



GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA DEL DISEÑO DE UN SOPORTE DE UNA POLEA CABLE CON CRITERIOS DE DISEÑO GENERATIVO Y FABRICACIÓN ADITIVA

Autor: Alba Buezo Bufalá

Director: Mariano Jiménez Calzado

Madrid

Junio 2023

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
Optimización Topológica del diseño de un soporte de una polea cable

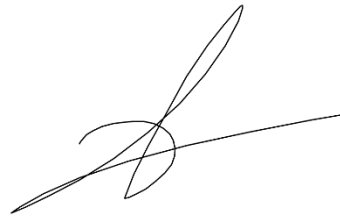
con criterios de diseño generativo y fabricación aditiva

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico **4ºGITI** 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.: **Alba Buezo Bufalá**

Fecha: 09 / 06 / 2023



Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO



Fdo.: **Mariano Jiménez Calzado**

Fecha: 09 / 06 / 2023



GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA DEL DISEÑO DE UN SOPORTE DE UNA POLEA CABLE CON CRITERIOS DE DISEÑO GENERATIVO Y FABRICACIÓN ADITIVA

Autor: Alba Buezo Bufalá

Director: Mariano Jiménez Calzado

Madrid

Junio 2023

OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA DEL DISEÑO DE UN SOPORTE DE POLEA CABLE CON CRITERIOS DE DISEÑO GENERATIVO Y FABRICACIÓN ADITIVA.

Autor: Buezo Bufalá, Alba.

Director: Jiménez Calzado, Mariano.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO

A partir de una propuesta de un conjunto mecánico (Soporte de polea cable), se ha analizado la funcionalidad de los componentes y se ha realizado un rediseño de uno de los componentes (soporte). Para el rediseño se han empleado criterios de diseño generativo y optimización topológica, y posteriormente se ha realizado el prototipo mediante impresión 3D en el laboratorio de Fabricación Aditiva.

Palabras clave: Optimización Topológica, Diseño Generativo, Fabricación aditiva

1. Introducción

El objetivo de este proyecto es optimizar la topología de una pieza para mejorar su rendimiento y eficiencia. Se han investigado varias configuraciones y distribuciones de materiales para encontrar el diseño óptimo utilizando simulaciones FEM (método de los elementos finitos). Finalmente, se han logrado reducir costos, reducir el peso total de la estructura sin comprometer su resistencia y rigidez, y mejorar la eficiencia general de la pieza mediante el uso de técnicas de optimización y el análisis de los resultados.

2. Ciclo del proyecto

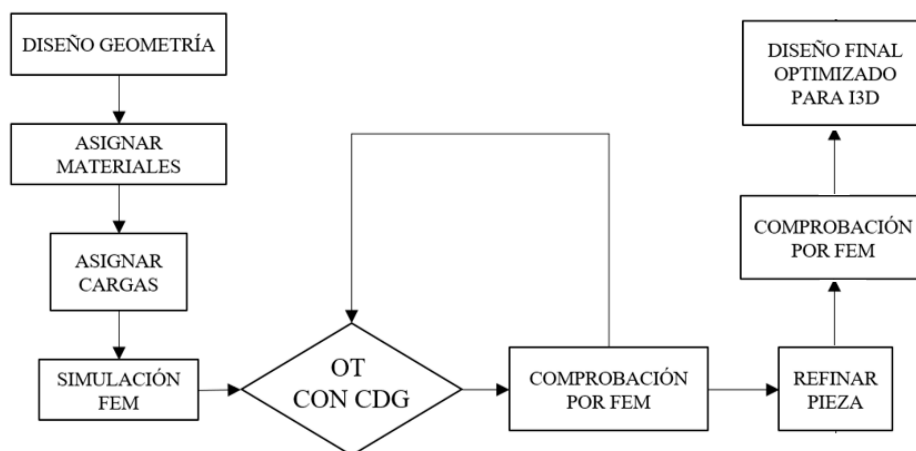


Ilustración 1 Diagrama de flujo del proyecto

Fuente propia

Para realizar la propuesta de diseño, se utilizan los planos de conjunto de una polea de cable que se encuentran en el libro "Dibujo industrial: conjuntos y despieces" de 2004, que brindan detalles detallados sobre el diseño y funcionalidad de esta pieza, incluidas dimensiones, detalles de montaje, materiales sugeridos y especificaciones de carga.



