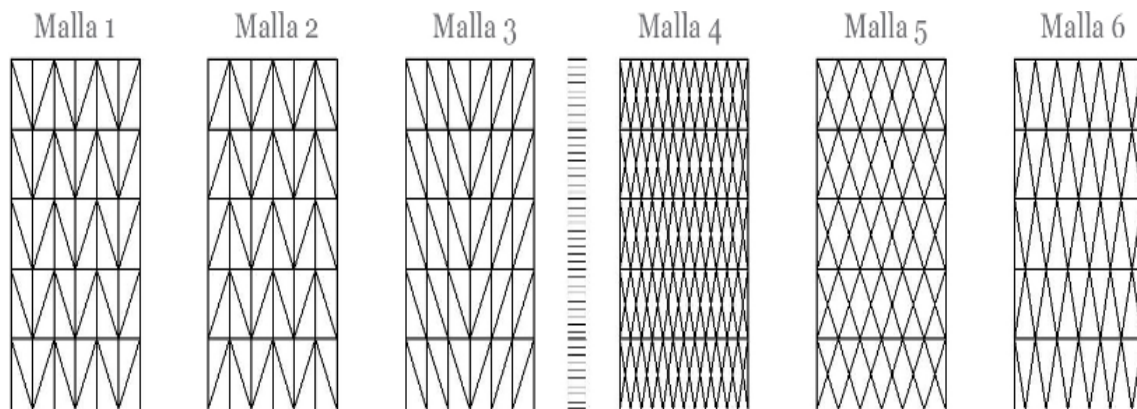


Ilustración 10. Ejemplos de mallado estructurado

En la imagen se puede observar los diferentes mallados; todos y cada uno de ellos son mallados estructurados, a diferencia del tamaño o distribución de mallado.

En cuanto al mallado no estructurado, este tipo no sigue un patrón regular, sino que las distintas zonas de la geometría está dividida en elementos finitos distintos entre sí. Esto es: la distribución de dichos elementos finitos es irregular, los elementos tienen distinta forma (tetraédrica y hexagonal simultáneamente) o ambas situaciones se dan al mismo

tiempo. Este tipo de mallado presenta varias ventajas respecto al mallado estructurado: se consigue una mejor representación de detalles finos y formas irregulares, se puede refinar áreas de interés y tiene una mejor resolución para problemas de mayor complejidad. Las mallas no estructuradas se emplean generalmente en geometrías de mayor complejidad y requisitos precisos. En la siguiente ilustración, se muestra un ejemplo de mallado no estructurado:

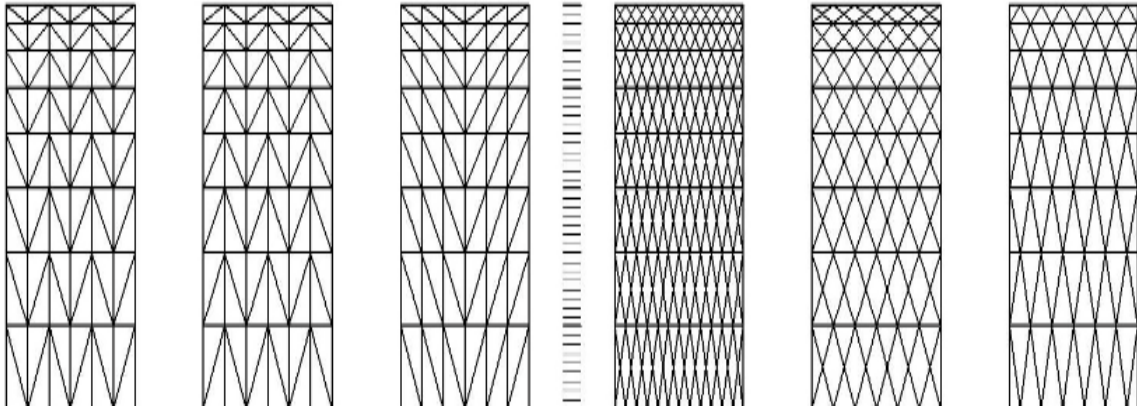


Ilustración 11. Ejemplos de mallado no estructurado

En la ilustración anterior se puede observar los diferentes ejemplos de mallas; todos y cada uno de ellos son mallados no estructurados, a pesar de que cada uno de ellos tiene un tamaño o distribución de mallado distinto.

El programa SolidEdge, utilizado para la optimización topológica de las piezas, ofrece una gran variedad de opciones a la hora de mallar la geometría.

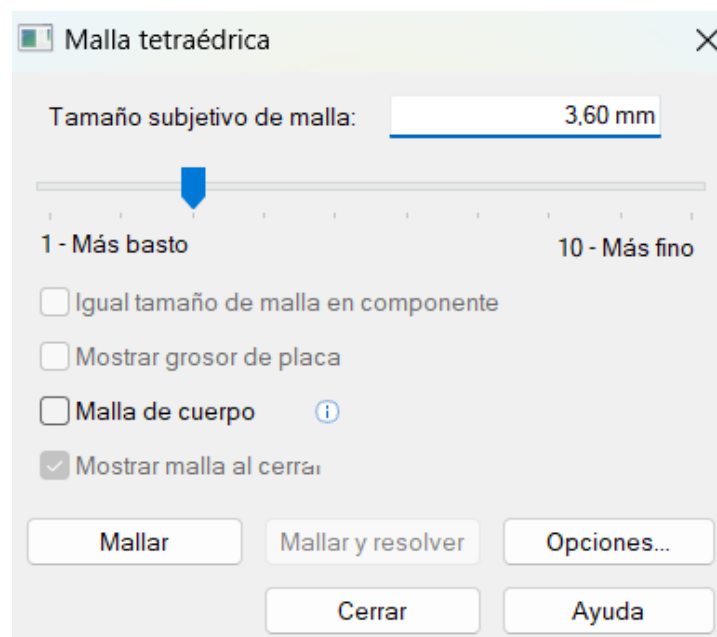


Ilustración 12. Menú de mallado de SolidEdge

El menú de mallado que ofrece SolidEdge es muy amplio, pero se elegirá un mallado por defecto generalmente; exceptuando los casos en los que sea necesario un mallado más fino para obtener unos resultados más precisos para la optimización topológica.

3. Optimización topológica de las piezas

En este capítulo se llevará a cabo el proceso de optimización topológica de las piezas en cuestión (llave fija, soporte de bomba y biela de una bicicleta). Para ello, primeramente, se deben diseñar dichas piezas en SolidEdge. Posteriormente, se asigna el material adecuado a cada pieza y las condiciones de contorno. Con la pieza ya preparada, se procede a reducir el porcentaje de masa mediante un proceso iterativo, hasta conseguir un porcentaje de masa que no sobrepase el límite elástico del material de la pieza. Una vez conseguida la optimización topológica de la pieza, se debe hacer un refinamiento, mediante Altair Inspire, para suavizar las superficies y así conformar una estructura más eficiente.

3.1. Optimización topológica de la llave fija

Una llave fija es una herramienta ingenieril muy versátil, que tiene una gran cantidad de aplicaciones. Su funcionalidad consiste en apretar o aflojar tornillos y tuercas de diferentes tamaños. Las aplicaciones de una llave fija son las siguientes: industria del automovilismo, fontanería, construcción, carpintería, electrónica... En la siguiente imagen, se muestra un ejemplo de aplicación de la llave fija:



Ilustración 13. Ejemplo de aplicación de la llave fija

3.1.1. Diseño de la llave fija

Con la ayuda de SolidEdge, se procede a diseñar la geometría de la llave fija. La llave fija presenta una altura de 3 mm. En las siguientes imágenes, se puede observar la geometría de la llave fija:

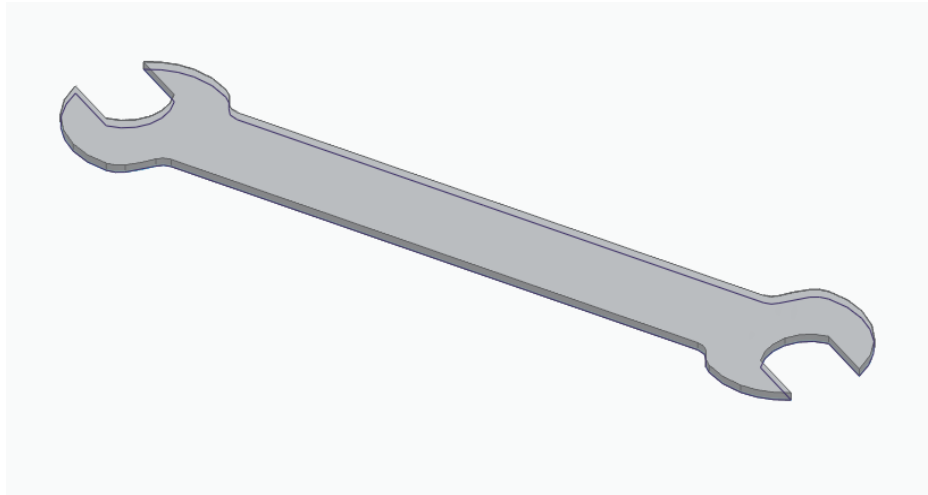


Ilustración 14. Vista 3D de la llave fija

3.1.2. Material de la llave fija

A continuación, se procede a asignar el material adecuado para la llave fija. El mejor material posible para la llave fija es el acero inoxidable. El acero inoxidable presenta una alta resistencia a la corrosión y resistencia mecánica, una larga vida útil y durabilidad, resistencia a la temperatura y facilidad de limpieza, entre otras características. A continuación, se muestran las propiedades del acero inoxidable:

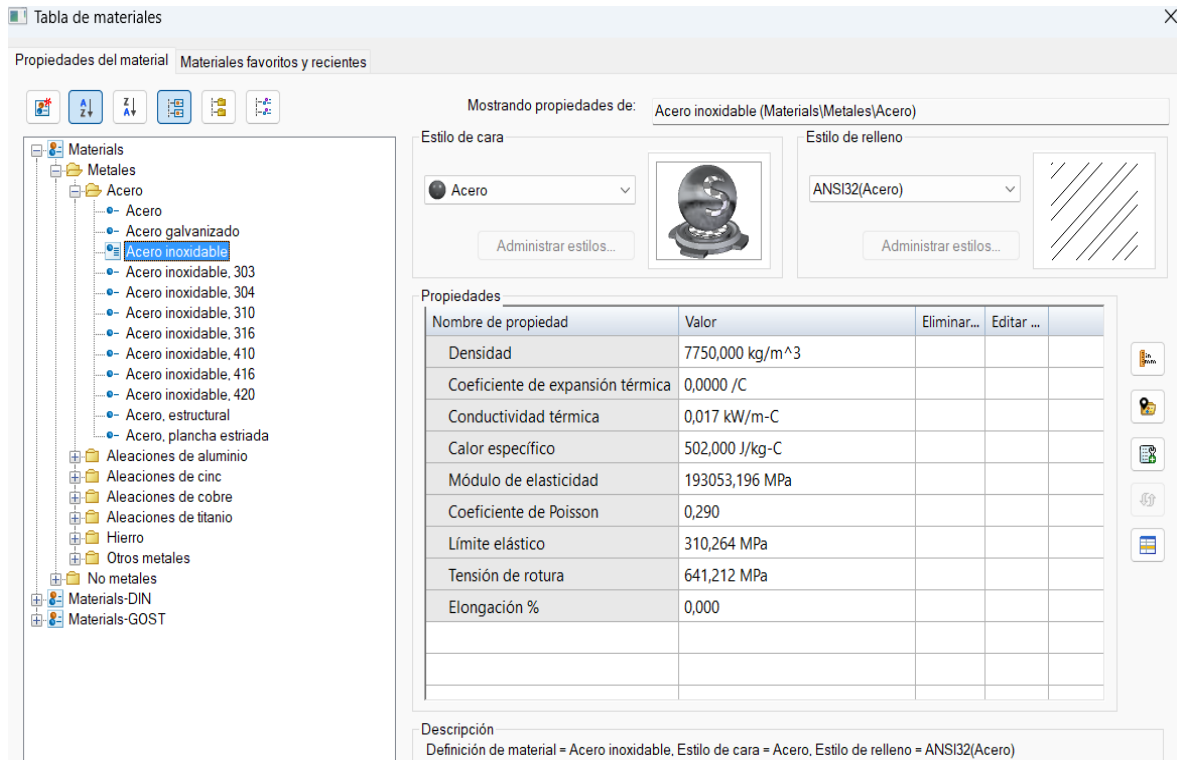


Ilustración 15. Propiedades del acero inoxidable

3.1.3. Condiciones de contorno de la llave fija

Las condiciones de contorno son las restricciones físicas impuestas en los límites de un dominio donde se resuelven los problemas de diseño.

En el caso de la llave fija, será necesario definir como condiciones de contorno las partes fijas de la pieza (aquellas que quedan inmóviles durante el proceso de aplicación) y las fuerzas que intervienen.

Por la geometría de la pieza, se ha elegido los cabezales de la llave fija como partes fijas. El propio programa permite hacer simetría de fuerzas y restricciones a la hora de realizar el diseño generativo; por lo tanto, se hará la simulación para un solo cabezal. En la siguiente imagen, se muestra la restricción del cabezal donde iría el tornillo en cuestión:

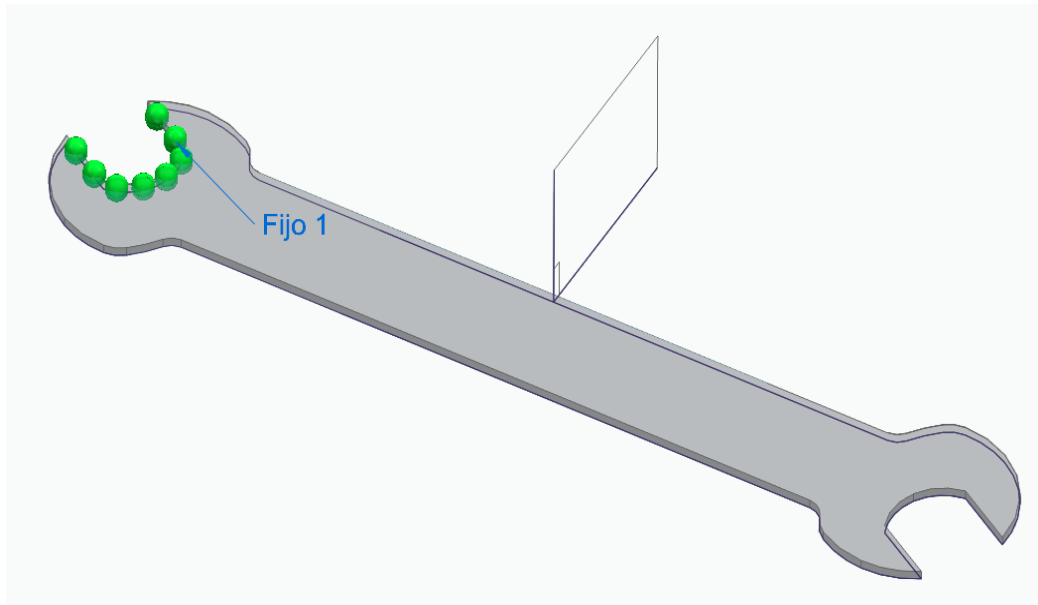


Ilustración 16. Restricción fija de la llave fija

En la imagen anterior, se muestra el plano de simetría; dicho plano nos permitirá optimizar la pieza de manera simétrica, de modo que se pueda utilizar la llave fija por cualquier lado indistintamente.

A continuación, se aplican las cargas/fuerzas que intervienen. Se ha asignado una carga lateral de 500 N en el extremo contrario al fijo, como se puede observar en la siguiente imagen:

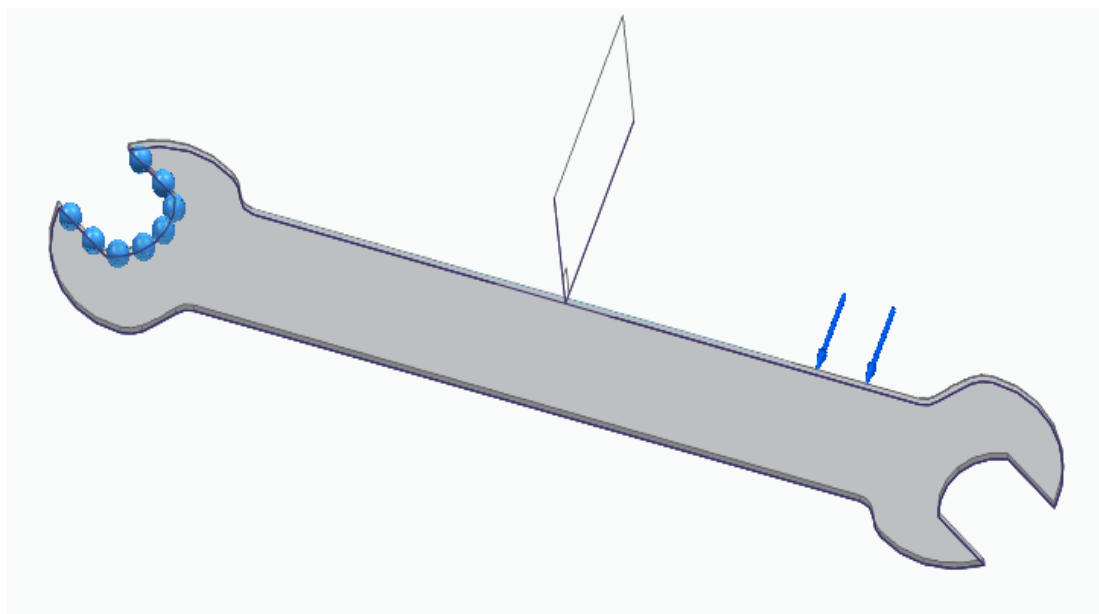


Ilustración 17. Aplicación de fuerzas en la llave fija

Por último, será necesario aplicar el mallado a la geometría. En la siguiente imagen, se muestra el menú del programa utilizado y todas las posibles opciones:

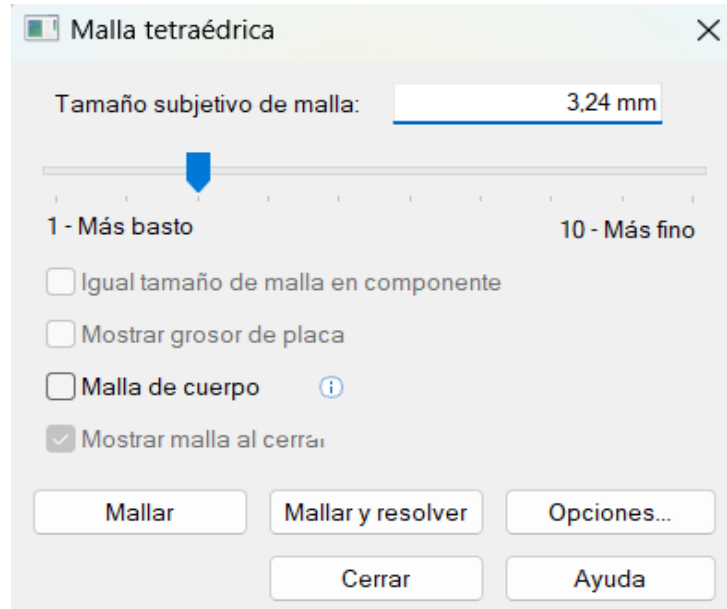


Ilustración 18. Menú de mallado de SolidEdge

Por lo general, se aplicará un mallado por defecto; salvo en algunas iteraciones en las que sea necesario refinar el mallado para obtener mejores detalles de las partes de la pieza que más sufren. Respecto a la geometría de mallado, en todos los casos se empleará un mallado tetraédrico.

3.1.3. Proceso iterativo de optimización topológica de la llave fija

Antes de realizar el proceso iterativo, se realiza una primera simulación FEM de la pieza; es decir, con el 100% de masa. Se debe realizar este primer estudio para comprobar que la pieza es capaz de soportar las cargas aplicadas bajo las condiciones de contorno impuestas.

Para ello, se debe realizar un estudio estático lineal, que es un tipo de análisis que consiste en determinar el comportamiento de una estructura bajo suposiciones lineales y cargas estáticas. El propio programa permite la opción de seleccionar el tipo de estudio:



Ilustración 19. Selección del tipo de estudio

Se aplicará un estudio estático lineal para todas las iteraciones que sean necesarias durante el proceso de optimización topológica.

Una vez definidas las restricciones, cargas y el mallado, se obtienen los siguientes resultados:

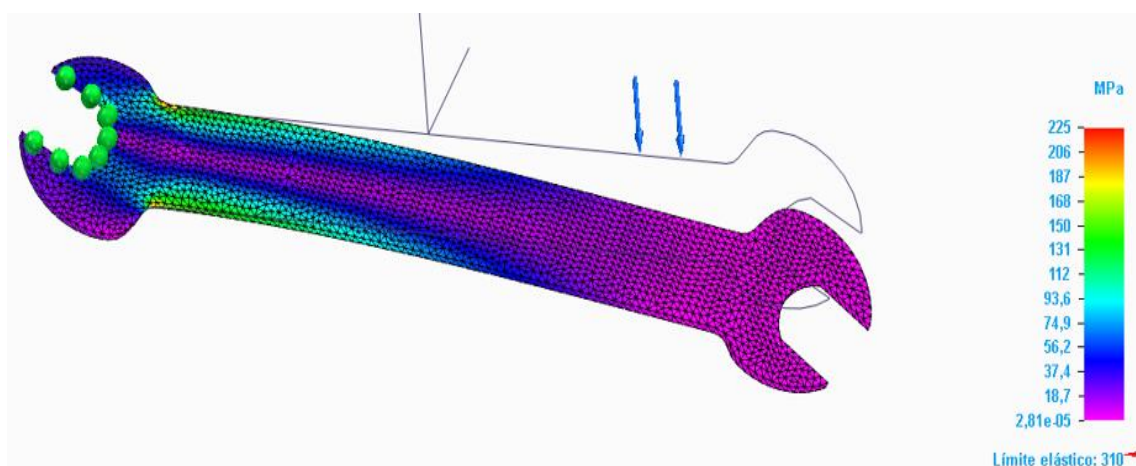


Ilustración 20. Simulación FEM con el 100% de masa

Se puede observar en la imagen que la tensión máxima en la pieza es de 225 MPa, muy inferior al límite elástico del acero inoxidable (310 MPa). Esto significa que en ningún momento la pieza se romperá; por lo que se puede realizar una reducción de masa para minimizar el uso de material, siempre que la tensión máxima obtenida sea menor que el límite elástico del material.

Una vez se ha comprobado que la pieza no rompe, se procede a realizar la reducción de masa. Para ello, se deben aplicar los criterios de diseño generativo para poder iniciar el proceso de optimización topológica.

Primeramente, se deben seleccionar las superficies a preservar, es decir, aquellas que queremos que permanezcan intactas después de la reducción de masa. Por lo tanto, para

la llave fija, se deseará preservar los cabezales y todos los bordes (para que la llave fija siga manteniendo la misma forma). A continuación, se muestra la opción de “Preservar región” de SolidEdge:



Ilustración 21. Opción de "Preservar región" en Diseño generativo

Posteriormente, se seleccionan las cargas, es decir, las fuerzas que intervienen durante el proceso de aplicación de la llave fija. A continuación, se muestra la opción de “Fuerza” de SolidEdge:

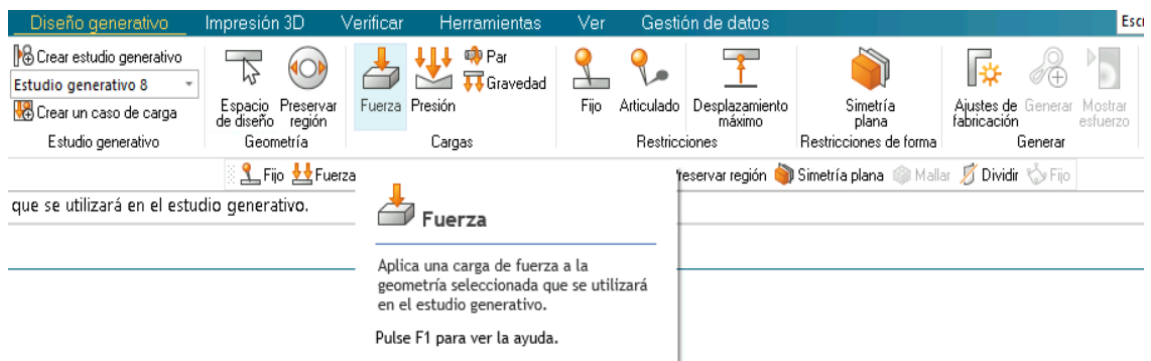


Ilustración 22. Opción de "Fuerza" en Diseño generativo

Posteriormente, se seleccionan las partes fijas, es decir, las partes de la llave fija que permanecerán inmóviles durante su proceso de aplicación. A continuación, se muestra la opción de “Fijo” de SolidEdge:



Ilustración 23. Opción de "Fijo" en Diseño generativo

Finalmente, se seleccionan la opción “Simetría plana”, que permitirá crear un diseño generativo que sea totalmente simétrico a partir de un plano. A continuación, se muestra la opción de “Simetría plana” de SolidEdge:



Ilustración 24. Opción de "Simetría plana" en Diseño generativo

Una vez establecido todos los criterios de diseño generativo, ya se puede generar la reducción de masa y empezar las iteraciones necesarias para la optimización topológica de la pieza. En la siguiente imagen, se muestran las opciones de diseño generativo:

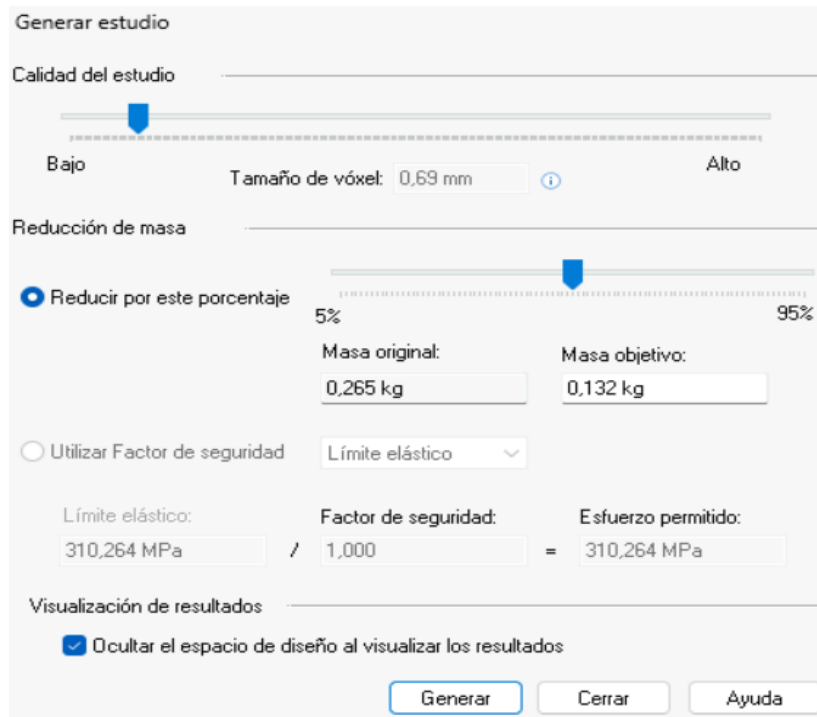


Ilustración 25. Menú de generación de reducción de masa

Inicialmente, se elegirá un 10% de reducción de masa para la primera iteración. Una vez obtenido el diseño generativo para cada iteración, se hará una simulación FEM para conocer la tensión máxima que sufre la pieza y compararla con respecto al límite elástico del acero inoxidable.

ITERACIÓN 1

En la primera iteración, se hará una reducción de masa del 10%, con una calidad de estudio de 30, obteniéndose la siguiente geometría:

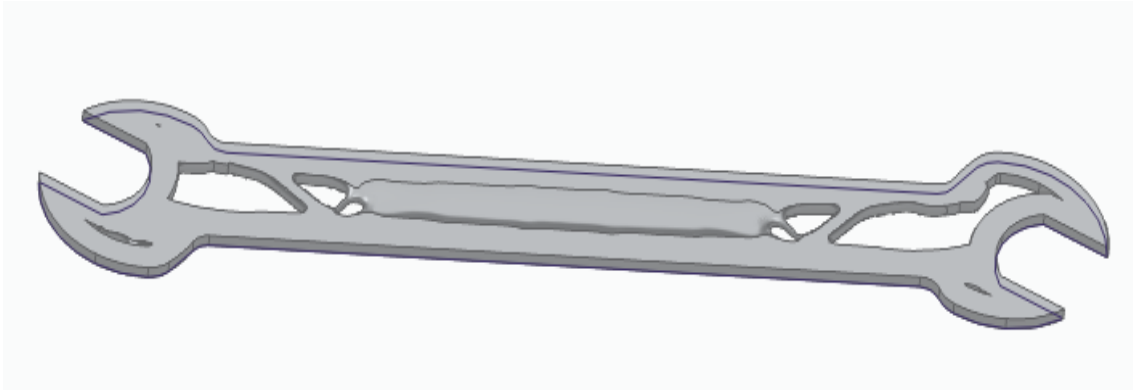


Ilustración 26. Llave fija con un 10% de reducción de masa

A continuación, se procede a realizar una simulación FEM para conocer la tensión máxima de la nueva geometría:

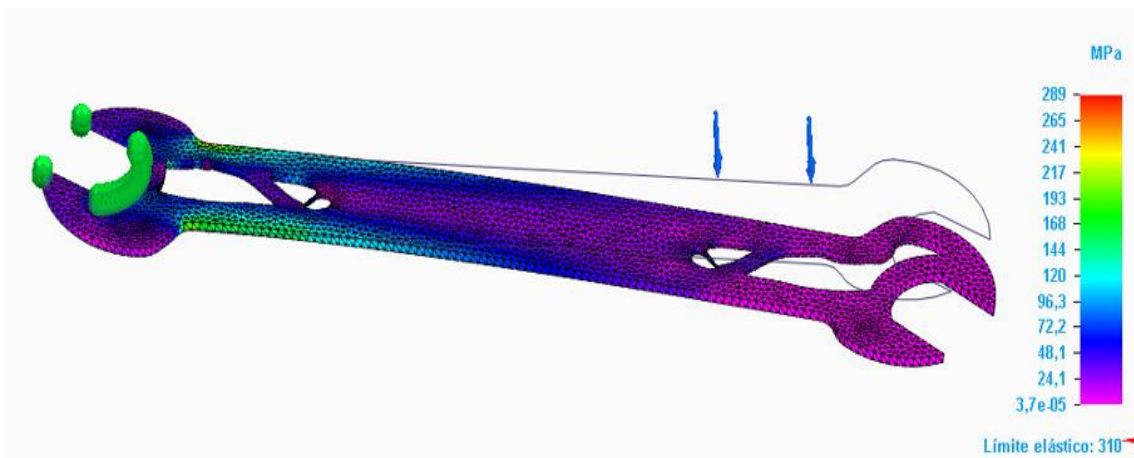


Ilustración 27. Simulación FEM de la llave fija con un 10% de reducción de masa

Como se puede observar, la tensión máxima es de 289 MPa, inferior al límite elástico (310 MPa); por lo que se concluye que la pieza no rompe y se puede reducir más material mediante una nueva iteración.

ITERACIÓN 2

En la segunda iteración, se hará una reducción de masa del 25%, con una calidad de estudio de 30, obteniéndose la siguiente geometría:

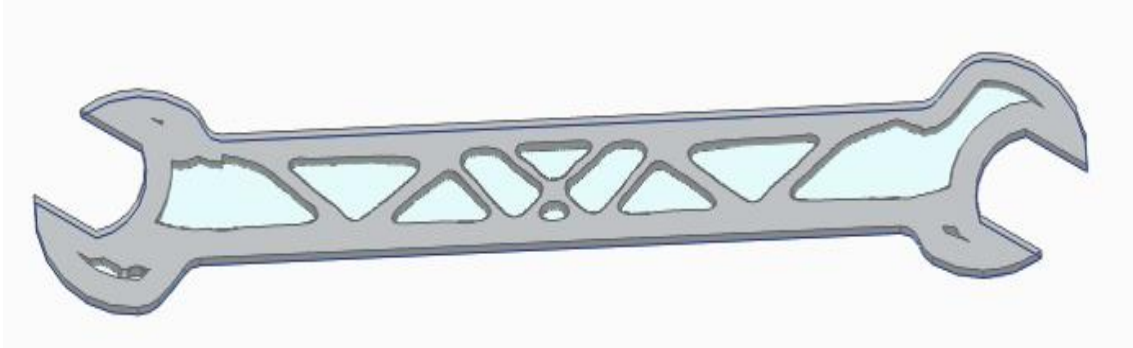


Ilustración 28. Llave fija con un 25% de reducción de masa

Como se puede observar, SolidEdge ha hecho una reducción de masa en ambos cabezales; lo que conlleva a hacer un ajuste manual de esta iteración, redistribuyendo la masa de manera que los cabezales sigan intactos:

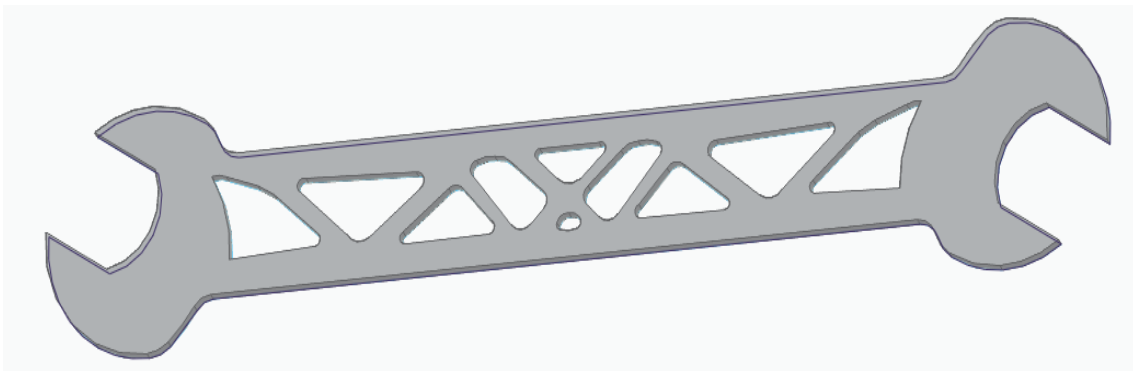


Ilustración 29. Llave fija con un 25% de reducción de masa redistribuida

En la imagen anterior, se observa que se preservan las regiones de los cabezales y dicho porcentaje de masa se redistribuye por el mango de la llave fija hasta cubrir el 25% de masa. Posteriormente, se procede a realizar una simulación FEM para conocer la tensión máxima de esta iteración:

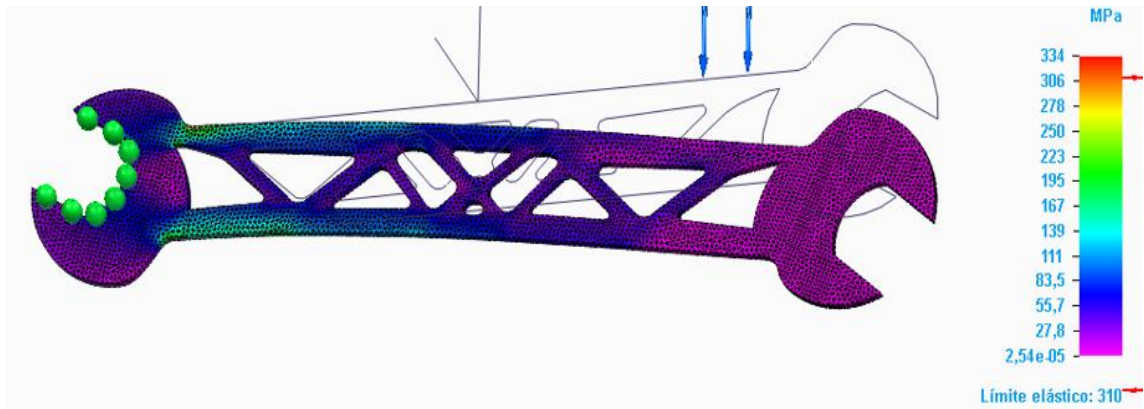


Ilustración 30. Simulación FEM de la llave fija con un 25% de reducción de masa

Se puede observar en la imagen anterior que la tensión máxima de la pieza es de 334 MPa, que es superior al límite elástico del acero inoxidable. Esto significa que la pieza rompería para esta reducción de masa; por lo que se elegirá un porcentaje de masa menor en la siguiente iteración.

ITERACIÓN 3

En la tercera iteración, se hará una reducción de masa del 22%, con una calidad de estudio de 30, obteniéndose la siguiente geometría:

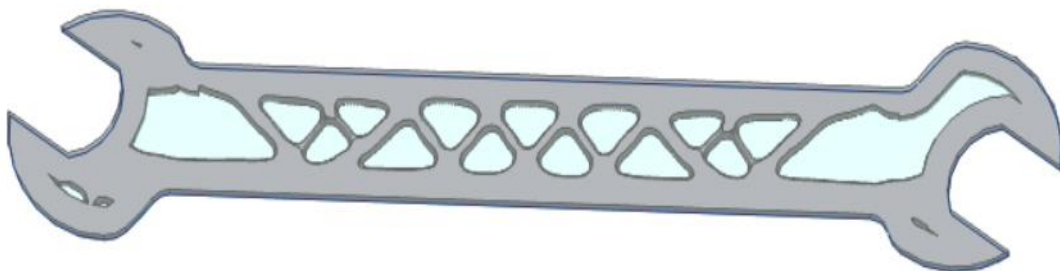


Ilustración 31. Llave fija con un 22% de reducción de masa

Como se puede observar, SolidEdge ha hecho una reducción de masa en ambos cabezales; lo que conlleva a hacer un ajuste manual de esta iteración, redistribuyendo la masa de manera que los cabezales sigan intactos:

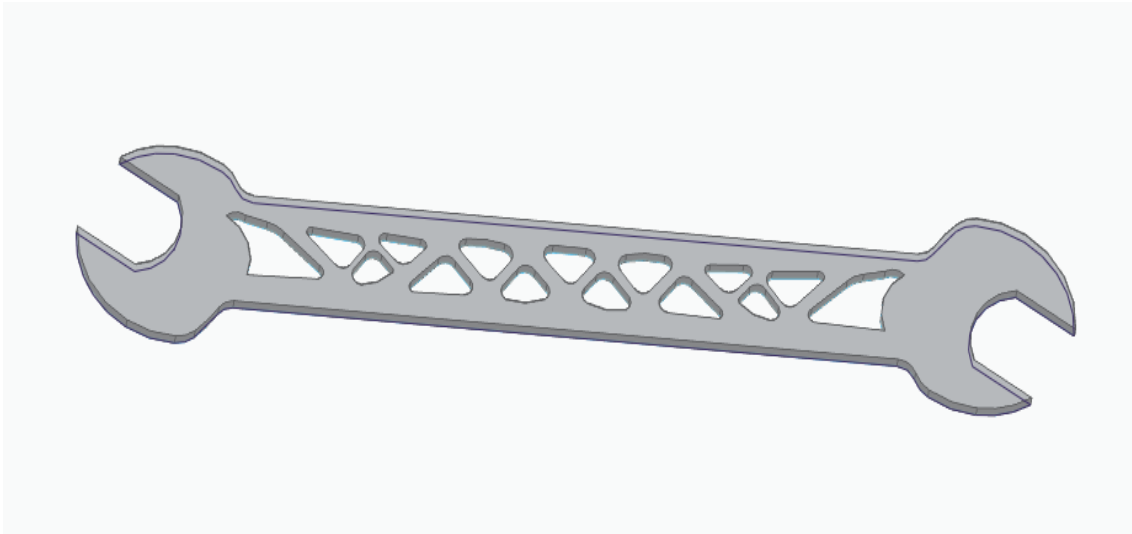


Ilustración 32. Llave fija con un 22% de reducción de masa redistribuida

En la imagen anterior, se observa que se preservan las regiones de los cabezales y dicho porcentaje de masa se redistribuye por el mango de la llave fija hasta cubrir el 20% de masa. Posteriormente, se procede a realizar una simulación FEM para conocer la tensión máxima de esta iteración:

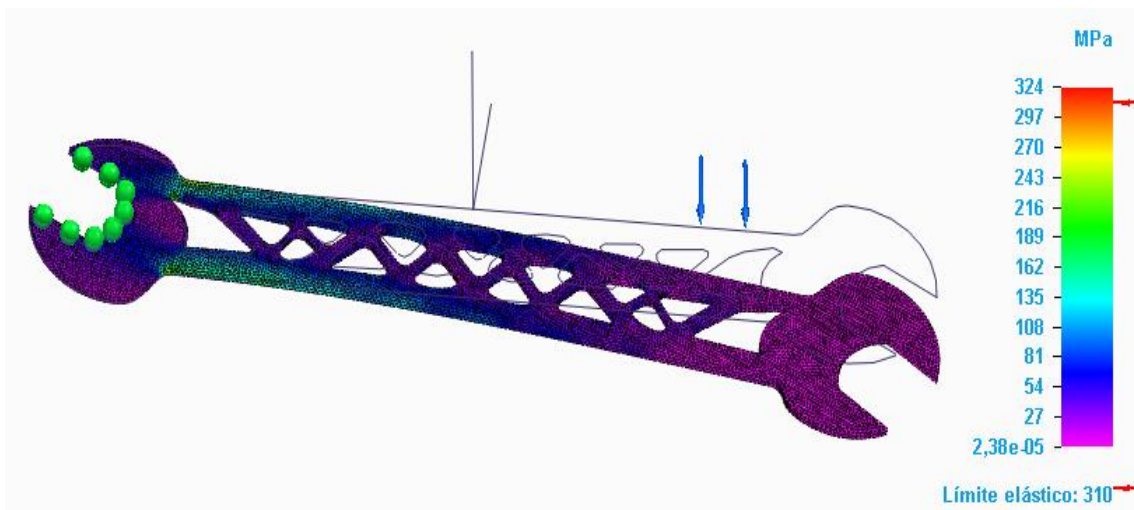


Ilustración 33. Simulación FEM de la llave fija con un 22% de reducción de masa

Se puede observar en la imagen anterior que la tensión máxima de la pieza es de 324 MPa, que sigue siendo superior al límite elástico del acero inoxidable. Esto significa que la pieza sí rompería para esta reducción de masa; por lo que se elegirá un porcentaje de masa menor en la siguiente iteración.

ITERACIÓN 4

En la tercera iteración, se hará una reducción de masa del 20%, con una calidad de estudio de 30, obteniéndose la siguiente geometría:

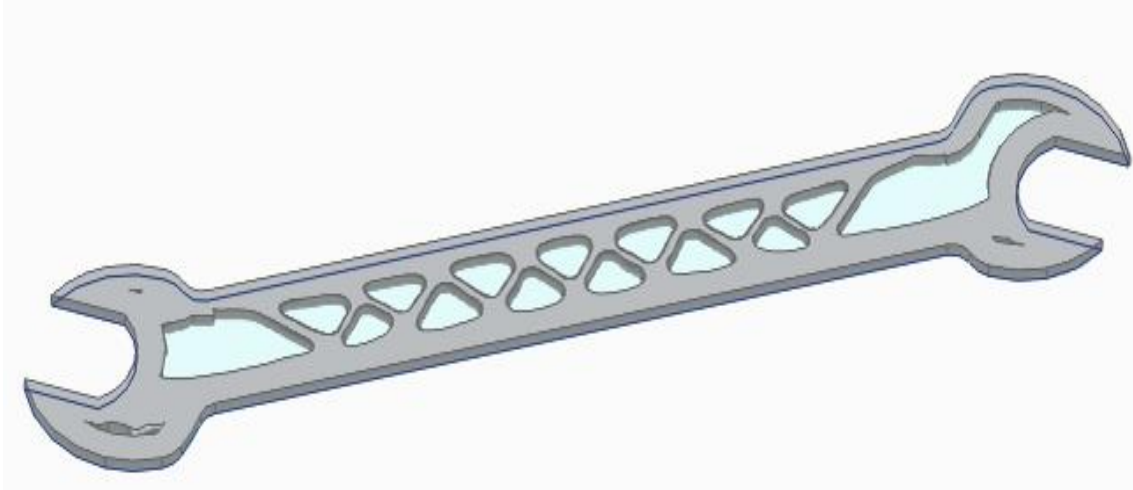


Ilustración 34. Llave fija con un 20% de reducción de masa

Como se puede observar, SolidEdge ha hecho una reducción de masa en ambos cabezales; lo que conlleva a hacer un ajuste manual de esta iteración, redistribuyendo la masa de manera que los cabezales sigan intactos:

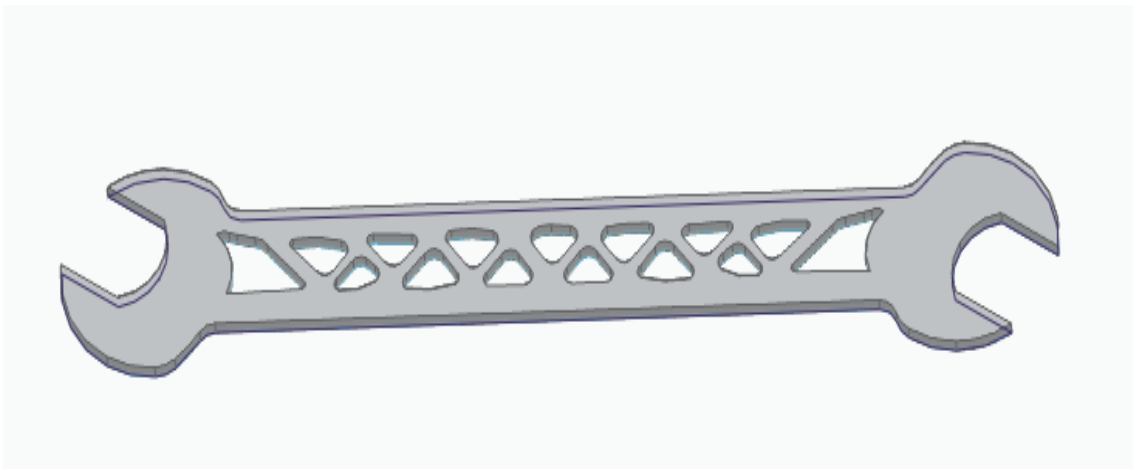


Ilustración 35. Llave fija con un 20% de reducción de masa redistribuida

En la imagen anterior, se observa que se preservan las regiones de los cabezales y dicho porcentaje de masa se redistribuye por el mango de la llave fija hasta cubrir el 20% de masa. Posteriormente, se procede a realizar una simulación FEM para conocer la tensión máxima de esta iteración:

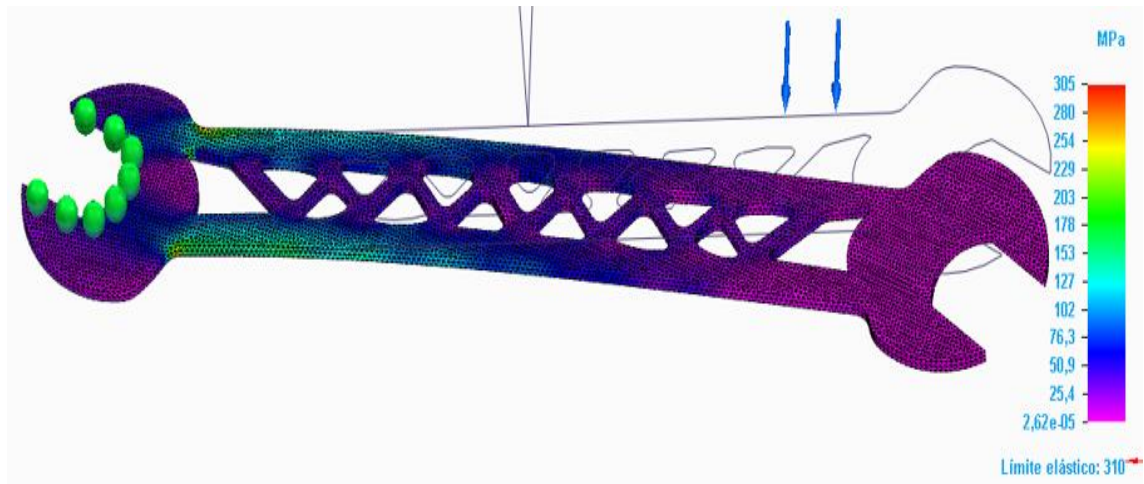


Ilustración 36. Simulación FEM de la llave fija con un 20% de reducción de masa

Se puede observar en la imagen anterior que la tensión máxima de la pieza es de 305 MPa, que es ligeramente inferior al límite elástico del acero inoxidable. Esto significa que la pieza no rompería para esta reducción de masa. Este porcentaje de reducción de masa es el óptimo, ya que la tensión máxima es muy próxima e inferior al límite elástico; por lo que no es necesario realizar ninguna iteración más, ya que no es posible reducir más masa con respecto de la pieza original.