Por otro lado, nuestra pieza tendrá que soportar el peso del eje y la rueda de la polea sobre los dos agujeros principales de los soportes. Además, debemos agregar la cantidad de peso que nuestro soporte de polea puede soportar. Después de investigar otras poleas en el mercado, decidimos poner una masa de 1000 kg para el primer grupo de iteraciones y 3500 kg para el segundo grupo de iteraciones, ya que con la última iteración del primer grupo, podemos ver cómo podemos aumentar esta masa y que salga a si la pieza más rentable.

Una vez que se han realizado los cálculos, el proceso de iteraciones y simulaciones comienza a considerar las restricciones particulares de la pieza. Se simula un desplazamiento de borde de 4 mm, como si estuviera sujeto con un tornillo y arandela, al aplicar fuerzas y cojinetes en la parte interna del agujero del soporte y establecer apoyos fijos en la parte inferior de los agujeros de los soportes superiores. Además, se considera un desplazamiento vertical de las caras y se aplica una carga adicional de gravedad. Este método permite simular con precisión el comportamiento de la pieza en condiciones realistas y evaluar su rendimiento en términos de resistencia y estabilidad.

4. Resultados

Como bien se ha indicado antes, se llega a una pieza óptima tras dos grupos de iteraciones, siendo esta la que se da con un 75% de reducción de masa y que puede llegar a soportar un valor máximo de masa de 3500 kg. Al acabar, hacemos uso del programa de Altair Inspire para refinar la pieza y mediante el FEM comprobamos por última vez que la pieza no rompería con el estado de cargas impuesto. En la Ilustración posterior podemos observar las vistas de la pieza final optimizada refinada y refinada.



Ilustración 3 Vistas de la pieza óptima refinada
Fuente propia

Una vez se llega a la pieza final, se lleva a cabo un estudio de materiales para poder llevar a cabo la fabricación aditiva (FA) de los prototipos, siendo impreso el soporte sin optimizar por extrusión de material en PLA y el soporte optimizado y refinado por fusión de lecho de polvo en poliamida 11.

5. Conclusiones

La implementación de la OT ha resultado en una gran reducción en los costos de producción, lo que ha generado una disminución en el precio de 372.56 €, así como ha conseguido reducir el peso total de la estructura sin cambiar su resistencia y rigidez.

Durante el desarrollo de este proyecto, me he conseguido familiarizar con el software de Solid Edge, pudiendo ampliar mis habilidades y conocimientos sobre las herramientas de este, como comandos de modelado, ensamblajes, dibujos técnicos y simulaciones. Por otro lado, también he conseguido aprender muchos fundamentos y técnicas de la FA, como los diferentes procesos de fabricación, materiales necesarios y las consideraciones de diseño, así como el uso de la maquinaria necesaria para imprimir las piezas.

6. Referencias

[25] J. M. Auria Apilluelo, P. Ibáñez Carabantes, y P. Ubieto Artur, *Dibujo industrial: conjuntos y despieces*, 1a. ed., 2a. reimp. Madrid: Thomson-Paraninfo, 2004

TOPOLOGY OPTIMIZATION OF A CABLE PULLEY SUPPORT DESIGN USING GENERATIVE DESIGN CRITERIA AND ADDITIVE MANUFACTURING.

Author: Buezo Bufalá, Alba.

Supervisor: Jiménez Calzado, Mariano.

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

ABSTRACT

From a proposal for a mechanical set (Pole cable support), the functionality of components has been analyzed and a redesign of one of the components is carried out. (soporte). For the redesign have been used generative design criteria and topological optimization, and subsequently the prototype has been carried out by 3D printing in the laboratory of Additive Manufacturing.

Keywords: Topological Optimization, Generative Design, Additive Manufacturing.

1. Introducción

The aim of this project is to optimize the topology of a piece to improve its performance and efficiency. Various configurations and distribution of materials have been investigated to find the optimal design using FEM simulations (finite element method). Finally, we have managed to reduce costs, reduce the total weight of the structure without compromising its strength and stiffness, and improve the overall efficiency of the piece using optimization techniques and the analysis of results.