A continuación, se procede a realizar un refinamiento de la geometría. El objetivo de este refinamiento consiste en conseguir una pieza más efectiva, de manera que las superficies de la geometría estén más suavizadas. Para llevar a cabo este refinamiento, se utiliza el programa Altair Inspire. Este programa incluye la herramienta PolyNurbs, que permite el suavizado buscado para conseguir una pieza más funcional que la que proporciona SolidEdge. A continuación, se muestra en la siguiente imagen el menú PolyNurbs de Altair Inspire:

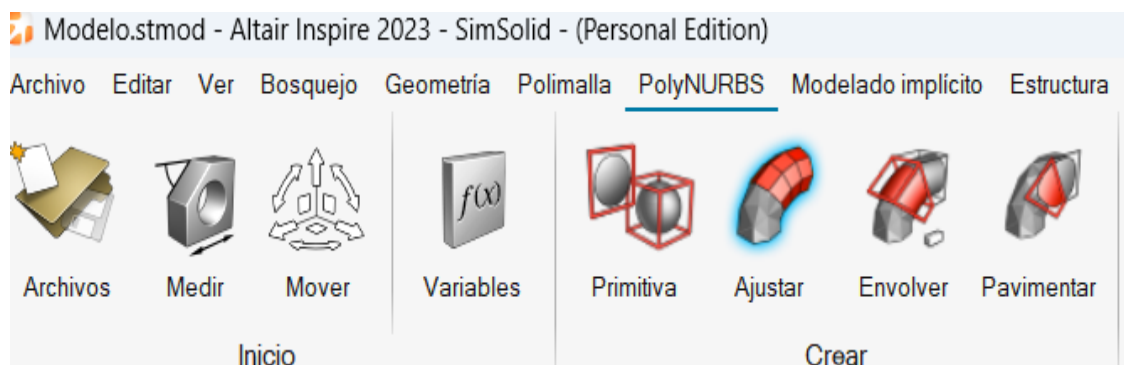


Ilustración 37. Menú PolyNurbs de Altair Inspire

Se procede a “Ajustar” la geometría de la iteración 4 con el programa Altair Inspire, obteniendo el siguiente resultado:

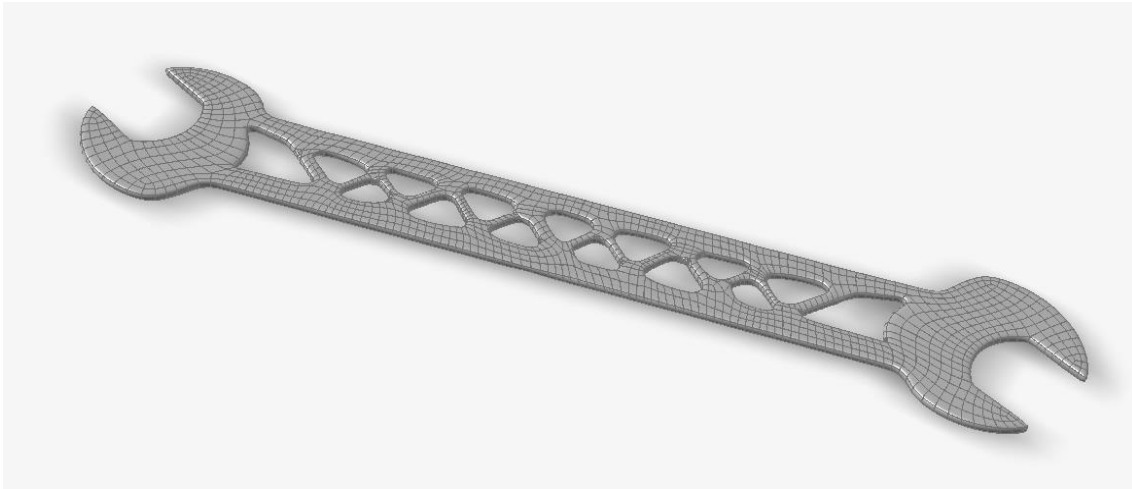


Ilustración 38. Refinado de la llave fija por Altair Inspire

En la imagen anterior, se muestra la llave fija refinada completamente y lista para la impresión 3D.

3.2. Optimización topológica del soporte de una bomba

El soporte para una bomba de dirección asistida es un elemento mecánico fundamental dentro del sistema de dirección. Su funcionamiento consiste en fijar y mantener la bomba hidráulica de dirección asistida en una posición adecuada. Proporciona estabilidad, fijación, una alineación adecuada y reducción de vibraciones. En la siguiente imagen, se muestra un ejemplo de aplicación del soporte de la bomba:



Ilustración 39. Ejemplo de aplicación del soporte de la bomba

3.2.1. Diseño del soporte de una bomba

Con la ayuda de SolidEdge, se procede a diseñar la geometría del soporte de la bomba de dirección asistida. El soporte de la bomba presenta una altura de 24 mm. En las siguientes imágenes, se puede observar la geometría del soporte de la bomba:

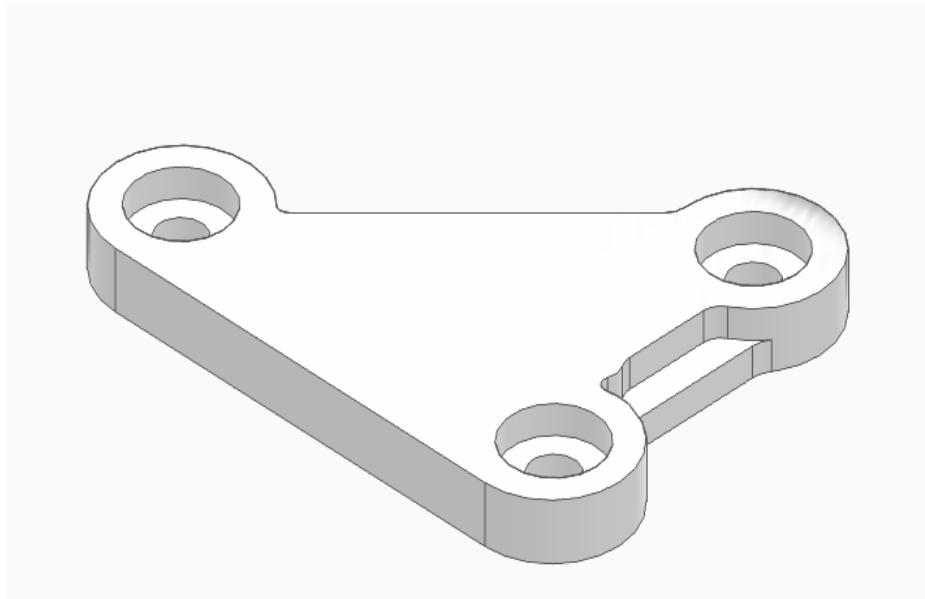


Ilustración 40. Vista 3D del soporte de la bomba

3.2.2. Material del soporte de una bomba

A continuación, se procede a asignar el material adecuado para el soporte de la bomba de dirección asistida. El mejor material posible para el soporte de la bomba es el aluminio 5050. El aluminio 5050 presenta una alta resistencia a la corrosión y una gran facilidad de fabricación. A continuación, se muestran las propiedades del aluminio 5050:

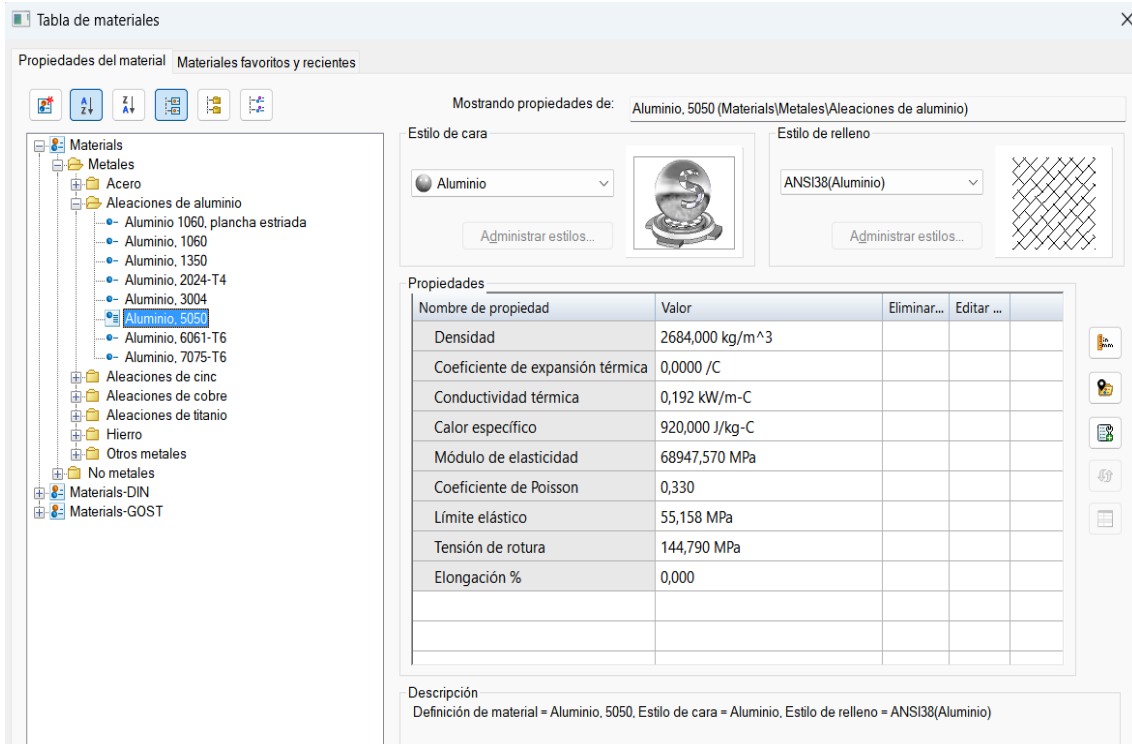


Ilustración 41. Propiedades del aluminio 5050

3.2.3. Condiciones de contorno del soporte de una bomba

En el caso del soporte de la bomba, será necesario definir como condiciones de contorno las partes fijas de la pieza (aquellas que quedan inmóviles durante el proceso de aplicación) y las fuerzas que intervienen.

Por la geometría de la pieza, se ha elegido uno de los cilindros donde irían los tornillos de fijación como parte fija. En la siguiente imagen, se muestra la restricción del cilindro donde iría el tornillo en cuestión:

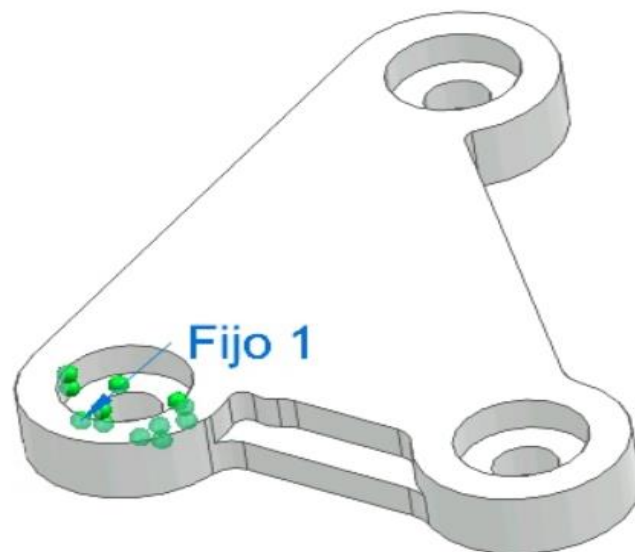


Ilustración 42. Restricción fija del soporte de la bomba

A continuación, se aplican las cargas/fuerzas que intervienen. Se ha asignado una carga (fuerza 1) en uno de los agujeros de 500 N, como se puede observar en la siguiente imagen:

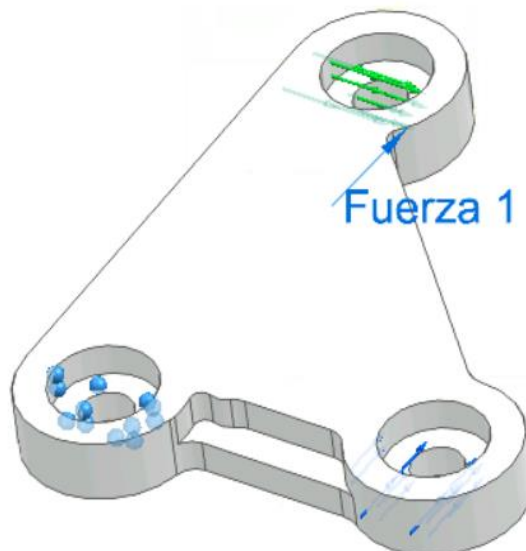


Ilustración 43. Aplicación de la fuerza 1 en el soporte

También se ha aplicado una segunda carga (fuerza 2) en el agujero restante, de 300 N:

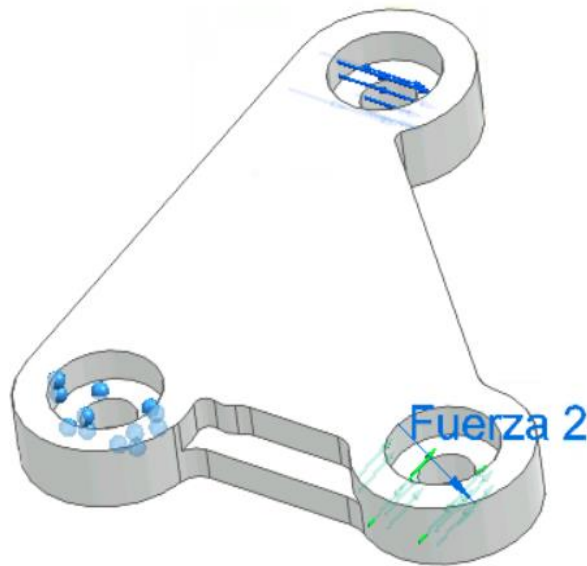


Ilustración 44. Aplicación de la fuerza 2 en el soporte

Por último, será necesario aplicar el mallado a la geometría. En la siguiente imagen, se muestra el menú del programa utilizado y todas las posibles opciones:

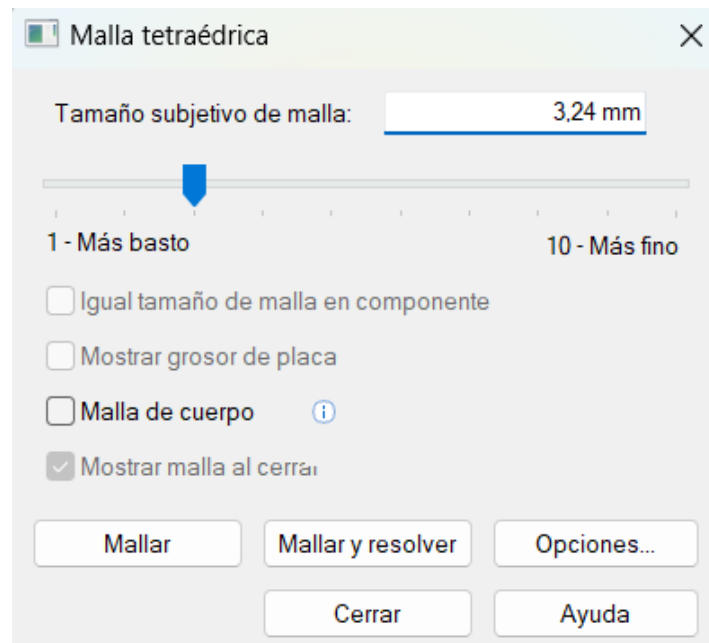


Ilustración 45. Menú de mallado de SolidEdge

Por lo general, se aplicará un mallado por defecto; salvo en algunas iteraciones en las que sea necesario refinar el mallado para obtener mejores detalles de las partes de la pieza que

más sufren. Respecto a la geometría de mallado, en todos los casos se empleará un mallado tetraédrico.

3.2.4. Proceso iterativo de optimización topológica del soporte

Antes de realizar el proceso iterativo, se realiza una primera simulación FEM de la pieza; es decir, con el 100% de masa. Se debe realizar este primer estudio para comprobar que la pieza es capaz de soportar las cargas aplicadas bajo las condiciones de contorno impuestas.

Para ello, se debe realizar un estudio estático lineal, que es un tipo de análisis que consiste en determinar el comportamiento de una estructura bajo suposiciones lineales y cargas estáticas. El propio programa permite la opción de seleccionar el tipo de estudio:



Ilustración 46. Selección del tipo de estudio

Se aplicará un estudio estático lineal para todas las iteraciones que sean necesarias durante el proceso de optimización topológica.

Una vez definidas las restricciones, cargas y el mallado, se obtienen los siguientes resultados:

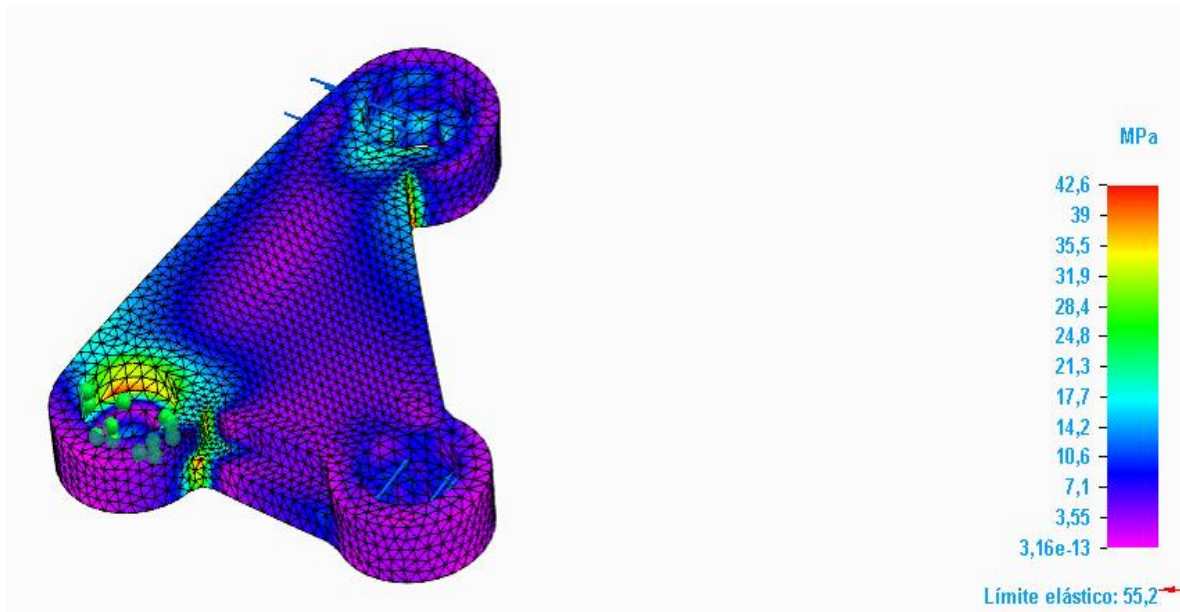


Ilustración 47. Simulación FEM con el 100% de masa

Se puede observar en la imagen que la tensión máxima en la pieza es de 42,6 MPa, muy inferior al límite elástico del aluminio 5050 (55,2 MPa). Esto significa que en ningún momento la pieza se romperá; por lo que se puede realizar una reducción de masa para minimizar el uso de material, siempre que la tensión máxima obtenida sea menor que el límite elástico del material.

Una vez se ha comprobado que la pieza no rompe, se procede a realizar la reducción de masa. Para ello, se deben aplicar los criterios de diseño generativo para poder iniciar el proceso de optimización topológica.

Primeramente, se deben seleccionar las superficies a preservar, es decir, aquellas que queremos que permanezcan intactas después de la reducción de masa. Por lo tanto, para el soporte de la bomba de dirección asistida, se deseará preservar los agujeros.

Una vez definida las regiones preservadas, las partes fijas y las fuerzas de aplicación, se procede a reducir masa de la pieza inicial. Se empezará reduciendo un 40% de material para la primera iteración.

ITERACIÓN 1

En la primera iteración, se hará una reducción de masa del 40%, con una calidad de estudio de 30, obteniéndose la siguiente geometría:

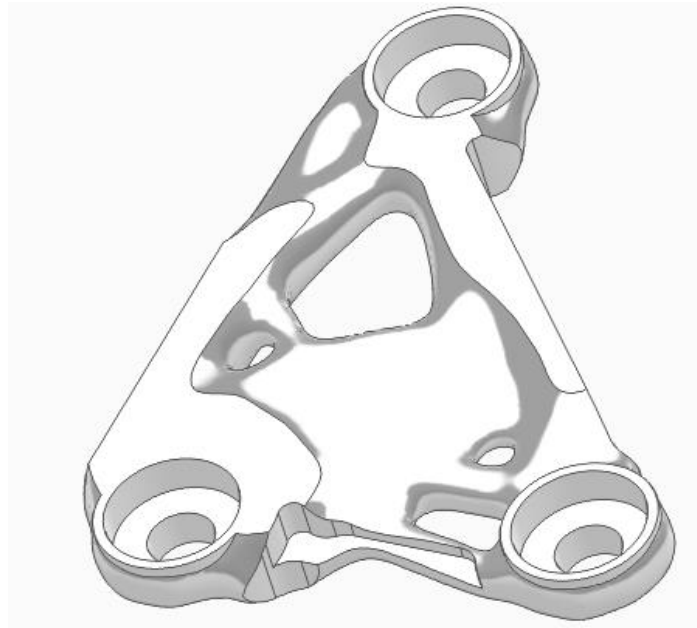


Ilustración 48. Soporte de la bomba con un 40% de reducción de masa

A continuación, se procede a realizar una simulación FEM para conocer la tensión máxima de la nueva geometría:

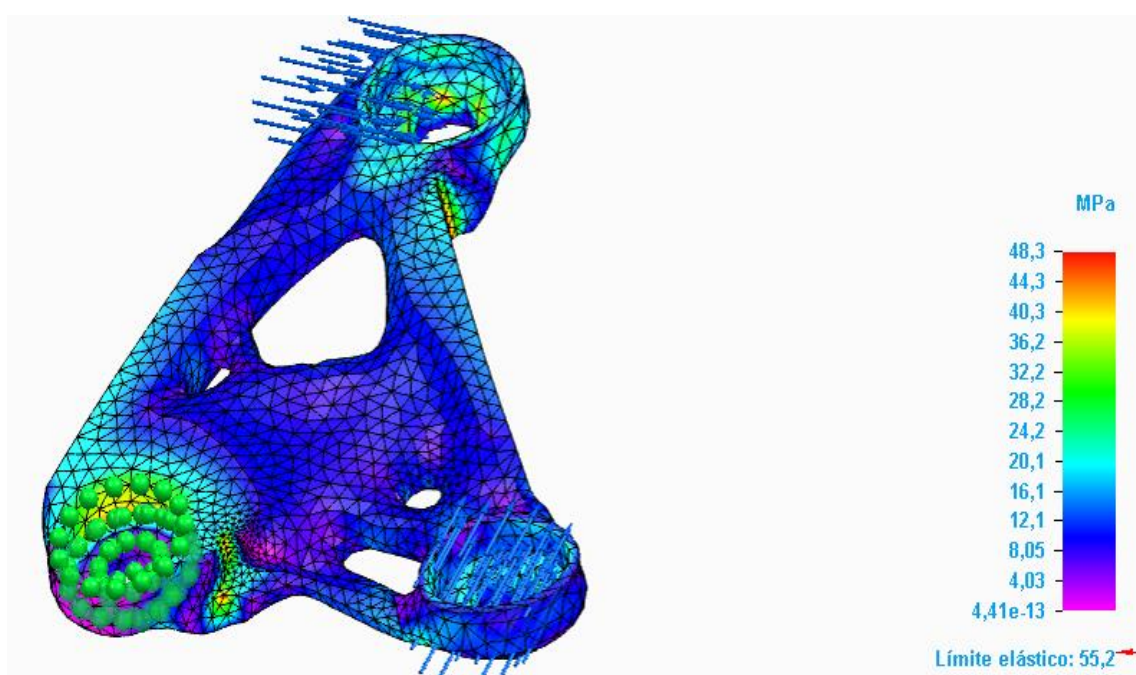


Ilustración 49. Simulación FEM del soporte de la bomba con un 40% de reducción de masa

Como se puede observar, la tensión máxima es de 48,3 MPa, inferior al límite elástico (55,2 MPa); por lo que se concluye que la pieza no rompe y se puede reducir más material mediante una nueva iteración.

ITERACIÓN 2

En la primera iteración, se hará una reducción de masa del 60%, con una calidad de estudio de 30, obteniéndose la siguiente geometría:

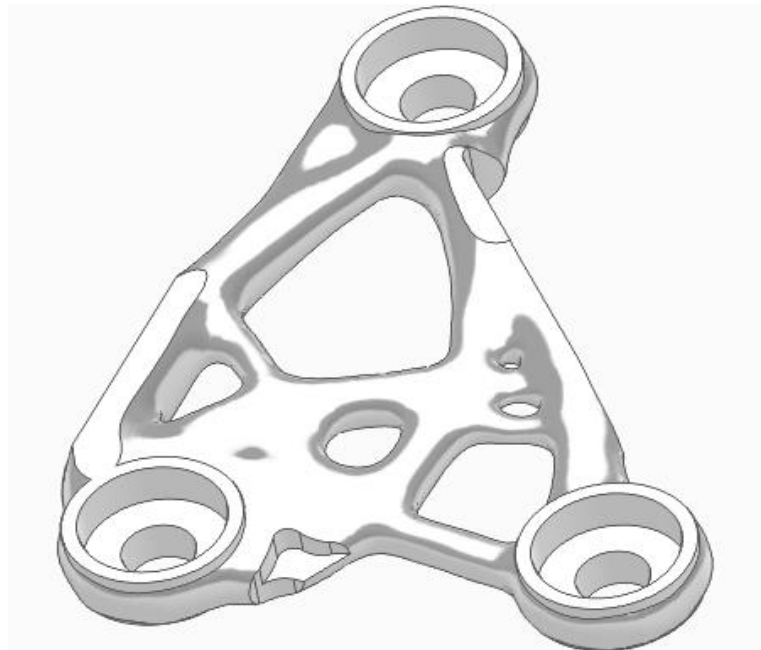


Ilustración 50. Soporte de la bomba con un 60% de reducción de masa

A continuación, se procede a realizar una simulación FEM para conocer la tensión máxima de la nueva geometría:

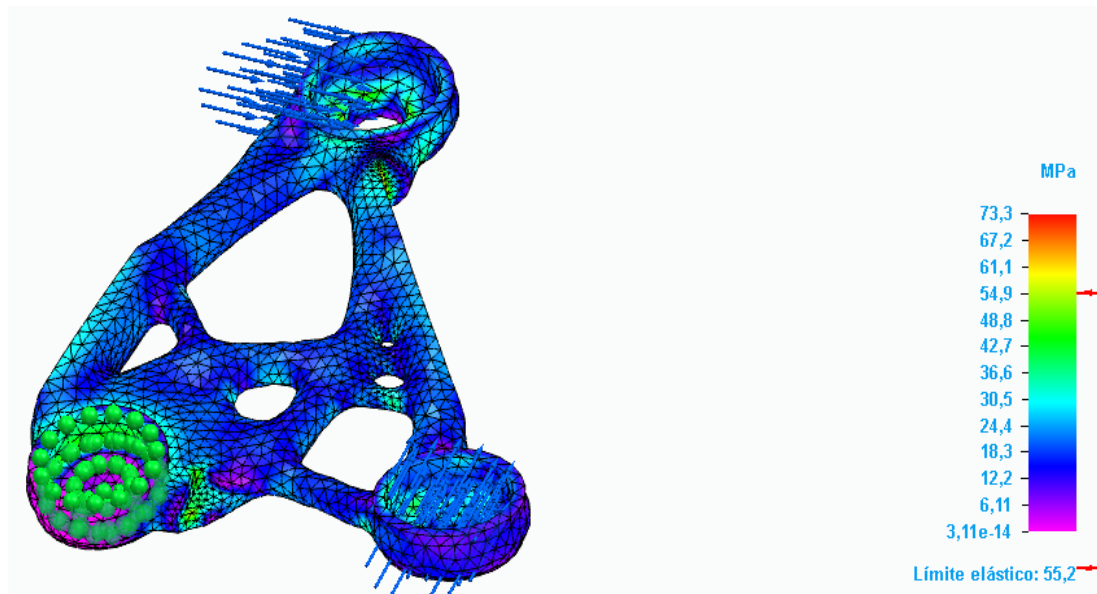


Ilustración 51. Simulación FEM del soporte de la bomba con un 60% de reducción de masa

Como se puede observar, la tensión máxima es de 73,3 MPa, superior al límite elástico (55,2 MPa); por lo que se concluye que la pieza rompe y habrá que hacer una reducción de material entre el 40% de masa y el 60% de masa.

ITERACIÓN 3

En la primera iteración, se hará una reducción de masa del 55%, con una calidad de estudio de 30, obteniéndose la siguiente geometría:



Ilustración 52. Soporte de la bomba con un 55% de reducción de masa

A continuación, se procede a realizar una simulación FEM para conocer la tensión máxima de la nueva geometría:

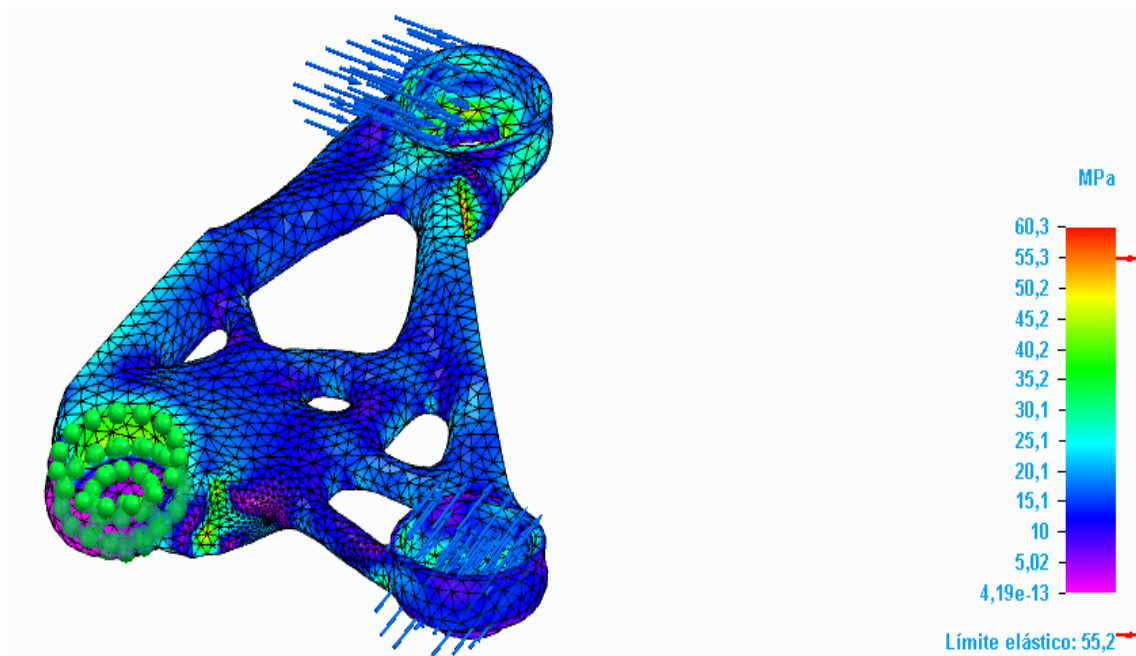


Ilustración 53. Simulación FEM del soporte de la bomba con un 55% de reducción de masa

Como se puede observar, la tensión máxima es de 60,3 MPa, superior al límite elástico (55,2 MPa); por lo que se concluye que la pieza sigue rompiendo y habrá que hacer una reducción de material menor al 55%.

ITERACIÓN 4

En la primera iteración, se hará una reducción de masa del 50%, con una calidad de estudio de 30, obteniéndose la siguiente geometría:



Ilustración 54. Soporte de la bomba con un 50% de reducción de masa

A continuación, se procede a realizar una simulación FEM para conocer la tensión máxima de la nueva geometría:

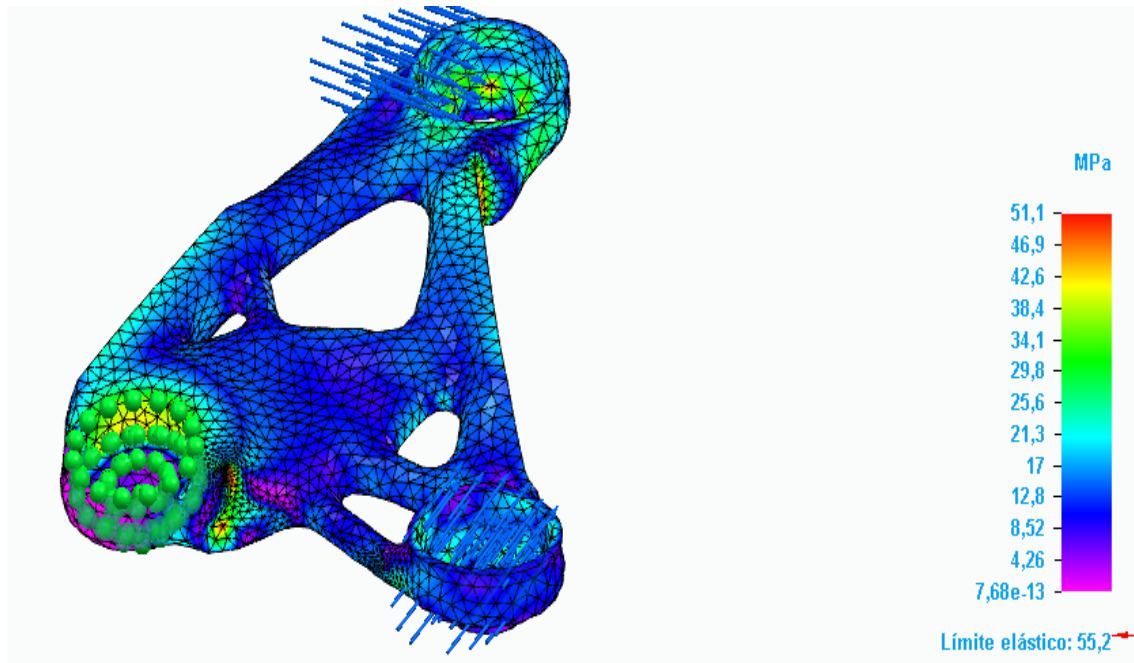


Ilustración 55. Simulación FEM del soporte de la bomba con un 50% de reducción de masa

Como se puede observar, la tensión máxima es de 51,1 MPa, ligeramente inferior al límite elástico (55,2 MPa); lo que significa que la pieza no rompe para esta iteración. Para la siguiente iteración, se escogerá una reducción de masa entre el 50% y el 55%.

ITERACIÓN 5

En la primera iteración, se hará una reducción de masa del 52%, con una calidad de estudio de 30, obteniéndose la siguiente geometría:

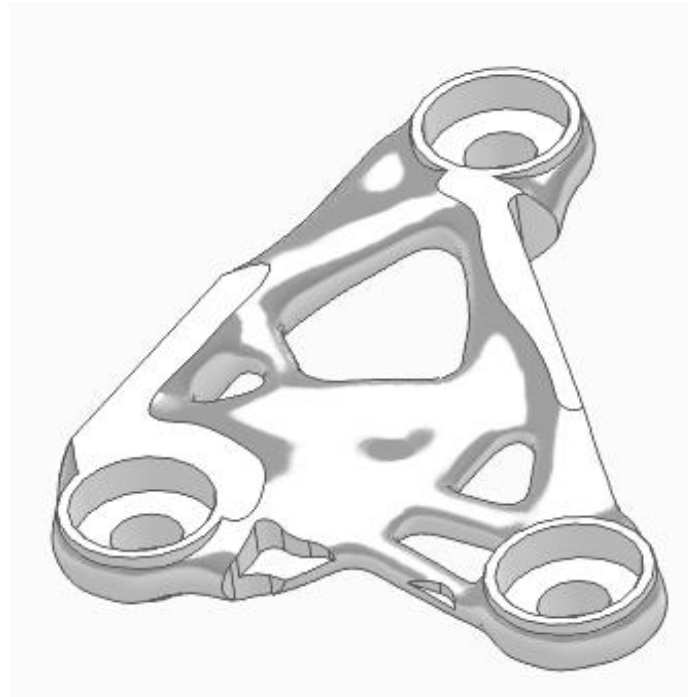


Ilustración 56. Soporte de la bomba con un 52% de reducción de masa

A continuación, se procede a realizar una simulación FEM para conocer la tensión máxima de la nueva geometría:

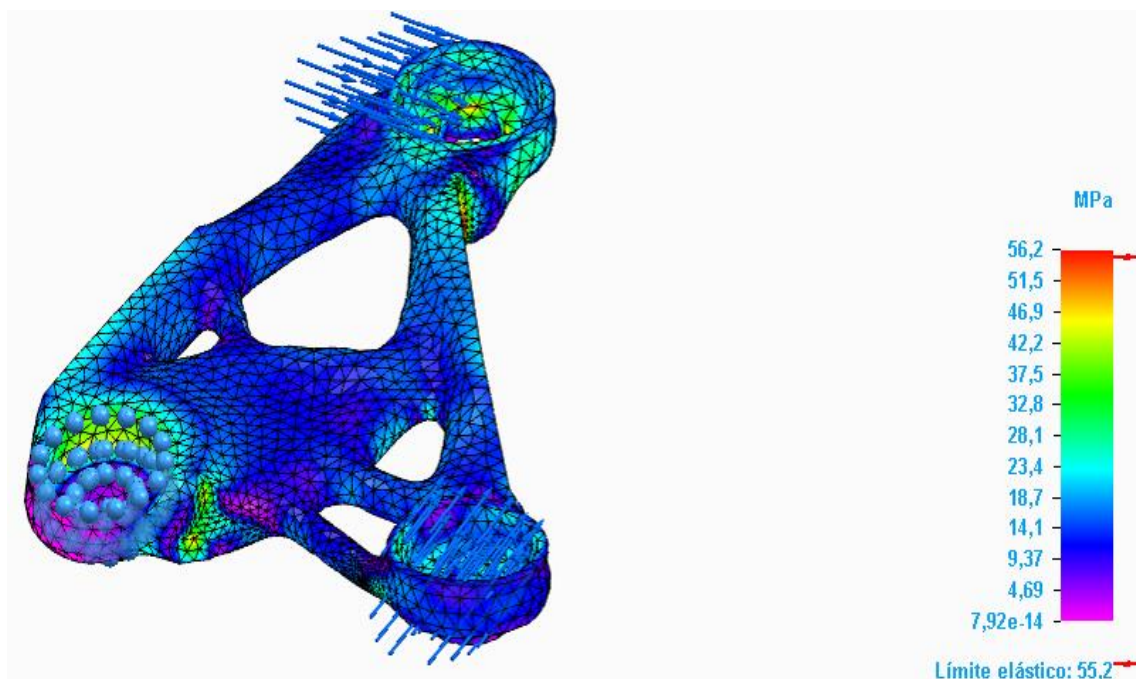


Ilustración 57. Simulación FEM del soporte de la bomba con un 52% de reducción de masa

Como se puede observar, la tensión máxima es de 56,2 MPa, ligeramente superior al límite elástico (55,2 MPa); lo que significa que la pieza sí rompe para esta iteración. Por lo tanto, la única solución posible es una reducción de masa del 51%; ya que se ha hecho una iteración del 50% de reducción de masa y no rompe, y una iteración del 52% de reducción de masa y sí rompe. En la siguiente iteración, y última, se hará una comprobación para confirmar que el soporte de la bomba no rompe para una reducción de masa del 51%.

ITERACIÓN 6

En la primera iteración, se hará una reducción de masa del 51%, con una calidad de estudio de 30, obteniéndose la siguiente geometría:



Ilustración 58. Soporte de la bomba con un 51% de reducción de masa

A continuación, se procede a realizar una simulación FEM para conocer la tensión máxima de la nueva geometría:

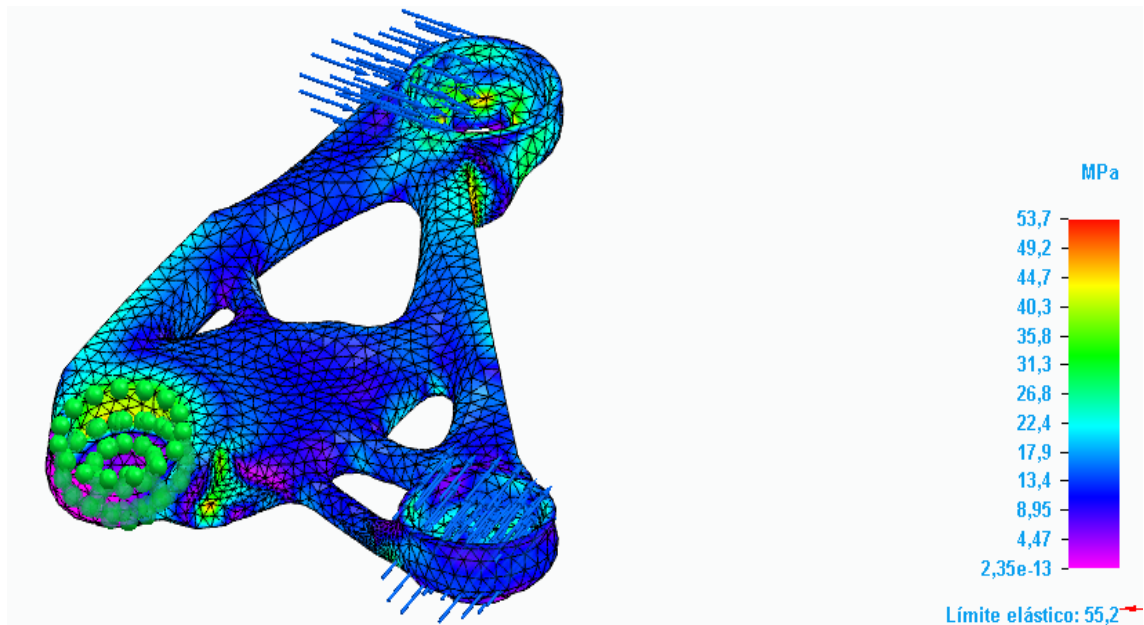


Ilustración 59. Simulación FEM del soporte de la bomba con un 51% de reducción de masa

Como se puede observar, la tensión máxima es de 53,7 MPa, ligeramente superior al límite elástico (55,2 MPa); lo que significa que la pieza no rompe para esta iteración. Por lo tanto, la solución óptima es una reducción de masa del 51%; ya que se ha hecho una iteración del 50% de reducción de masa y no rompe, y una iteración del 52% de reducción de masa y sí rompe.

Este porcentaje de reducción de masa es ideal, dado que la tensión máxima se aproxima y es inferior al límite elástico. Por lo tanto, no es necesario realizar más iteraciones, ya que no se puede disminuir la masa adicionalmente en comparación con la pieza original.

A continuación, se procede a realizar un refinamiento de la geometría de la iteración 6, como ya se realizó con la llave fija. Se utiliza la herramienta “Ajustar” del programa Altair Inspire, obteniendo el siguiente resultado:

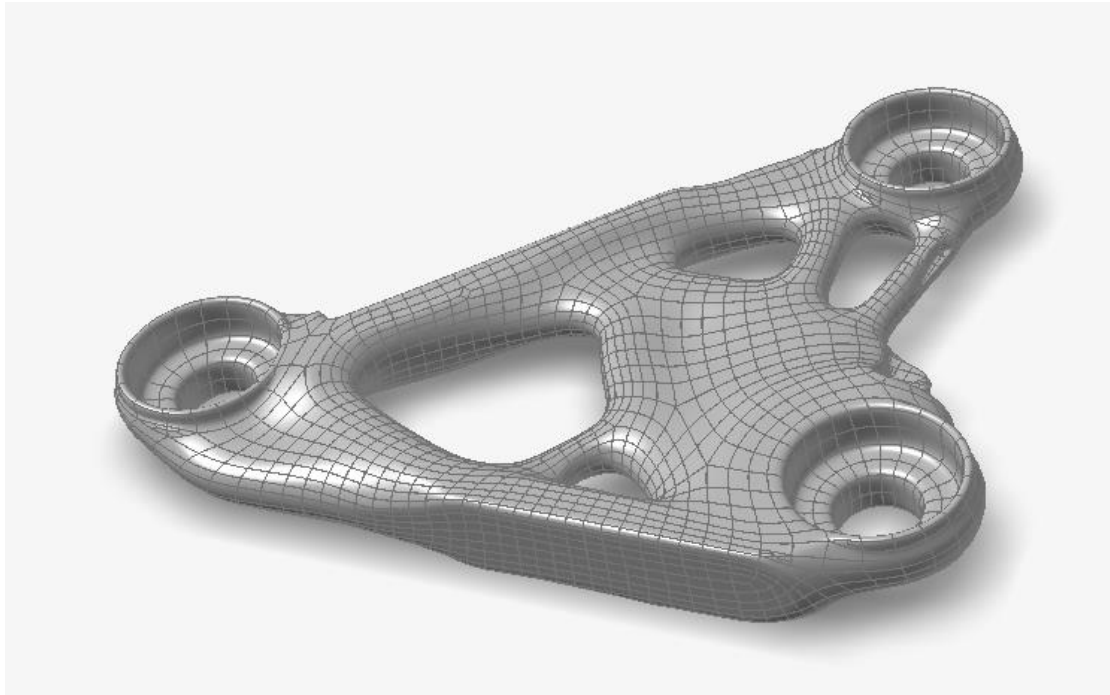


Ilustración 60. Refinado del soporte de la bomba

En la imagen anterior, se muestra el soporte de la bomba refinado completamente y listo para la impresión 3D.

3.3. Optimización topológica de la biela de una bicicleta

La biela de una bicicleta es un componente crucial del sistema de transmisión que conecta los pedales con el eje del plato. Su función principal es transferir la fuerza generada por el ciclista al pedaleo hacia el sistema de cadena y plato, lo que a su vez impulsa la bicicleta hacia adelante. En la siguiente imagen, se muestra un ejemplo de aplicación de la biela de la bicicleta:



Ilustración 61. Ejemplo de aplicación de la biela de la bicicleta

3.3.1. Diseño de la biela de una bicicleta

Con la ayuda de SolidEdge, se procede a diseñar la geometría de la biela de un pedal de una bicicleta. Este elemento mecánico es fundamental en una bicicleta, ya que conecta los pedales al eje del pedalier. La función mecánica de la biela consiste transformar el movimiento circular de las piernas del ciclista en un movimiento rotatorio que hace que la bicicleta se impulse hacia adelante. En las siguientes imágenes, se puede observar la geometría de biela:

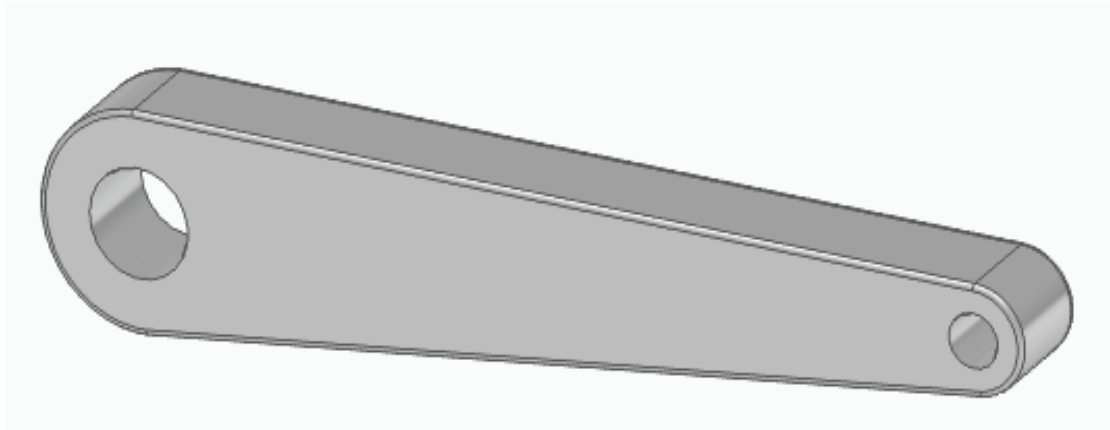


Ilustración 62. Vista 3D de la biela de bicicleta

3.2.2. Material de la biela de una bicicleta

A continuación, se procede a asignar el material adecuado para la biela. El mejor material posible para la biela es el aluminio 5050. El aluminio 5050 presenta una alta resistencia a la corrosión y una gran facilidad de fabricación; también presenta una gran resistencia y durabilidad, y guarda una buena relación entre el coste de fabricación y la efectividad. A continuación, se muestran las propiedades del aluminio 5050:

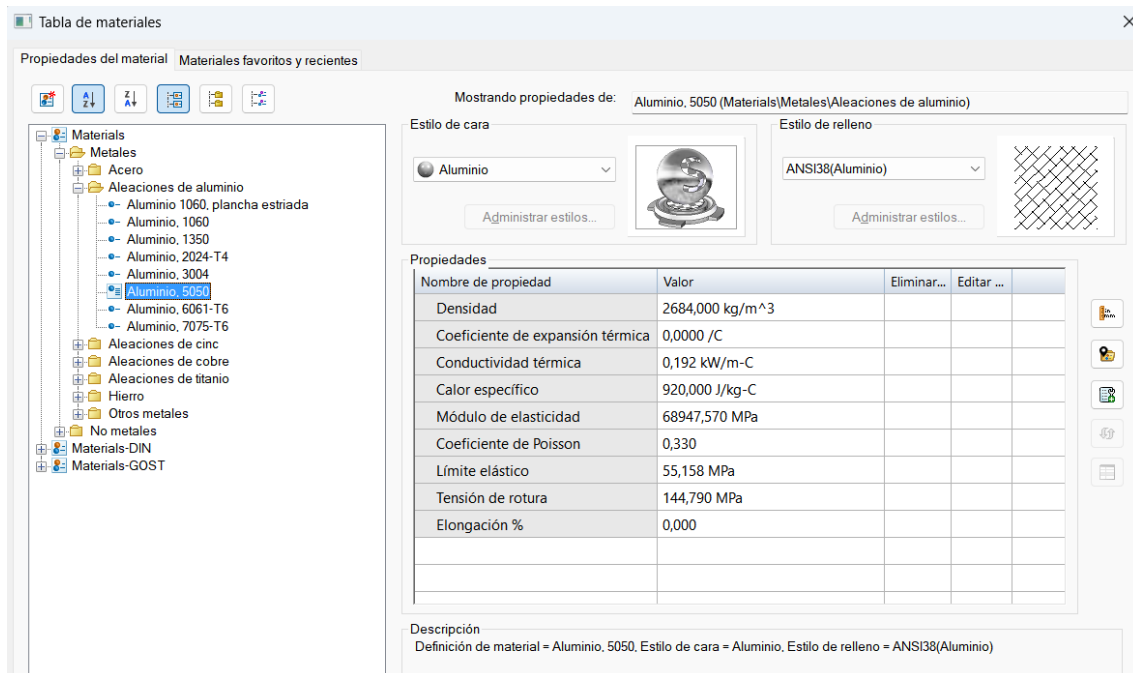


Tabla de materiales

Propiedades del material | Materiales favoritos y recientes

Mostrando propiedades de: Aluminio, 5050 (Materials\Metales\Aleaciones de aluminio)

Estilo de cara: Aluminio

Estilo de relleno: ANSI38(Aluminio)

Nombre de propiedad	Valor	Eliminar...	Editar ...
Densidad	2684,000 kg/m ³		
Coefficiente de expansión térmica	0,0000 /C		
Conductividad térmica	0,192 kW/m-C		
Calor específico	920,000 J/kg-C		
Módulo de elasticidad	68947,570 MPa		
Coefficiente de Poisson	0,330		
Límite elástico	55,158 MPa		
Tensión de rotura	144,790 MPa		
Elongación %	0,000		

Descripción
Definición de material = Aluminio, 5050, Estilo de cara = Aluminio, Estilo de relleno = ANSI38(Aluminio)

Ilustración 63. Propiedades del aluminio 5050

3.2.3. Condiciones de contorno de la biela de una bicicleta

En el caso de la biela de la bicicleta de la bomba, será necesario definir como condiciones de contorno las partes fijas de la pieza (aquellas que quedan inmóviles durante el proceso de aplicación) y las fuerzas que intervienen.

Por la geometría de la pieza, se ha elegido uno de los cilindros donde iría el eje pedalier como parte fija. En la siguiente imagen, se muestra la restricción del cilindro donde iría el eje pedalier:

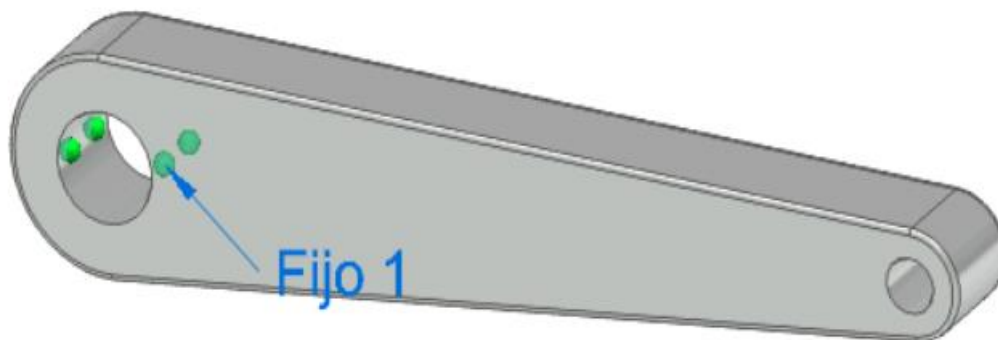


Ilustración 64. Restricción fija de la biela de la bicicleta

A continuación, se aplican las cargas/fuerzas que intervienen. Se ha asignado una carga (fuerza 1) en uno de los agujeros de 700 N, como se puede observar en la siguiente imagen:

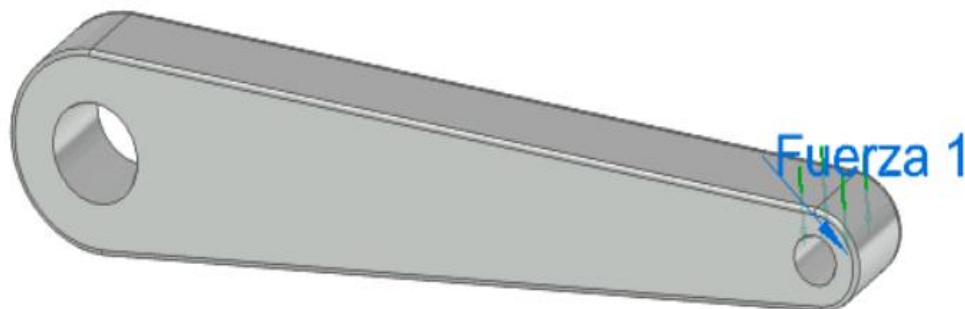


Ilustración 65. Aplicación de la fuerza 1 en la biela de la bicicleta

Por último, será necesario aplicar el mallado a la geometría. En la siguiente imagen, se muestra el menú del programa utilizado y todas las posibles opciones:

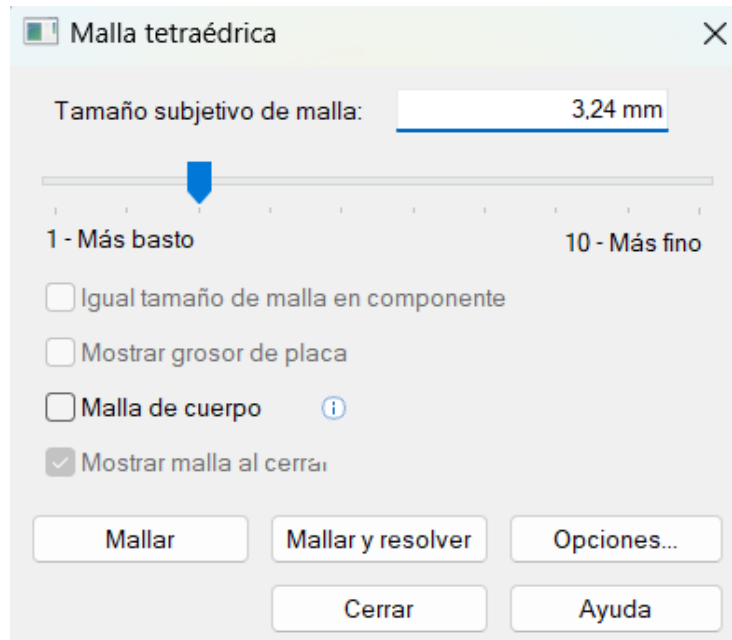


Ilustración 66. Menú de mallado de SolidEdge

Por lo general, se aplicará un mallado por defecto; salvo en algunas iteraciones en las que sea necesario refinar el mallado para obtener mejores detalles de las partes de la pieza que más sufren. Respecto a la geometría de mallado, en todos los casos se empleará un mallado tetraédrico.

3.2.4. Proceso iterativo de optimización topológica de la biela

Antes de realizar el proceso iterativo, se realiza una primera simulación FEM de la pieza; es decir, con el 100% de masa. Se debe realizar este primer estudio para comprobar que la pieza es capaz de soportar las cargas aplicadas bajo las condiciones de contorno impuestas.

Para ello, se debe realizar un estudio estático lineal, que es un tipo de análisis que consiste en determinar el comportamiento de una estructura bajo suposiciones lineales y cargas estáticas. El propio programa permite la opción de seleccionar el tipo de estudio:

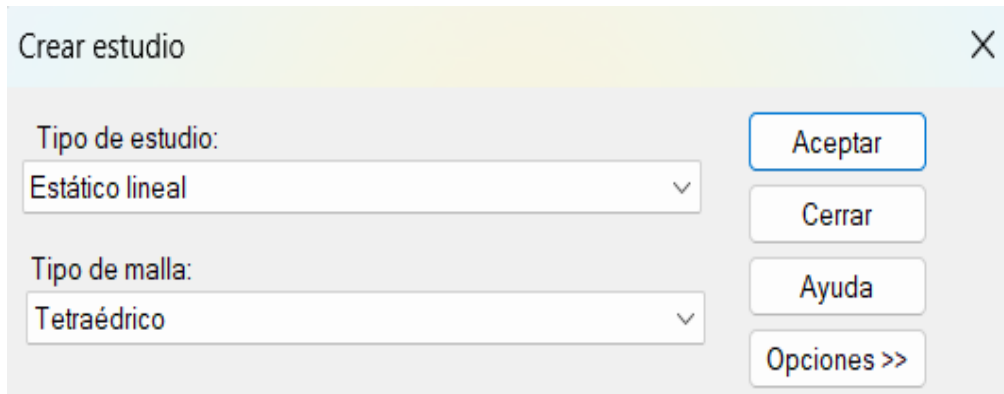


Ilustración 67. Selección del tipo de estudio

Se aplicará un estudio estático lineal para todas las iteraciones que sean necesarias durante el proceso de optimización topológica.

Una vez definidas las restricciones, cargas y el mallado, se obtienen los siguientes resultados:

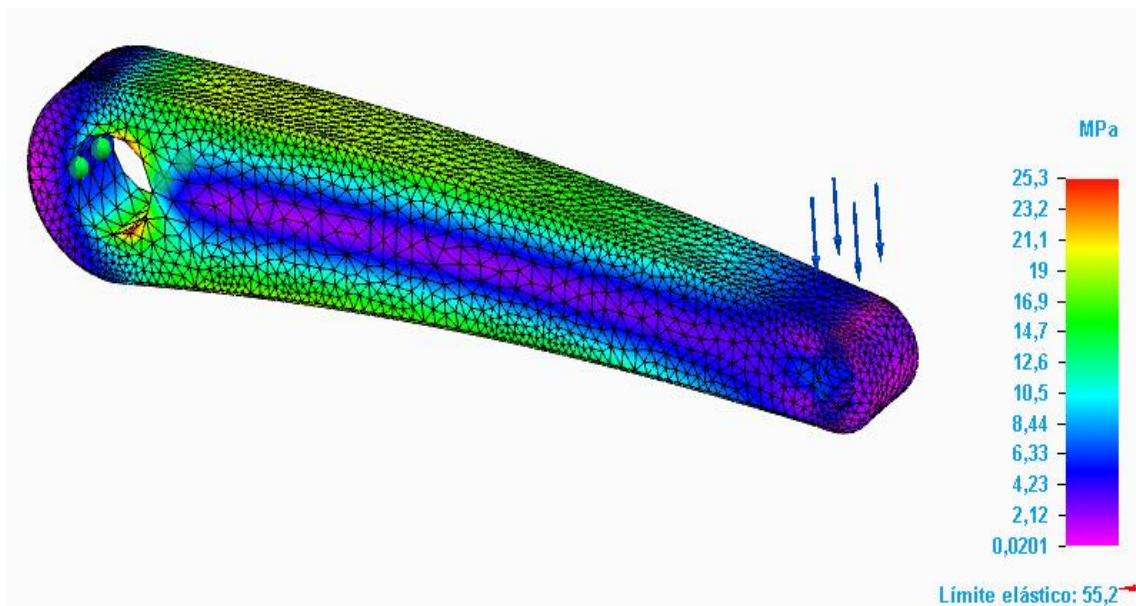


Ilustración 68. Simulación FEM con el 100% de masa

Se puede observar en la imagen que la tensión máxima en la pieza es de 25,3 MPa, muy inferior al límite elástico del acero inoxidable (55,2 MPa). Esto significa que en ningún momento la pieza se romperá; por lo que se puede realizar una reducción de masa para minimizar el uso de material, siempre que la tensión máxima obtenida sea menor que el límite elástico del material.

Una vez se ha comprobado que la pieza no rompe, se procede a realizar la reducción de masa. Para ello, se deben aplicar los criterios de diseño generativo para poder iniciar el proceso de optimización topológica.

Primeramente, se deben seleccionar aquellas superficies a preservar, es decir, aquellas que queremos que permanezcan intactas después de la reducción de masa. Por lo tanto, para la biela se desearán preservar las regiones cilíndricas. Es muy importante conservar estas regiones, ya que en una de ellas se conecta el pedal y en la otra se conecta el eje pedalier.

Una vez definida las regiones preservadas, las partes fijas y las fuerzas de aplicación, se procede a reducir masa de la pieza inicial. Se empezará reduciendo un 30% de material para la primera iteración.

ITERACIÓN 1

En la primera iteración, se hará una reducción de masa del 30%, con una calidad de estudio de 30, obteniéndose la siguiente geometría:

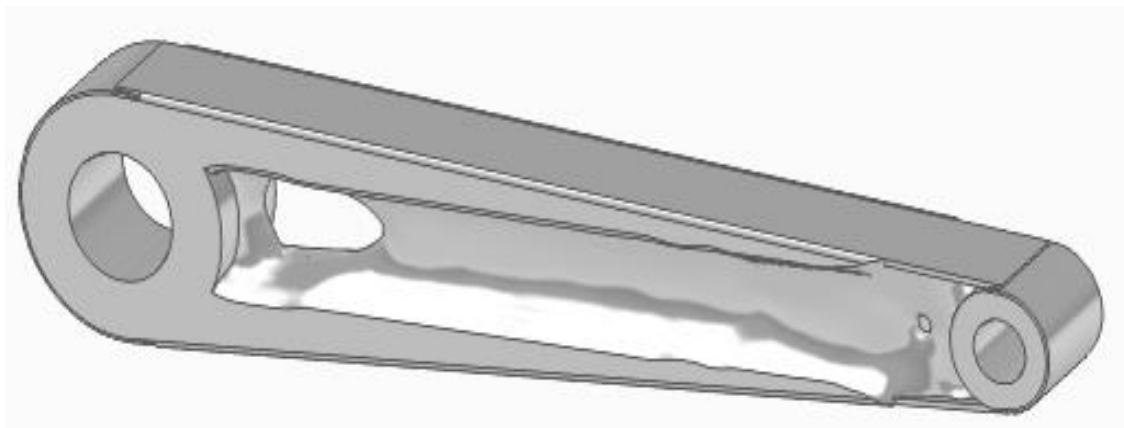


Ilustración 69. Biela de la bicicleta con un 30% de reducción de masa

A continuación, se procede a realizar una simulación FEM para conocer la tensión máxima de la nueva geometría:

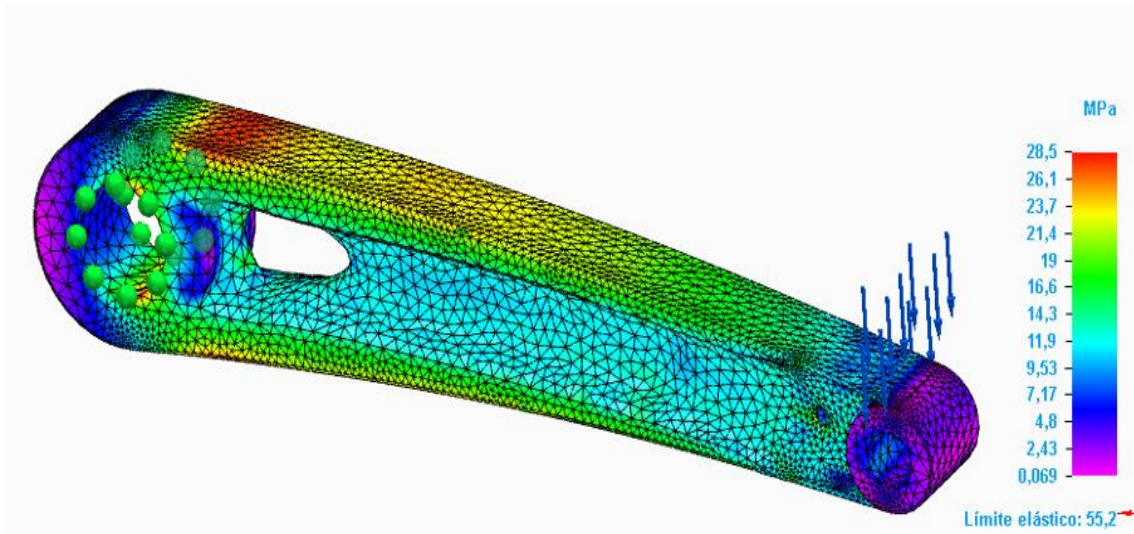


Ilustración 70. Simulación FEM de la biela de la bicicleta con un 30% de reducción de masa

Como se puede observar, la tensión máxima es de 28,5 MPa, muy inferior al límite elástico (55,2 MPa); por lo que se concluye que la pieza no rompe y se puede reducir más material mediante una nueva iteración.

ITERACIÓN 2

En la primera iteración, se hará una reducción de masa del 40%, con una calidad de estudio de 30, obteniéndose la siguiente geometría:

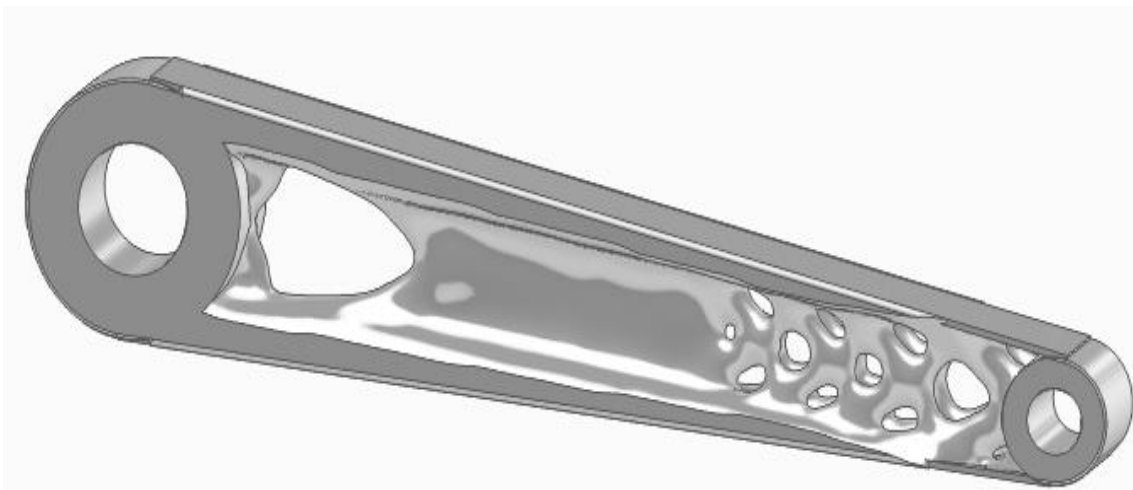


Ilustración 71. Biela de la bicicleta con un 40% de reducción de masa

A continuación, se procede a realizar una simulación FEM para conocer la tensión máxima de la nueva geometría:

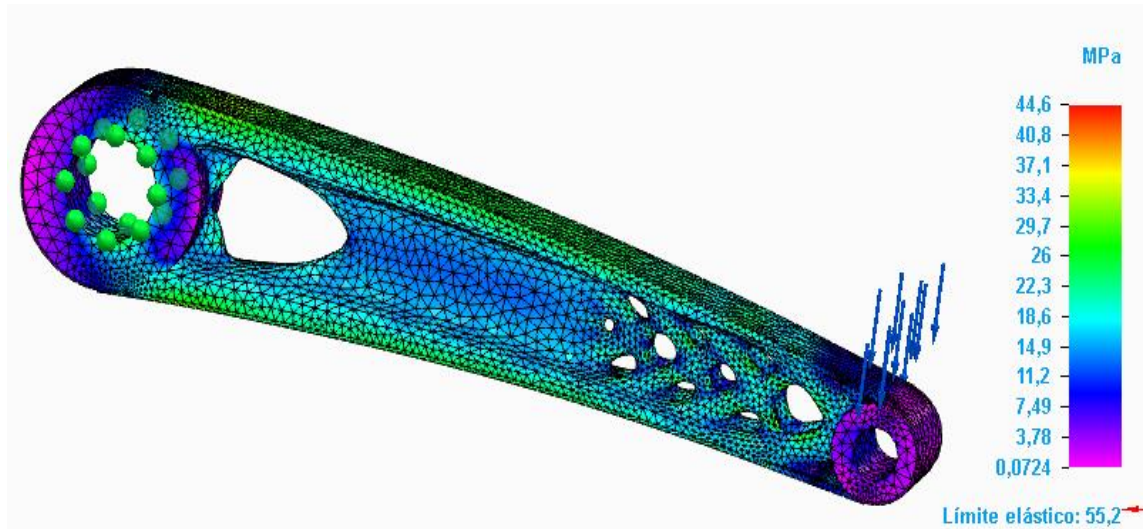


Ilustración 72. Simulación FEM de la biela de la bicicleta con un 40% de reducción de masa

Como se puede observar, la tensión máxima es de 44,6 MPa, sigue siendo inferior al límite elástico (55,2 MPa); por lo que se concluye que la pieza sigue sin romper y se puede reducir más material mediante una nueva iteración.

ITERACIÓN 3

En la primera iteración, se hará una reducción de masa del 60%, con una calidad de estudio de 30, obteniéndose la siguiente geometría:

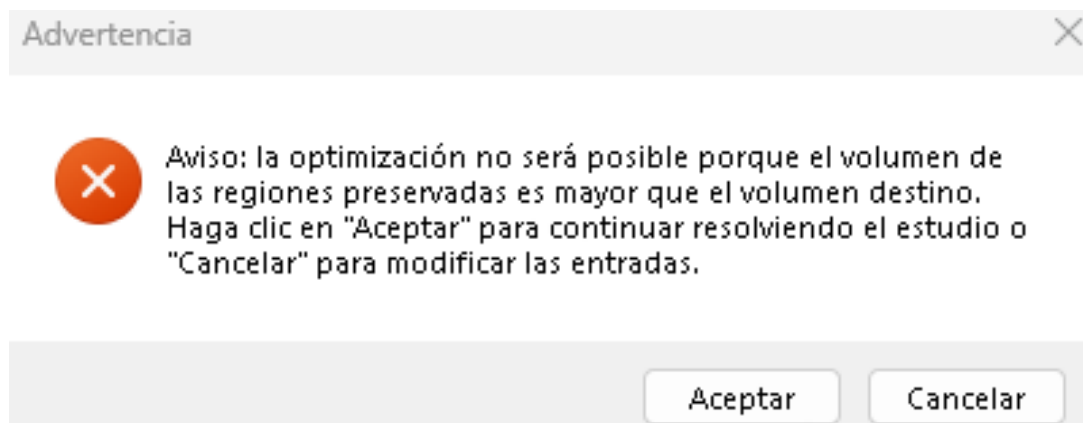


Ilustración 73. Mensaje de error al hacer reducción del 60% de masa

Este mensaje de error significa que no se puede reducir el 60% de material de la pieza original, ya que el volumen de las regiones preservadas sería mayor que el volumen de optimización al 60% de reducción de masa. Por consiguiente, se procede a hacer una siguiente iteración con una reducción del 56% de masa.

ITERACIÓN 4

En la primera iteración, se hará una reducción de masa del 56%, con una calidad de estudio de 30, obteniéndose la siguiente geometría:

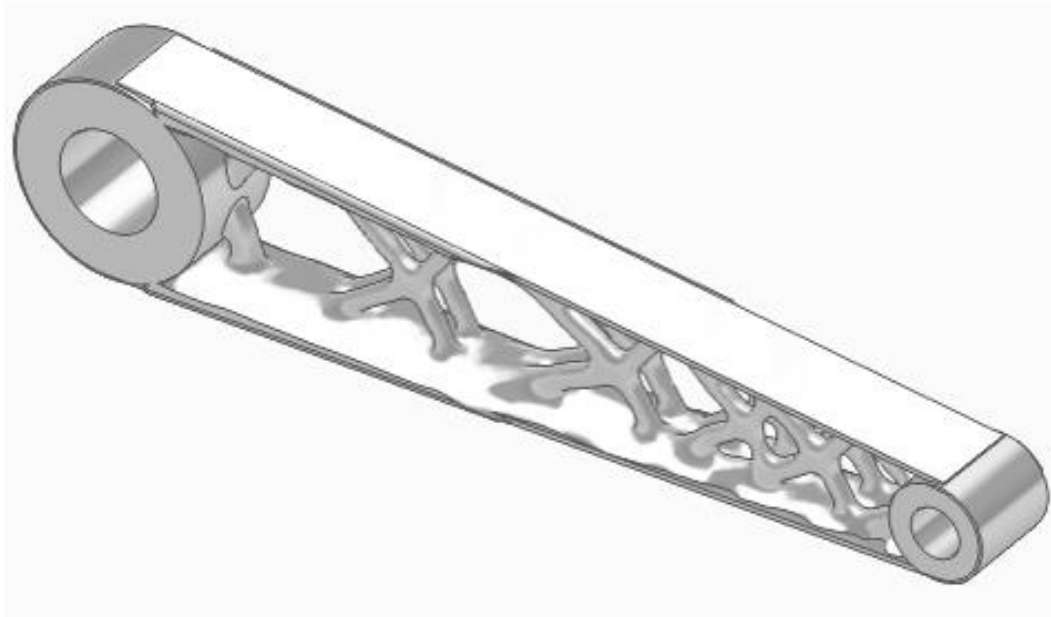


Ilustración 74. Biela de la bicicleta con un 56% de reducción de masa

A continuación, se procede a realizar una simulación FEM para conocer la tensión máxima de la nueva geometría:

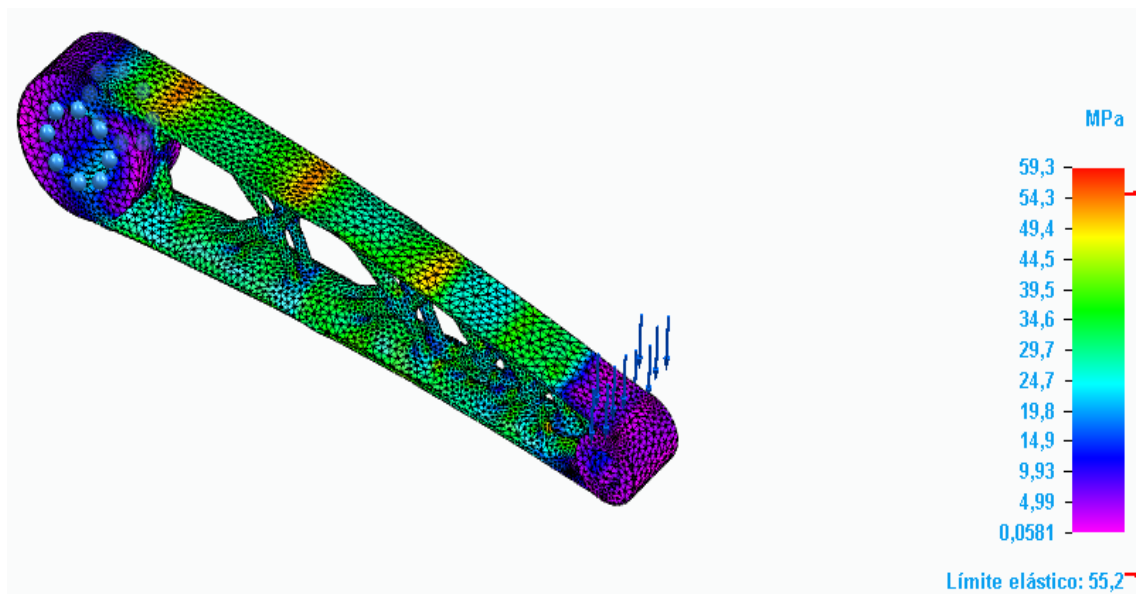


Ilustración 75. Simulación FEM de la biela de la bicicleta con un 56% de reducción de masa

Como se puede observar, la tensión máxima es de 59,3 MPa, ligeramente superior al límite elástico (55,2 MPa); por lo que se concluye que la pieza rompe y se debe hacer otra iteración con una reducción de masa inferior a 56%.

ITERACIÓN 5

En la primera iteración, se hará una reducción de masa del 50%, con una calidad de estudio de 30, obteniéndose la siguiente geometría:

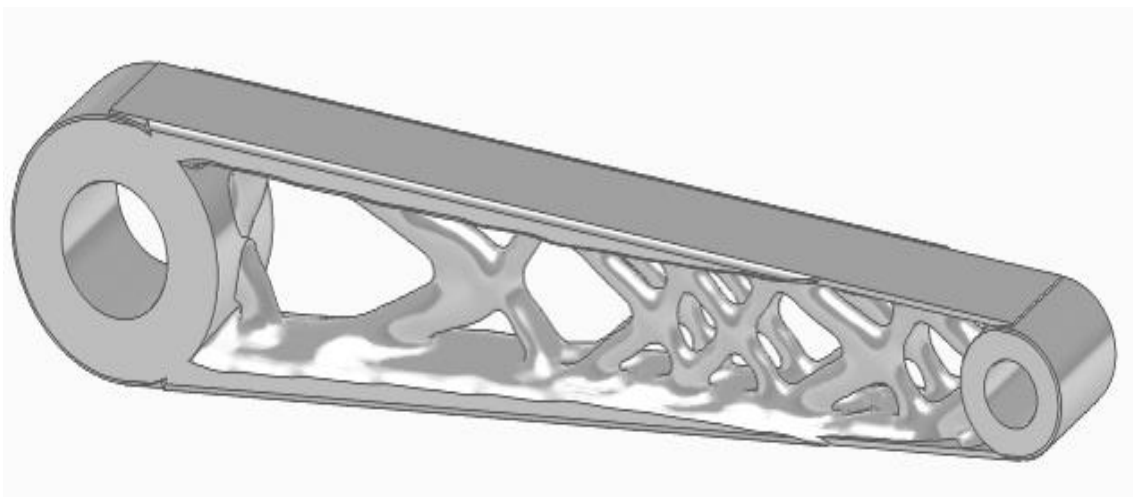


Ilustración 76. Biela de la bicicleta con un 50% de reducción de masa

A continuación, se procede a realizar una simulación FEM para conocer la tensión máxima de la nueva geometría:

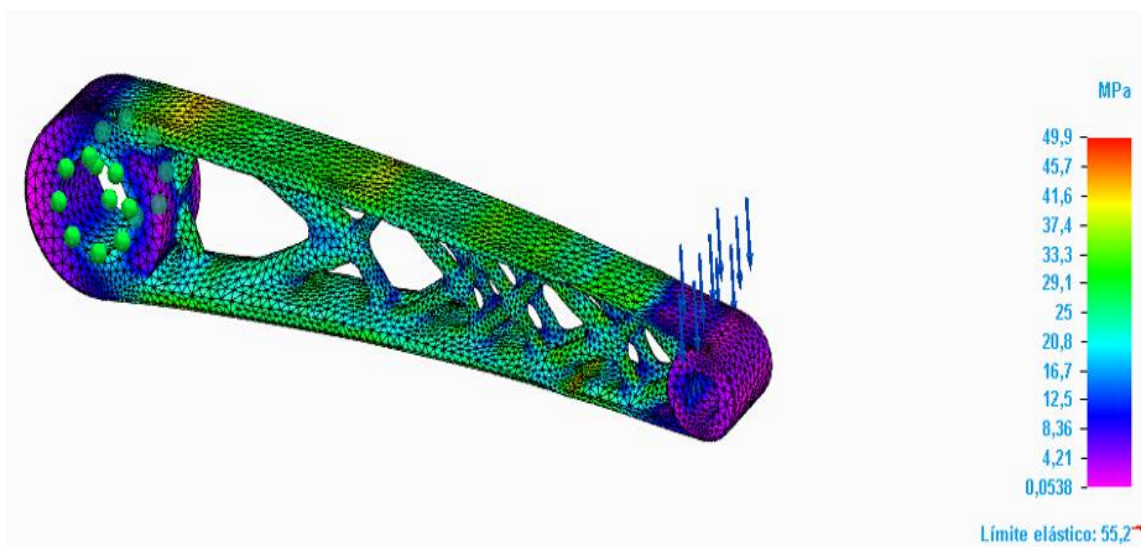


Ilustración 77. Simulación FEM de la biela de la bicicleta con un 50% de reducción de masa

Como se puede observar, la tensión máxima es de 49,9 MPa, ligeramente inferior al límite elástico (55,2 MPa); por lo que se concluye que la pieza no rompe para una reducción de masa del 50%. Sería necesario hacer un par de iteraciones para comprobar si en el rango de 50%-56% de reducción existe alguna solución que sea más óptima.

ITERACIÓN 6

En la primera iteración, se hará una reducción de masa del 54%, con una calidad de estudio de 30, obteniéndose la siguiente geometría:

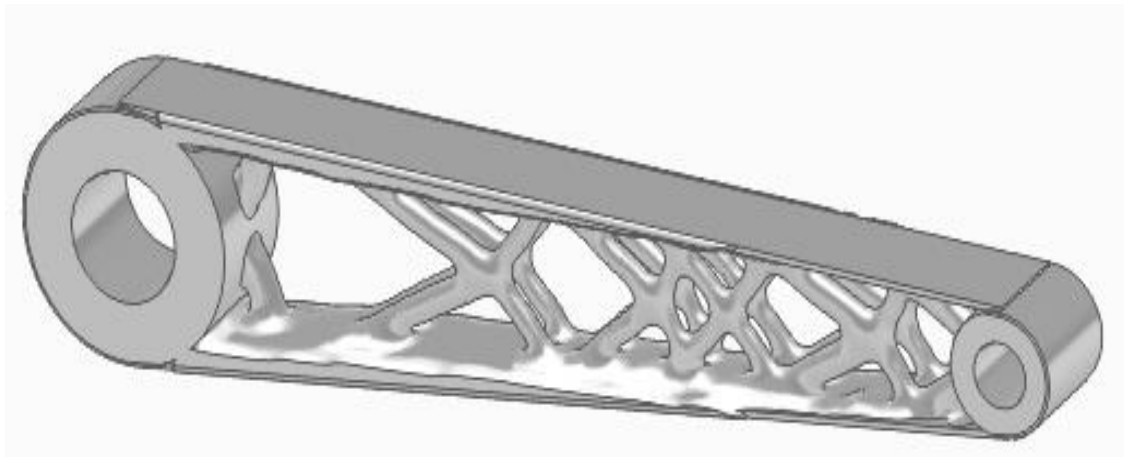


Ilustración 78. Biela de la bicicleta con un 54% de reducción de masa

A continuación, se procede a realizar una simulación FEM para conocer la tensión máxima de la nueva geometría:

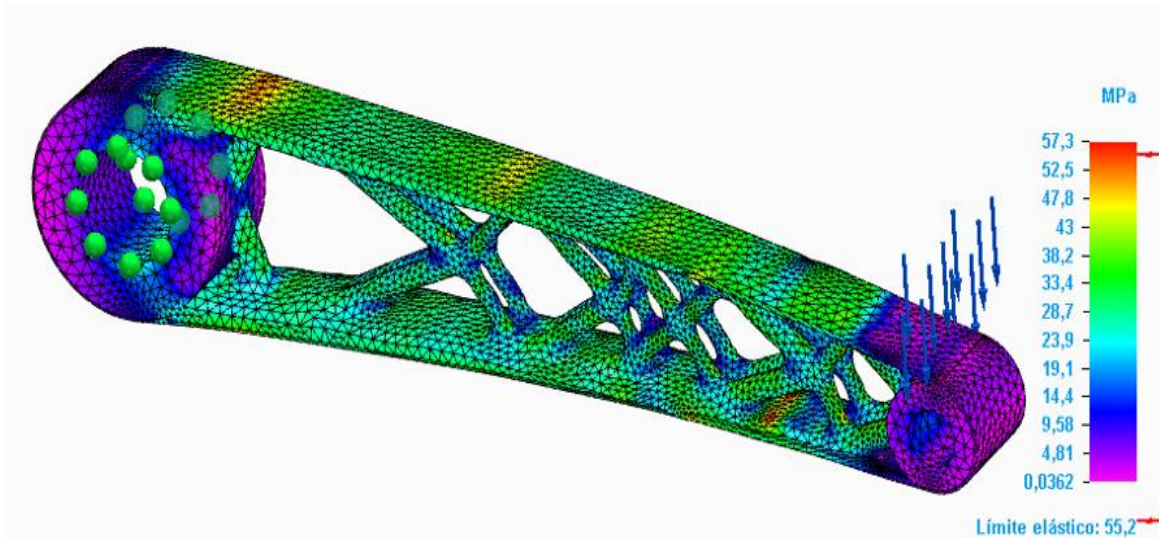


Ilustración 79. Simulación FEM de la biela de la bicicleta con un 54% de reducción de masa

Como se puede observar, la tensión máxima es de 57,3 MPa, ligeramente superior al límite elástico (55,2 MPa); por lo que se concluye que la pieza sí rompe para una reducción de masa del 54%.

ITERACIÓN 7

En la primera iteración, se hará una reducción de masa del 51%, con una calidad de estudio de 30, obteniéndose la siguiente geometría:

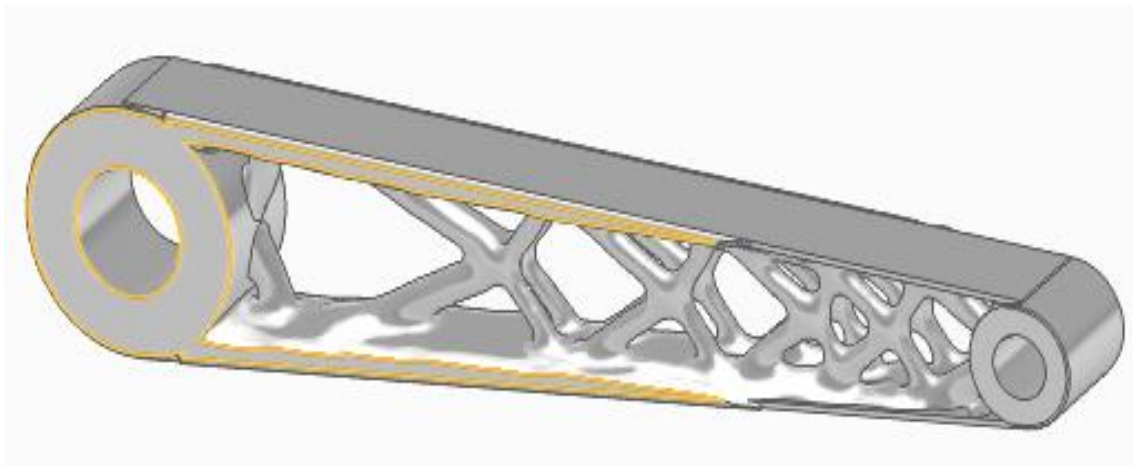


Ilustración 80. Biela de la bicicleta con un 51% de reducción de masa

A continuación, se procede a realizar una simulación FEM para conocer la tensión máxima de la nueva geometría:

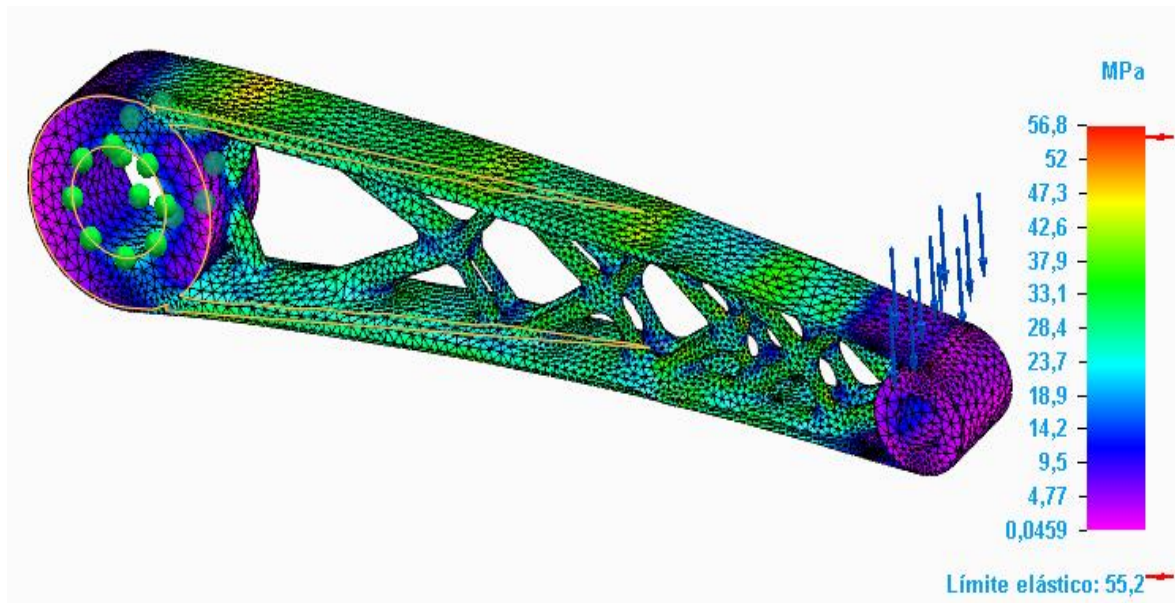


Ilustración 81. Simulación FEM de la biela de la bicicleta con un 51% de reducción de masa

Como se puede observar, la tensión máxima es de 56,8 MPa, ligeramente superior al límite elástico (55,2 MPa); por lo que se concluye que la pieza sí rompe para una reducción de masa del 51%.

Por lo tanto, como se ha podido comprobar en las distintas iteraciones, la solución óptima se encuentra para una reducción de masa del 50% de masa (iteración 5); ya que la tensión máxima para esa reducción de masa es ligeramente inferior al límite elástico. Se ha podido comprobar que, reduciendo el 51% de masa (iteración 7), la tensión máxima es algo superior al límite elástico del aluminio 5050; por lo que no es factible una reducción de masa del 51%.

A continuación, se procede a realizar un refinamiento de la geometría de la iteración 5, como ya se realizó con la llave fija. Se utiliza la herramienta “Ajustar” del programa Altair Inspire, obteniendo el siguiente resultado:

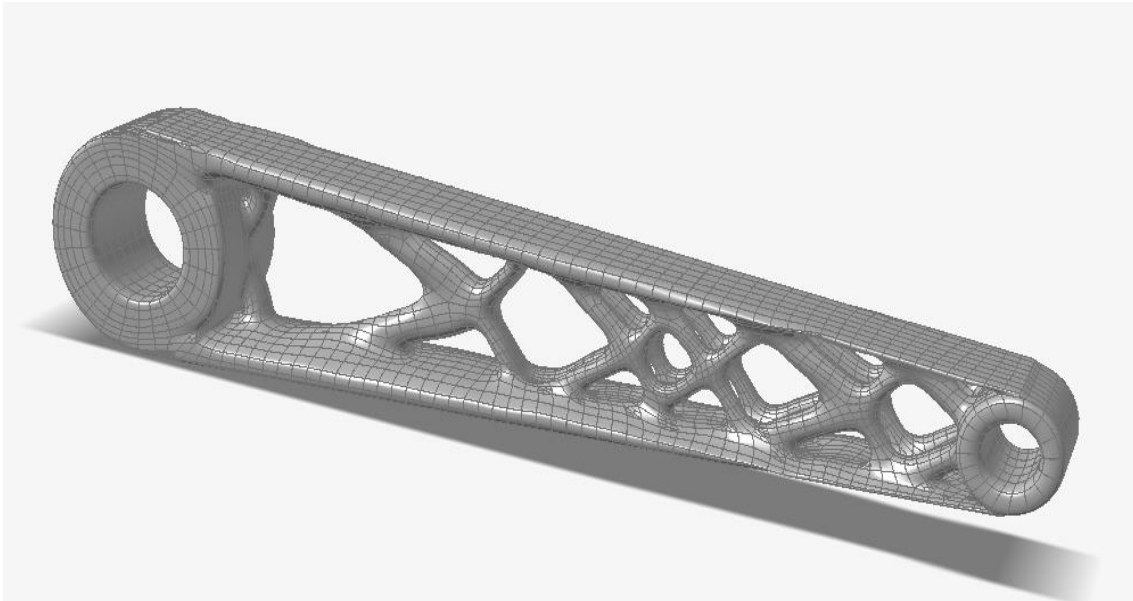


Ilustración 82. Refinado de la biela de una bicicleta

En la imagen anterior, se muestra la biela de la bicicleta refinada completamente y lista para la impresión 3D.

4. Fabricación aditiva de las piezas

En este apartado, se imprimirán las piezas resultado en 3D. Se utilizará el programa Ultimaker Cura, que permitirá convertir las piezas 3D en instrucciones para que las impresoras puedan construir las piezas capa por capa.

4.1. Impresión de los prototipos

Las piezas, tanto optimizadas como sin optimizar, se imprimirán en FDM en la impresora DT.

Imprimir en FDM (Fused Deposition Modeling) es una técnica de impresión en 3D que consiste en la fundición de un material termoplástico para depositarlo capa por capa hasta construir la pieza en cuestión. Existen más métodos de impresión 3D, pero este método es el elegido debido a su simplicidad y su relativamente costo bajo, entre otras ventajas que presenta.

Una máquina DT es una máquina de impresión 3D de deposición de filamento doble. Este tipo de máquinas están diseñadas para extruir la pieza con dos filamentos simultáneamente. Este factor proporciona una mayor ventaja frente a otras máquinas de impresión 3D con un solo filamento.

Para la impresión de las piezas, se empleará el material PLA, que es un polímero termoplástico y es de los más utilizados para la impresión 3D. Se utilizará el software Ultimaker Cura para realizar una simulación de las piezas (guardadas como archivo .stl) para la impresión.

Es importante tener en cuenta algunos factores para la impresión en 3D, como el soporte de la pieza, la temperatura del material de impresión (205 °C), la velocidad de impresión (50 mm/s), la altura de capa (0,6 mm) ...

Con el programa UltiMaker Cura se ha realizado una simulación independiente para cada pieza, aunque realmente se hayan imprimido todas juntas. En las siguientes imágenes, se muestra el resultado de las simulaciones de impresión, con las orientaciones adecuadas y los respectivos tiempos, longitud y cantidad de material utilizado:

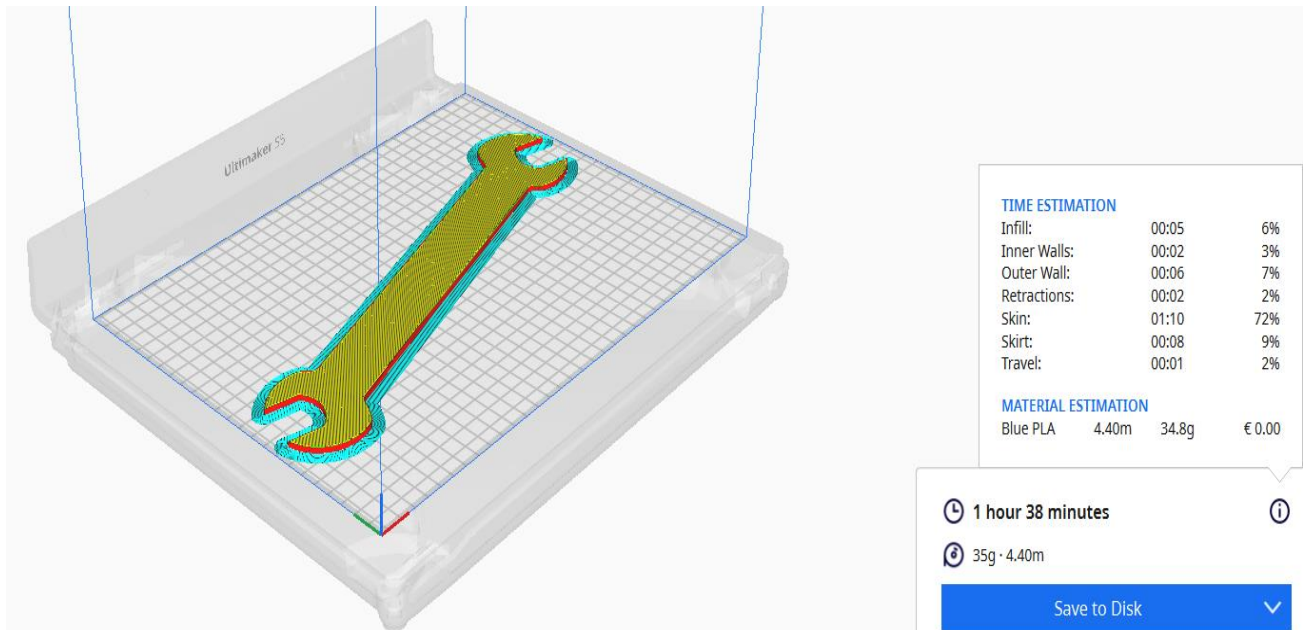


Ilustración 83. Vista preliminar de la impresión 3D de la llave fija original

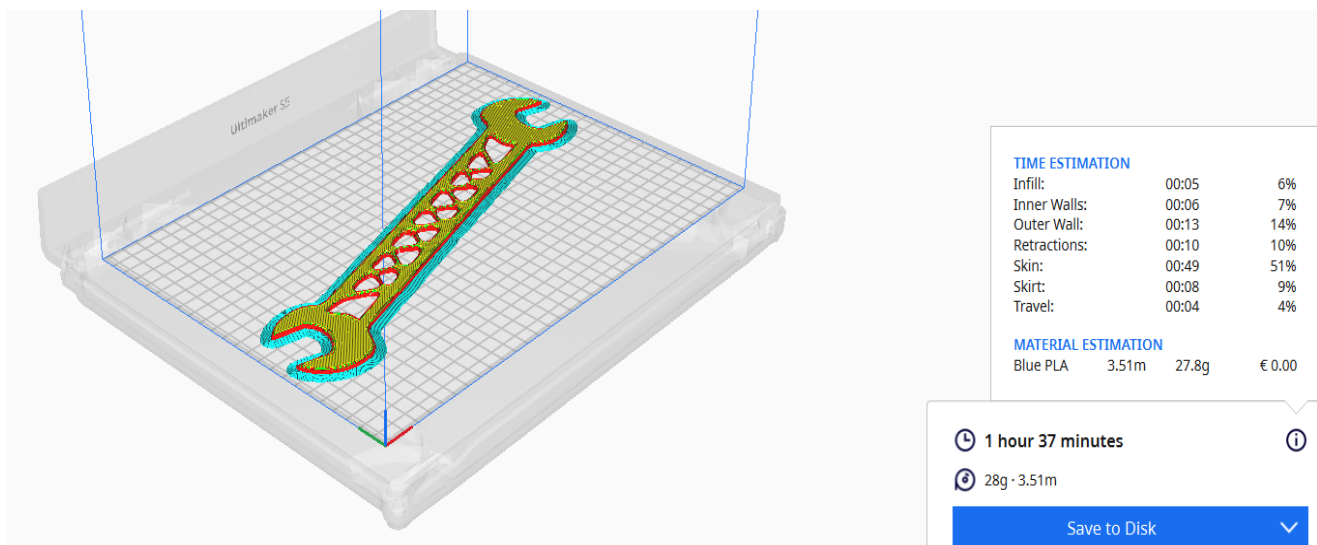


Ilustración 84. Vista preliminar de la impresión 3D de la llave fija optimizada

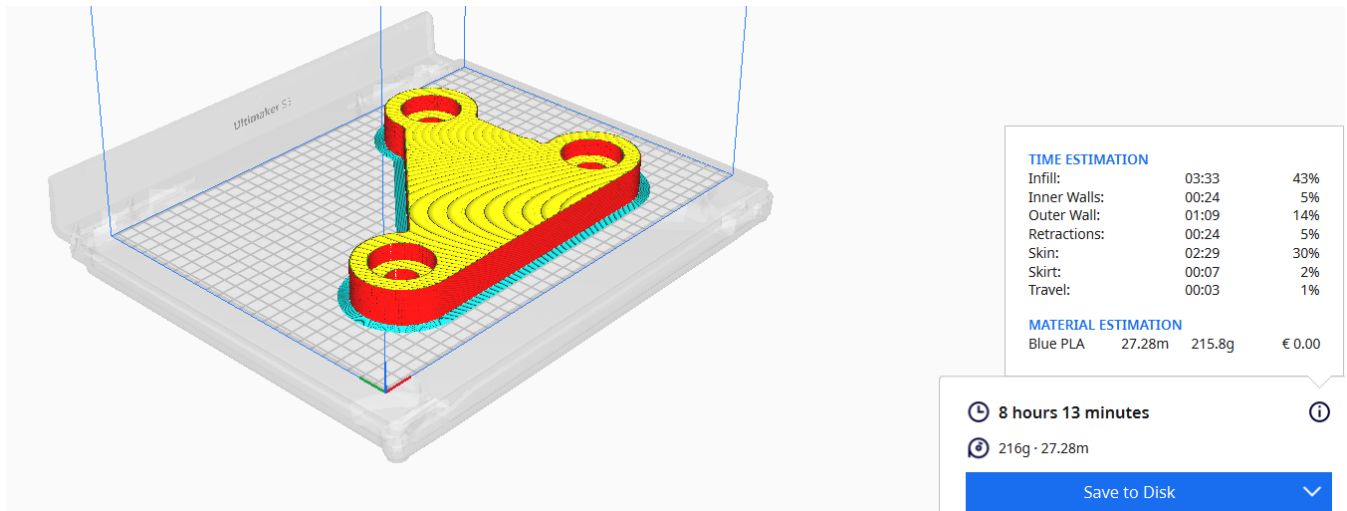


Ilustración 85. Vista preliminar de la impresión 3D del soporte original

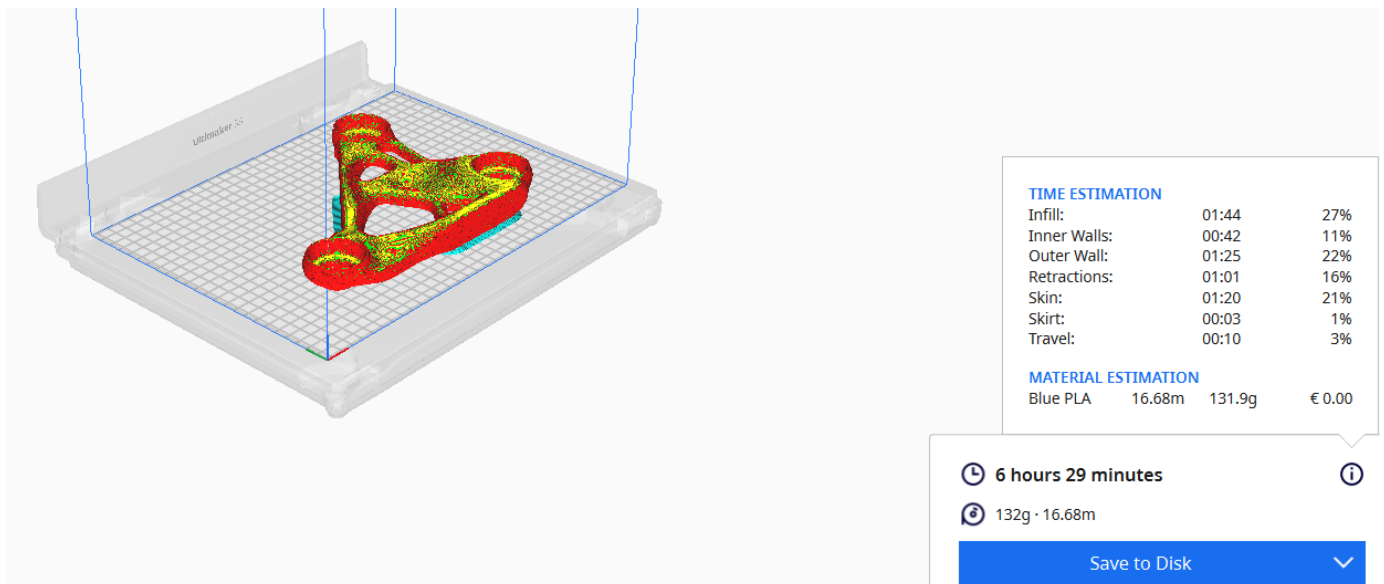


Ilustración 86. Vista preliminar de la impresión 3D del soporte optimizado

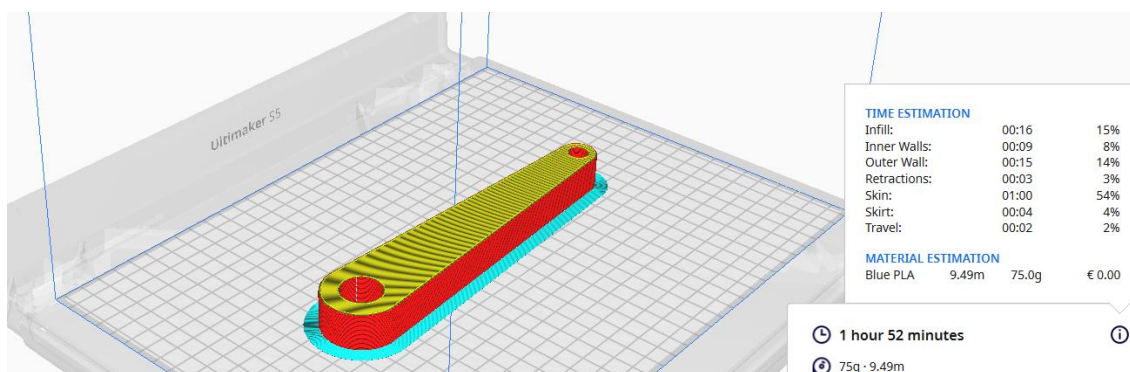


Ilustración 87. Vista preliminar de la impresión 3D de la biela original

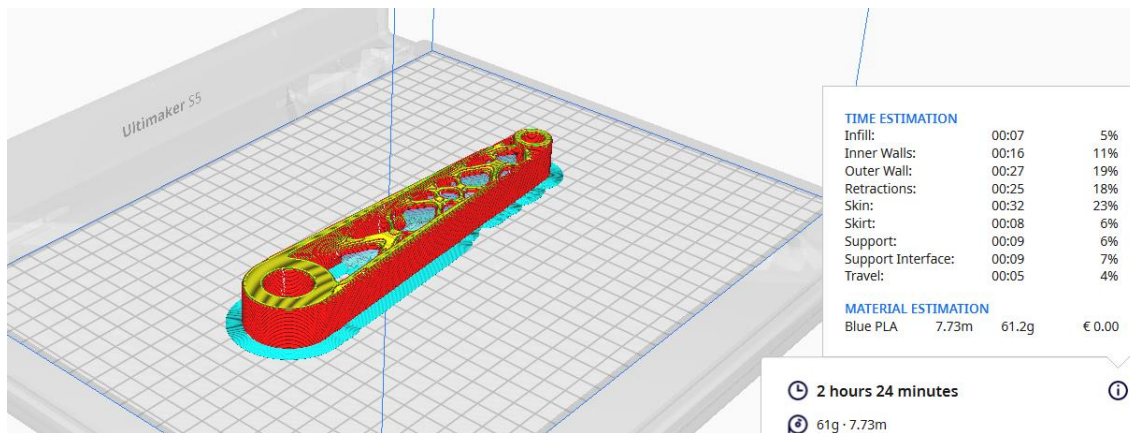


Ilustración 88. Vista preliminar de la impresión 3D de la biela optimizada

Realmente, la impresión de los prototipos se ha realizado de manera colectiva. Se ha utilizado un volumen de material de $412,368 \text{ cm}^3$, que son 511,34 g. La impresión de los prototipos optimizados y originales ha tardado un total de 21 horas y 51 minutos en la máquina DT del laboratorio de fabricación. En la siguiente ilustración, se muestra el resultado de la impresión de las piezas:



Ilustración 89. Resultado de la impresión de los prototipos

Posteriormente, se realiza el postprocesado de los prototipos. Esta fase consiste en remover el soporte de la base de las piezas y finalmente lijar las superficies más rugosas para que queden totalmente pulidas. En las siguientes imágenes, se puede observar el resultado final de los prototipos:



Ilustración 90. Impresión del prototipo de la llave fija original



Ilustración 91. Impresión del prototipo de la llave fija optimizada

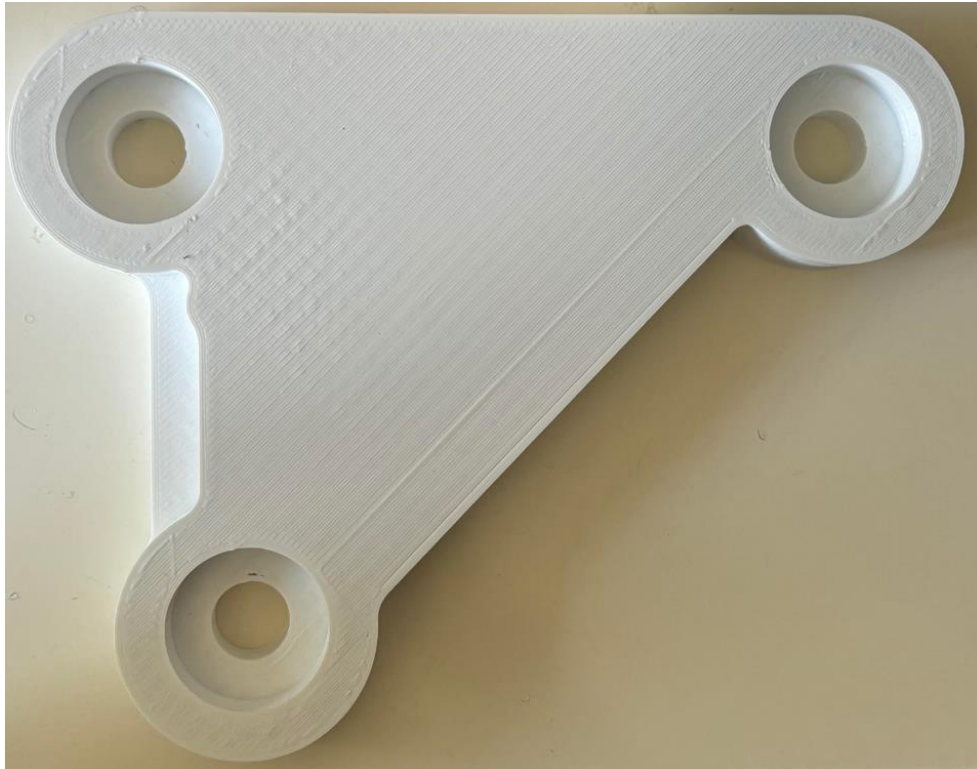


Ilustración 92. Impresión del prototipo del soporte original



Ilustración 93. Impresión del prototipo del soporte optimizado



Ilustración 94. Impresión del prototipo de la biela original



Ilustración 95. Impresión del prototipo de la biela optimizada

5. Análisis de resultados

En este apartado, se calcularán los costes de fabricación de cada una de las piezas (tanto optimizadas como sin optimizar). Se realizará el cálculo de los costes de fabricación de los prototipos y de las piezas funcionales.

También, se realizará una comparativa detallada de los costes de fabricación obtenidos y se verá cuán efectiva ha sido la optimización topológica. Esta comparativa permitirá evaluar la eficiencia económica del proceso de optimización.

5.1. Coste de fabricación de los prototipos

Es importante realizar un cálculo de los costes de fabricación de los prototipos, ya que nos proporcionan una primera vista sobre la planificación financiera y presupuestos. También existen más razones, como la viabilidad económica, la optimización del diseño, comparación de posibles tecnologías de fabricación, negociación con proveedores, determinación de precios de venta, gestión de proyectos... Es decir, nos permitirá realizar un estudio desde la viabilidad económica hasta la optimización del diseño y la estrategia de precios.

En las siguientes tablas, se muestran los costes de fabricación de los distintos prototipos (originales y optimizados):

ANÁLISIS DE COSTES PARA PROTOTIPADO DE PIEZAS EN IMPRESORA 3D -FDM	
DATOS AMORTIZACIÓN MÁQUINA	
Precio máquina (€)	150.000
Coste mantenimiento anual (€)	7.500
Años de amortización	4
Amortización (h/año) - 223 días-año / 12 horas-día	2000
Precio Hora máquina-amortización (€/h)	21,56
Precio Hora venta-público (€/h)	23,72
DATOS COSTE MATERIAL	
Coste material modelo: (€/kg)	46,00
Coste material soporte: (€/kg)	46,00
DATOS COSTE TÉCNICO ANALISTA	
Coste técnico analista del modelo - inc. desmoldeo (€/h)	30

CONCEPTOS PRESUPUESTADOS	Opción Solido	Costes parciales
Material modelo (g)	34,80	1,60 €/ud
Soporte modelo (g)	1,74	0,08 €/ud
Tiempo modelo (h)	1,60	37,95 €/ud
Tiempo técnico-analista (h)	0,25	7,50 €
Cantidad de piezas	1,00	
Coste unitario (€) en ICAI + IVA	127,09 €/Ud	
Coste total (€) en ICAI + IVA	127,09 €	

Tabla 1. Coste de fabricación del prototipo de la llave fija original

ANÁLISIS DE COSTES PARA PROTOTIPADO DE PIEZAS EN IMPRESORA 3D -FDM	
DATOS AMORTIZACIÓN MÁQUINA	
Precio máquina (€)	150.000
Coste mantenimiento anual (€)	7.500
Años de amortización	4
Amortización (h/año) - 223 días-año / 12 horas-día	2000
Precio Hora máquina-amortización (€/h)	21,56
Precio Hora venta-público (€/h)	23,72
DATOS COSTE MATERIAL	
Coste material modelo: (€/kg)	46,00
Coste material soporte: (€/kg)	46,00
DATOS COSTE TÉCNICO ANALISTA	
Coste técnico analista del modelo - inc. desmoldeo (€/h)	30

CONCEPTOS PRESUPUESTADOS	Opción Solido	Costes parciales
Material modelo (g)	27,80	1,28 €/ud
Soporte modelo (g)	1,39	0,06 €/ud
Tiempo modelo (h)	1,60	37,95 €/ud
Tiempo técnico-analista (h)	0,25	7,50 €
Cantidad de piezas	1,00	
Coste unitario (€) en ICAI + IVA	110,67 €/Ud	
Coste total (€) en ICAI + IVA	110,67 €	

Tabla 2. Coste de fabricación del prototipo de la llave fija optimizada

ANÁLISIS DE COSTES PARA PROTOTIPADO DE PIEZAS EN IMPRESORA 3D -FDM		
DATOS AMORTIZACIÓN MÁQUINA		
Precio máquina (€)		150.000
Coste mantenimiento anual (€)		7.500
Años de amortización		4
Amortización (h/año) - 223 días-año / 12 horas-día		2000
Precio Hora máquina-amortización (€/h)		21,56
Precio Hora venta-público (€/h)		23,72
DATOS COSTE MATERIAL		
Coste material modelo: (€/kg)		46,00
Coste material soporte: (€/kg)		46,00
DATOS COSTE TÉCNICO ANALISTA		
Coste técnico analista del modelo - inc. desmoldeo (€/h)		30
CONCEPTOS PRESUPUESTADOS		
	Opción Solido	Costes parciales
Material modelo (g)	215,80	9,93 €/ud
Soporte modelo (g)	10,79	0,50 €/ud
Tiempo modelo (h)	8,20	194,49 €/ud
Tiempo técnico-analista (h)	0,25	7,50 €
Cantidad de piezas	1,00	
Coste unitario (€) en ICAI + IVA	708,26 €/Ud	
Coste total (€) en ICAI + IVA	708,26 €	

Tabla 3. Coste de fabricación del prototipo de soporte de la bomba original

ANÁLISIS DE COSTES PARA PROTOTIPADO DE PIEZAS EN IMPRESORA 3D -FDM		
DATOS AMORTIZACIÓN MÁQUINA		
Precio máquina (€)		150.000
Coste mantenimiento anual (€)		7.500
Años de amortización		4
Amortización (h/año) - 223 días-año / 12 horas-día		2000
Precio Hora máquina-amortización (€/h)		21,56
Precio Hora venta-público (€/h)		23,72
DATOS COSTE MATERIAL		
Coste material modelo: (€/kg)		46,00
Coste material soporte: (€/kg)		46,00
DATOS COSTE TÉCNICO ANALISTA		
Coste técnico analista del modelo - inc. desmoldeo (€/h)		30
CONCEPTOS PRESUPUESTADOS		
	Opción Solido	Costes parciales
Material modelo (g)	131,90	6,07 €/ud
Soporte modelo (g)	6,60	0,30 €/ud
Tiempo modelo (h)	6,50	154,17 €/ud
Tiempo técnico-analista (h)	0,25	7,50 €
Cantidad de piezas	1,00	
Coste unitario (€) en ICAI + IVA	471,11 €/Ud	
Coste total (€) en ICAI + IVA	471,11 €	

Tabla 4. Coste de fabricación del prototipo de soporte de la bomba optimizado

ANÁLISIS DE COSTES PARA PROTOTIPADO DE PIEZAS EN IMPRESORA 3D -FDM	
DATOS AMORTIZACIÓN MÁQUINA	
Precio máquina (€)	150.000
Coste mantenimiento anual (€)	7.500
Años de amortización	4
Amortización (h/año) - 223 días-año / 12 horas-día	2000
Precio Hora máquina-amortización (€/h)	21,56
Precio Hora venta-público (€/h)	23,72
DATOS COSTE MATERIAL	
Coste material modelo: (€/kg)	46,00
Coste material soporte: (€/kg)	46,00
DATOS COSTE TÉCNICO ANALISTA	
Coste técnico analista del modelo - inc. desmoldeo (€/h)	30

CONCEPTOS PRESUPUESTADOS	Opción Solido	Costes parciales
Material modelo (g)	75,00	3,45 €/ud
Soporte modelo (g)	3,75	0,17 €/ud
Tiempo modelo (h)	1,87	44,35 €/ud
Tiempo técnico-analista (h)	0,25	7,50 €
Cantidad de piezas	1,00	
Coste unitario (€) en ICAI + IVA	227,80 €/Ud	
Coste total (€) en ICAI + IVA	227,80 €	

Tabla 5. Coste de fabricación del prototipo de la biela original

ANÁLISIS DE COSTES PARA PROTOTIPADO DE PIEZAS EN IMPRESORA 3D -FDM	
DATOS AMORTIZACIÓN MÁQUINA	
Precio máquina (€)	150.000
Coste mantenimiento anual (€)	7.500
Años de amortización	4
Amortización (h/año) - 223 días-año / 12 horas-día	2000
Precio Hora máquina-amortización (€/h)	21,56
Precio Hora venta-público (€/h)	23,72
DATOS COSTE MATERIAL	
Coste material modelo: (€/kg)	46,00
Coste material soporte: (€/kg)	46,00
DATOS COSTE TÉCNICO ANALISTA	
Coste técnico analista del modelo - inc. desmoldeo (€/h)	30

CONCEPTOS PRESUPUESTADOS	Opción Solido	Costes parciales
Material modelo (g)	61,20	2,82 €/ud
Soporte modelo (g)	3,06	0,14 €/ud
Tiempo modelo (h)	2,40	56,93 €/ud
Tiempo técnico-analista (h)	0,25	7,50 €
Cantidad de piezas	1,00	
Coste unitario (€) en ICAI + IVA	208,00 €/Ud	
Coste total (€) en ICAI + IVA	208,00 €	

Tabla 6. Coste de fabricación del prototipo de la biela optimizada

5.2. Coste de fabricación de las piezas originales

El presupuesto de fabricación de las piezas originales se hará con la ayuda del fabricante *Xometry*. Esta empresa permite a los clientes cargar sus diseños CAD y recibir cotizaciones de manera instantánea. Ofrece varios servicios, entre los cuales se encuentra la impresión 3D o mecanizado CNC.

Primeramente, se ha de guardar las geometrías como un archivo .stp y luego abrir cada una ellas en la página web de la propia empresa. Se ha de especificar el tipo de material para cada pieza (que será el establecido en apartados anteriores para la optimización topológica de cada pieza), la tolerancia general (por defecto) y el acabado superficial (por defecto). Se elegirá la tecnología “CNC machining”, que es un proceso de fabricación en el cual la máquina se controla a partir de un ordenador que remueve material de una pieza inicial de trabajo, con el fin de dar forma a la pieza geométrica que se quiere obtener. También se valorará la opción de impresión 3D para comparar los costes con CNC machining.


Si se quisiera realizar una fabricación masiva o por lotes, lo idóneo sería la fabricación de la llave fija por forja. Sin embargo, se ha realizado el cálculo del coste de fabricación pensando en una unidad funcional para las tres piezas; para ello, se ha escogido la opción de mecanizado CNC.

Para los modelos originales, se escogerá la tecnología de fabricación más barata para la fabricación de los modelos originales. Puede ser por arranque de material, también llamada sustractiva (convencional o CNC) o por fundición (arena, cáscara o inyectada). La tecnología de fabricación depende, entre otros factores, de la geometría y del tamaño del lote. Al ser geometrías algo complejas, es posible que algunos modelos no se puedan fabricar con la tecnología CNC, por lo que se recurrirá a la impresión 3D metálica. En cualquier caso, se realizará una comparativa de costes entre CNC e impresión 3D metálica.

Con esto, el fabricante *Xometry* nos proporciona el presupuesto de cada uno de los modelos originales diseñados.

5.2.1. Coste de fabricación de la llave fija original

Llave inglesa (pieza_bien_hecha).stp Pieza 1/8

Proceso de fabricación / Material Cant.: 1 

Tecnología: [Guía de selección de tecnología](#)

Mecanizado CNC ▼

Material: 47 opciones disponibles [Guía de selección de materiales](#)

Acero inoxidable 303 / 1.4305 / X10CrNiS18-9 ▼

Más información sobre [este material](#)

Características avanzadas

Acabado:

Estándar ▼

La tolerancia más estrecha:

Estándar

14 días laborables

124,33 €

124,33 € / unidad


Exprés ⓘ

11 días laborables

198,93 €

198,93 € / unidad


[Abrir 3D](#)



311.9mm × 130.6mm × 3.0mm

Ilustración 96. Coste de fabricación del modelo de llave fija original por CNC

Llave inglesa (pieza_bien_hecha).stl ← Pieza 4/8 →

Proceso de fabricación / Material Cant.: 1 

Tecnología: [Guía de selección de tecnología](#)

Sinterizado Láser Directo de Metales ▼

Material: 8 opciones disponibles [Guía de selección de materiales](#)

Acero para herramientas 1.2709 / MS1 ▼

Más información sobre [este material](#)

Resolución (espesor de capa):

Económica (>60 µm) ▼

Características avanzadas

Acabado:

Estándar

14 días laborables


102,00 €

102,00 € / unidad

Exprés

Opción no está disponible

[Abrir 3D](#)



62.4mm × 26.1mm × 0.6mm

Ilustración 97. Coste de fabricación del modelo de llave fija original por I3D

Para poder realizar el cálculo del coste de fabricación de la llave fija por I3D, ha sido necesario reducir el tamaño de la llave fija un 400%, por lo que el presupuesto será 4 veces mayor, es decir, 408 €.

Como se puede observar, resulta más caro la fabricación de la llave fija por I3D en comparación con CNC, por lo que la tecnología de fabricación escogida para la llave fija será CNC.

5.2.2. Coste de fabricación del soporte original

Soporte bomba (pieza_bien_hecha).stl ← Pieza 8/1

Proceso de fabricación / Material Cant.: 1

Tecnología: [Guía de selección de tecnología](#)

Mecanizado CNC

Material: 47 opciones disponibles [Guía de selección de materiales](#)

Aluminio 5083 / 3.3547 / Al-Mg4.5Mn

Más información sobre [este material](#)

Características avanzadas

Acabado: Estándar

La tolerancia más estrecha: ISO 2768 - medium (Standard)

¿No estoy seguro de la [normas de tolerancia?](#)

Roscas y taladros roscados: 0

Se requiere un presupuesto manual


Por favor, proceda con una solicitud de presupuesto manual. También puede dividir las partes en diferentes presupuestos para agilizar el proceso.

DFM Feedback

Proceso de fabricación incompatible

[Mostrar menos](#)

El presupuesto automático no está disponible para los archivos de formato de malla con el proceso de mecanizado CNC seleccionado.
Recomendación: Cambie el proceso de fabricación a uno de los métodos de impresión 3D.



[Abrir 3D](#)

30.1mm × 23.1mm × 3.0mm

Ilustración 98. Fabricación del modelo de soporte original por CNC

Se puede observar que el fabricante no permite esta fabricación con la tecnología CNC debido a la complejidad de fabricación. Por lo tanto, se escogerá la I3D para la fabricación del soporte original.

Soporte bomba (pieza_bien_hecha).stl ← Pieza 8/8

Proceso de fabricación / Material Cant.: 1 [\[info\]](#)

Tecnología: [Guía de selección de tecnología](#)

Sinterizado Láser Directo de Metales

Material: 8 opciones disponibles [Guía de selección de materiales](#)

Aluminio AlSi10Mg

Más información sobre [este material](#)

Resolución (espesor de capa):

Económica (>60 µm)

Características avanzadas

Acabado:

Estándar


12 días laborables

102,00 €

102,00 € / unidad

Exprés

Opción no está disponible



[Abrir 3D](#)

30.1mm × 23.1mm × 3.0mm

Ilustración 99. Coste de fabricación del modelo del soporte original por I3D

Al igual que ocurrió con la llave fija, se ha tenido que reducir el volumen de la pieza para poder presupuestar el modelo por I3D. Por lo tanto, el coste de fabricación es de 918€.

5.2.3. Coste de fabricación de la biela original

Biela (pieza_bien_hecha).stp ← Pieza 5/8

Proceso de fabricación / Material Cant.: 1 [\[info\]](#)

Tecnología: [Guía de selección de tecnología](#)

Mecanizado CNC

Material: 47 opciones disponibles [Guía de selección de materiales](#)

Aluminio 5083 / 3.3547 / Al-Mg4.5Mn

Más información sobre [este material](#)

Características avanzadas

Acabado:

Estándar

La tolerancia más estrecha:

Estándar

14 días laborables

95,97 €


95,97 € / unidad

Exprés ⓘ

11 días laborables

153,55 €

153,55 € / unidad



[Abrir 3D](#)

200.0mm × 40.0mm × 20.0mm

Ilustración 100. Coste de fabricación del modelo de la biela original por CNC

Biela (pieza_bien_hecha).stp ← Pieza 5/8

Proceso de fabricación / Material Cant.: 1

Tecnología: [Guía de selección de tecnología](#)

Sinterizado Láser Directo de Metales ▼

Material: 8 opciones disponibles [Guía de selección de materiales](#)

Aluminio AlSi10Mg ▼

Más información sobre [este material](#)

Resolución (espesor de capa):

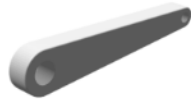
Económica (>60 µm) ▼

Características avanzadas

Acabado:

Estándar
12 días laborables
403,65 €
403,65 € / unidad

Exprés
Opción
no está
disponible



200.0mm × 40.0mm × 20.0mm

[Abrir 3D](#)

Ilustración 101. Coste de fabricación del modelo de la biela original por I3D

Los costes obtenidos para cada geometría original y tecnología de fabricación se muestran en la siguiente tabla:

Modelo original	CNC	I3D
Llave fija	124,33 €	408 €
Soporte de bomba	-	918 €
Biela de bicicleta	95,97 €	403,65 €

Tabla 7. Resumen de costes de fabricación de los modelos originales

5.3. Coste de fabricación de las piezas optimizadas

Al igual que las piezas originales, se recurrirá al fabricante *Xometry* para el cálculo de los costes de fabricación de las piezas optimizadas.

Para los modelos optimizados, se recurrirá a la impresión 3D metálica, ya que son piezas muy complejas que solamente podrán ser fabricadas con esta tecnología. En caso de poder fabricarse por CNC, se realizará una comparación de costes

5.3.1. Coste de fabricación de la llave fija optimizada

Llave inglesa (20 masa).stp ← Pieza 2/8


<p>Proceso de fabricación / Material</p> <p>Cant.: <input type="text" value="1"/> L</p> <p>Tecnología: Guía de selección de tecnología</p> <p><input type="text" value="Mecanizado CNC"/></p> <p>Material: 47 opciones disponibles Guía de selección de materiales</p> <p><input type="text" value="Acero inoxidable 303 / 1.4305 / X10CrNiS18-9"/></p> <p>Más información sobre este material</p> <hr/> <p>Características avanzadas</p> <p>Acabado:</p> <p><input type="text" value="Estándar"/></p> <p>La tolerancia más estrecha:</p>	<table border="1"> <tr> <td> <p>Estándar</p> <p>14 días laborables</p> <p>150,31 €</p> <p>150,31 € / unidad</p> </td> <td> <p>Exprés [ⓘ]</p> <p>11 días laborables</p> <p>240,50 €</p> <p>240,50 € / unidad</p> </td> </tr> </table> <div style="text-align: center;">  <p>Abrir 3D</p> <p>311.9mm × 130.6mm × 3.0mm</p> </div>	<p>Estándar</p> <p>14 días laborables</p> <p>150,31 €</p> <p>150,31 € / unidad</p>	<p>Exprés [ⓘ]</p> <p>11 días laborables</p> <p>240,50 €</p> <p>240,50 € / unidad</p>
<p>Estándar</p> <p>14 días laborables</p> <p>150,31 €</p> <p>150,31 € / unidad</p>	<p>Exprés [ⓘ]</p> <p>11 días laborables</p> <p>240,50 €</p> <p>240,50 € / unidad</p>		

Ilustración 102. Coste de fabricación del modelo de llave fija optimizada por CNC

Llave inglesa (20 masa).stl ← Pieza 3/8

Proceso de fabricación / Material Cant.: 1

Tecnología: [Guía de selección de tecnología](#)

Sinterizado Láser Directo de Metales

Material: 8 opciones disponibles [Guía de selección de materiales](#)

Acero inoxidable 17-4PH / 1.4542 / X5CrNiCuNb16-4

Más información sobre [este material](#)

Resolución (espesor de capa):

Económica (>60 µm)

Características avanzadas

Acabado:

Estándar


12 días laborables

102,00 €

102,00 € / unidad

Exprés

Opción
no está
disponible



62.4mm × 26.1mm × 0.6mm

[Abrir 3D](#)

Ilustración 103. Coste de fabricación del modelo de llave fija optimizada por I3D

Al igual que ocurrió con la llave fija original, hay que multiplicar dicho presupuesto por 4, por lo que el coste de fabricación de la llave fija optimizada por I3D es de 408 €.

5.3.2. Coste de fabricación del soporte optimizado

Soporte bomba (51 masa).stl ← Pieza 7/8

Proceso de fabricación / Material Cant.: 1

Tecnología: [Guía de selección de tecnología](#)

Sinterizado Láser Directo de Metales

Material: 8 opciones disponibles [Guía de selección de materiales](#)

Aluminio AlSi10Mg

Más información sobre [este material](#)

Resolución (espesor de capa):

Económica (>60 µm)

Características avanzadas

Acabado:

Estándar


12 días laborables

807,31 €

807,31 € / unidad

Exprés

Opción
no está
disponible



228.5mm × 177.6mm × 24.0mm

[Abrir 3D](#)

Ilustración 104. Coste de fabricación del modelo del soporte optimizado por I3D

5.3.3. Coste de fabricación de la biela optimizada

Biela (50 masa).stl ← Pieza 6/8

Proceso de fabricación / Material Cant.: 1

Tecnología: [Guía de selección de tecnología](#)

Mecanizado CNC

Material: 47 opciones disponibles [Guía de selección de materiales](#)

Aluminio 5083 / 3.3547 / Al-Mg4.5Mn

Más información sobre [este material](#)

Características avanzadas

Acabado: Estándar

La tolerancia más estrecha: ISO 2768 - medium (Standard)

¿No estoy seguro de la [normas de tolerancia?](#)

Roscas y taladros roscados: 0

Se requiere un presupuesto manual

Por favor, proceda con una solicitud de presupuesto manual. También puede dividir las partes en diferentes presupuestos para agilizar el proceso.

⚠ DFM Feedback

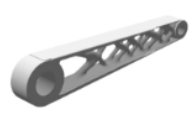
Proceso de fabricación incompatible

[Mostrar menos](#)

El presupuesto automático no está disponible para los archivos de formato de malla con el proceso de mecanizado CNC seleccionado.

Recomendación: Cambie el proceso de fabricación a uno de los métodos de impresión 3D.

[Abrir 3D](#)



199.0mm × 40.0mm × 20.0mm

Ilustración 105. Fabricación del modelo de la biela optimizada por CNC

Biela (50 masa).stl ← Pieza 6/8

Proceso de fabricación / Material Cant.: 1

Tecnología: [Guía de selección de tecnología](#)

Sinterizado Láser Directo de Metales

Material: 8 opciones disponibles [Guía de selección de materiales](#)

Aluminio AlSi10Mg

Más información sobre [este material](#)

Resolución (espesor de capa): Económica (>60 µm)

Características avanzadas

Acabado:

Estándar

12 días laborables

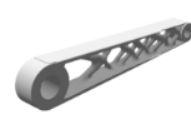
239,72 €

239,72 € / unidad

Exprés

Opción no está disponible

[Abrir 3D](#)



199.0mm × 40.0mm × 20.0mm

Ilustración 106. Coste de fabricación del modelo de la biela optimizada por I3D

Los costes obtenidos para cada geometría optimizada y tecnología de fabricación se muestran en la siguiente tabla:

Modelo optimizado	CNC	I3D
Llave fija	150,31 €	408 €
Soporte de bomba	-	807,31 €
Biela de bicicleta	-	239,72 €

Tabla 8. Resumen de costes de fabricación de los modelos optimizados

5.4. Comparativa de costes entre piezas originales y optimizadas

En los apartados anteriores, se han obtenido los costes de fabricación de las geometrías, tanto originales como optimizadas. La optimización topológica ha conseguido un ahorro de costes, manteniendo el comportamiento de las distintas piezas. En la siguiente tabla, se puede observar las diferencias económicas referidas a la fabricación de cada una de las piezas:

	Tipo	CNC	I3D
Llave fija	Original	124,33 €	408 €
	Optimizado	150,31 €	408 €
Soporte de bomba	Original	-	918 €
	Optimizado	-	807,31
Biela de bicicleta	Original	95,97 €	403,65 €
	Optimizado	98,53 €	239,72 €

Tabla 9. Resumen de costes de fabricación de las piezas originales y optimizadas

Como se puede observar en la tabla anterior, resulta más barato emplear CNC para la fabricación de los modelos originales frente a la impresión 3D metálica. Al querer una unidad funcional, se escogerá la tecnología CNC para la llave fija original y la biela original. Para el soporte de la bomba, se empleará la impresión 3D, ya que la geometría es demasiado compleja para su fabricación por CNC.

Respecto a los costes de fabricación de los modelos optimizados, se puede observar que la tecnología CNC es también más barata que la impresión 3D; por lo que será la tecnología elegida para la llave fija y la biela de bicicleta. El soporte optimizado, al igual que ocurre con el soporte original, solamente se puede fabricar por impresión 3D debido a la complejidad de la geometría.

En cuanto a la llave fija, resulta más barato fabricar la llave fija original que fabricar la llave fija optimizada. Esto es debido a la complejidad de la geometría de la llave fija optimizada; ya que la llave fija original contiene las superficies totalmente lisas y planas, mientras que la optimizada es más compleja.

Al igual ocurre con la biela de la bicicleta, aunque la diferencia de costes de fabricación por CNC no sea tan grande. Se puede observar que el coste de fabricación por impresión 3D es más barato en el modelo optimizado que en el original.

Por último, el soporte de la bomba no puede fabricarse por CNC, por lo que la única solución posible es su fabricación por impresión 3D. La fabricación por impresión 3D del soporte original resulta más cara que la fabricación del soporte optimizado.

Concluyendo, se ha conseguido un ahorro de costes de fabricación para el soporte de la bomba. Sin embargo, los costes de fabricación de la llave fija y biela originales son más baratos que los costes de fabricación de la llave fija y biela optimizados.

La pregunta que uno se puede hacer es por qué los costes de fabricación de las piezas optimizadas son más caros que los originales, y para qué serviría entonces la optimización topológica. Es lógico que los costes de fabricación de algunos modelos optimizados sean más caros que los originales; esto se debe a la complejidad de los modelos optimizados y su esfuerzo para realizar su fabricación. No siempre se va a conseguir costes más baratos para las piezas optimizadas; si esto ocurriera, todas las piezas que existen estarían optimizadas.

Por otro lado, uno de los objetivos de la optimización topológica es minimizar los costes de fabricación, pero no es el único. Existen sectores de la ingeniería, como el sector aeroespacial o automovilismo, en los que el presupuesto no es problema alguno. Por ejemplo, un satélite notará gran diferencia entre una pieza de mayor peso y otra de menor peso, mientras que el presupuesto no será problema.

La optimización topológica ha permitido convertir productos de consumo en piezas más simples de menor volumen y peso, minimizando los costes de fabricación en algunos casos y reduciendo los desechos de material. No solo se consigue mejorar la eficiencia y el rendimiento de los productos de consumo, sino que también se contribuye positivamente al desarrollo sostenible y responsable de las tecnologías y productos del futuro.

Es interesante aplicar la optimización topológica, ya que se puede observar que es una técnica muy exitosa que ha permitido generar piezas de menor peso y, por lo tanto, menor volumen. Este factor permite el ahorro de costes y material, aumentando el rendimiento para cada una de las piezas estudiadas en el presente proyecto; además de mantener un buen compromiso con la sostenibilidad y el medio ambiente.

La optimización topológica no solo se centra en la reducción de peso, sino que también mantiene la integridad estructural y funcionalidad de los elementos. Se han obtenido soluciones más innovadoras que ofrecen ventajas más competitivas en el mercado; ya que son piezas que se fabrican a gran escala.

6. Conclusiones

La optimización topológica es una técnica que permite crear nuevos diseños más eficientes y de mayor rendimiento en una gran cantidad de aplicaciones. Además, la optimización topológica tiene un impacto ambiental positivo, ya que se disminuye el desperdicio y consumo de recursos. La optimización topológica se ha implementado en el campo de la ingeniería y el diseño.

En el presente proyecto, se ha estudiado los fundamentos de la optimización topológica y se han puesto en práctica en tres distintos ejemplos de productos de consumo (llave fija, soporte de bomba y biela de bicicleta).

También se ha estudiado todas las ventajas que ofrece la optimización topológica, así como su alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible. Los principales Objetivos de Desarrollo Sostenible son: Trabajo decente y crecimiento económico (8), Industria, innovación e infraestructura (9), Producción y consumo responsables (12) y Acción por el clima (13).

Una de las principales ventajas de la optimización topológica es el ahorro de material de la pieza en cuestión. Como se ha podido observar en apartados anteriores, con la optimización topológica se ha conseguido una reducción en los costes de fabricación de las piezas. Además, también se ha conseguido una disminución de peso de las geometrías, aumentando la eficiencia de las mismas; esto se ha conseguido eliminando masa innecesaria de lugares innecesarios y redistribuyéndola en aquellas zonas de mayor necesidad.

En el presente proyecto, se ha aprendido todas las habilidades necesarias para realizar la optimización topológica de los productos de consumo comentados. Se ha ahondado en el programa SolidEdge, adquiriendo nuevas técnicas para el modelado de las geometrías que se han analizado. También se ha adquirido nuevos conocimientos para hacer simulaciones FEM de las piezas y comprobar las tensiones máximas para cada una de las iteraciones realizadas. Así, se ha conseguido terminar de familiarizarse con la aplicación de cargas, restricciones y condiciones de contorno necesarias para realizar el análisis. Además, se ha utilizado la opción de diseño generativo que ofrece SolidEdge; en el que se ha aprendido todas las herramientas necesarias (desde la definición de material hasta todas las condiciones de contorno) para realizar reducciones de material de las piezas y conseguir un diseño óptimo.

Asimismo, también se ha aprendido los principales fundamentos de la fabricación aditiva, los diversos procesos de fabricación, el material empleado... Ha sido importante para

realizar una estimación de los costes y hacer una comparación entre el coste de la pieza sin optimizar y el coste final de la pieza optimizada.

Concluyendo, la optimización topológica permite explorar un espacio de diseño más amplio y descubrir soluciones óptimas, ya que utiliza algoritmos muy desarrollados hoy en día. La optimización topológica es un avance muy significativo en la ingeniería de diseño, ya que ofrece soluciones para mejorar la eficiencia y rendimiento, fomenta la innovación tecnológica y promueve la sostenibilidad.

Para dar continuidad a este proyecto y validar los resultados obtenidos, se propone la fabricación de los tres productos de consumo optimizados mediante mecanizado CNC, impresión 3D metálica y fundición al modelo perdido. Cada una de estas técnicas de fabricación presenta unas ventajas respecto a las otras que deben ser evaluadas a la hora de fabricar en masa las piezas optimizadas.

Una vez fabricadas las piezas optimizadas, es importante realizar una evaluación de las piezas. Para ello, se deben realizar ensayos para evaluar las propiedades mecánicas de las piezas:

- Tracción: para medir la ductilidad de las piezas.
- Compresión: para medir la capacidad para soportar fuerzas de compresión.
- Torsión: para medir la resistencia a la torsión y rigidez de las piezas.
- Fatiga: para estudiar el comportamiento bajo cargas cíclicas y la vida útil.

Realizar una continuación de este proyecto permitirá una completa evaluación de las piezas fabricadas, obteniéndose una completa validación de las geometrías optimizadas. Este enfoque asegurará la viabilidad de la fabricación de las piezas optimizadas, contribuirá al avance de las tecnologías de fabricación y la implementación creciente de la optimización topológica.

7. Referencias

- Nociones básicas de optimización topológica: Cómo usar modelos algorítmicos para crear un diseño ligero.
<https://formlabs.com/es/blog/optimizacion-topologica/>
- OK10-Ejemplo de Optimización Topológica_Bell crank lever documentation (2).pdf.
[file:///C:/Users/alvar/Downloads/OK10-Ejemplo%20de%20Optimizaci%C3%B3n%20Topol%C3%B3gica_Bell%20crank%20lever%20documentation%20\(2\).pdf](file:///C:/Users/alvar/Downloads/OK10-Ejemplo%20de%20Optimizaci%C3%B3n%20Topol%C3%B3gica_Bell%20crank%20lever%20documentation%20(2).pdf)
- Diagramas de flujo de Diseño-DpI3D-revMJC02.pdf.
<file:///C:/Users/alvar/Downloads/Diagramas%20de%20flujo%20de%20Dise%C3%B1o-DpI3D-revMJC02.pdf>
- Optimización Topológica en Fusion 360 (Shape Optimization) [Muestra de Curso de Simulación].
<https://www.youtube.com/watch?v=Kc32Cmyk1a8&t=485s>
- Finite Element Analysis of Bicycle Crank Arm on the Mechanical Aspect.
[file:///C:/Users/alvar/Downloads/Finite%20Element%20Analysis%20of%20Bicycle%20Crank%20Arm%20on%20the%20Mechanical%20Aspect%20\(2\).pdf](file:///C:/Users/alvar/Downloads/Finite%20Element%20Analysis%20of%20Bicycle%20Crank%20Arm%20on%20the%20Mechanical%20Aspect%20(2).pdf)
- VolumenI%2F4.pdf (us.es).
<https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/4296/fichero/VolumenI%252F4.pdf>
- Modelado y optimización del prototipado rápido-eng (1).pdf.
[file:///C:/Users/alvar/Downloads/Modelado%20y%20optimizaci%C3%B3n%20del%20prototipado%20r%C3%A1pido-eng%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/alvar/Downloads/Modelado%20y%20optimizaci%C3%B3n%20del%20prototipado%20r%C3%A1pido-eng%20(1).pdf)
- Optimización Diseño Generativo SolidEdge
<https://www.youtube.com/watch?v=vyF2-9CCChCU>
- TOPOLOGICAL_OPTIMIZATION_OF_THE_FORMULA_STUDENT_BE (3).pdf.
[file:///C:/Users/alvar/Downloads/TOPOLOGICAL_OPTIMIZATION_OF_THE_FORMULA_STUDENT_BE%20\(3\).pdf](file:///C:/Users/alvar/Downloads/TOPOLOGICAL_OPTIMIZATION_OF_THE_FORMULA_STUDENT_BE%20(3).pdf)
- Design for Additive Manufacturing (1).pdf.
[file:///C:/Users/alvar/Downloads/Design%20for%20Additive%20Manufacturing%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/alvar/Downloads/Design%20for%20Additive%20Manufacturing%20(1).pdf)
- Solid Edge Generative Design Mid-Level Customer Facing Presentation.pdf.
<file:///C:/Users/alvar/Downloads/Solid%20Edge%20Generative%20Design%20Mid-Level%20Customer%20Facing%20Presentation.pdf>
- G-DfAM-methodological proposal of generative design for AM in automotive industry(2).pdf.

- [file:///C:/Users/alvar/Downloads/G-DfAM-methodological%20proposal%20of%20generative%20design%20for%20AM%20in%20automotive%20industry%20\(2\).pdf](file:///C:/Users/alvar/Downloads/G-DfAM-methodological%20proposal%20of%20generative%20design%20for%20AM%20in%20automotive%20industry%20(2).pdf)
- Response Surface Optimization of Car Support Jack Bar-FEM (1).pdf.
[file:///C:/Users/alvar/Downloads/Response%20Surface%20Optimization%20of%20Car%20Support%20Jack%20Bar-FEM%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/alvar/Downloads/Response%20Surface%20Optimization%20of%20Car%20Support%20Jack%20Bar-FEM%20(1).pdf)
 - bike crank 2 (2).pdf.
[file:///C:/Users/alvar/Downloads/bike%20crank%202%20\(2\).pdf](file:///C:/Users/alvar/Downloads/bike%20crank%202%20(2).pdf)
 - ESFUERZO-DEFORMACIÓN LLAVE MECÁNICA (youtube.com)
<https://www.youtube.com/watch?v=kX7KFnepQmM>
 - Teoría_Curso_Ingeniería_Inversa_Solid Edge (1).pdf.
[file:///C:/Users/alvar/Downloads/Teor%C3%ADa_Curso_Ingenier%C3%ADa_Inversa_Solid%20Edge%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/alvar/Downloads/Teor%C3%ADa_Curso_Ingenier%C3%ADa_Inversa_Solid%20Edge%20(1).pdf)