2. Project flow diagram

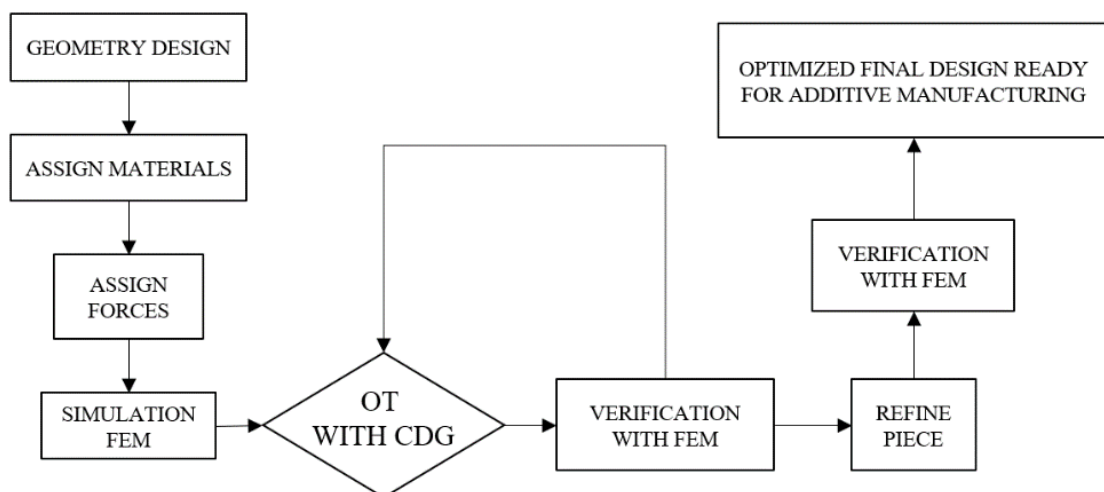


Ilustración 4 Project flow diagram

Own source

3. Description of the project

To make the design proposal, the assembly plans of a cable pool found in the 2004 book "*Dibujo industrial: conjuntos y despieces*" are used, which provide detailed details on the design and functionality of this piece, including dimensions, mounting details, suggested materials and load specifications.

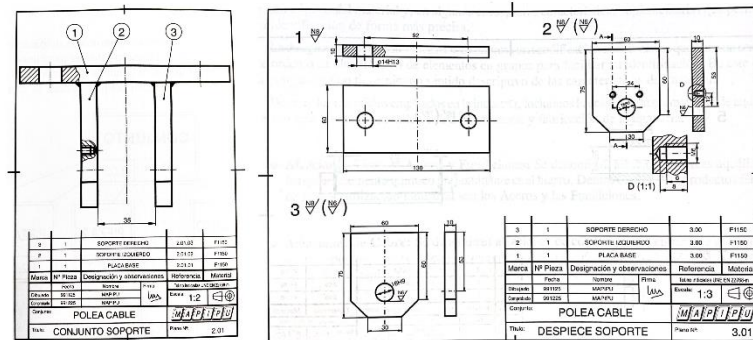


Ilustración 5 Plans of the piece to optimize

Source: (Dibujo industrial: conjuntos y despieces, 2004) [25]

On the other hand, our piece will have to withstand the weight of the axis and the wheel of the pole over the two main holes of the supports. In addition, we must add the amount of weight that our pulley support can withstand. After researching other poles on the market, we decided to put a mass of 1000 kg for the first group of iterations and 3500 kg to the second group, since with the last iteration of the first Group, we can see how we can increase this mass and that it comes out to if the most cost-effective piece.

Once the calculations have been carried out, the process of iterations and simulations begins to consider the restrictions of the piece. A 4 mm edge displacement is simulated, as if it were subjected by a screw and fender, by applying forces and pillows on the inner part of the support hole and setting fixed supports on the bottom of the holes of the upper supports. In addition, a vertical displacement of the faces is considered, and an additional load of gravity is applied. This method allows us to accurately simulate the behavior of the piece under realistic conditions and evaluate its performance in terms of strength and stability.

4. Results

As previously stated, an optimal piece is achieved after two groups of iterations, this being the one that is given with a 75% reduction in mass and that can reach a maximum mass value of 3500 kg. At the end, we use the Altair Inspire program to refine the piece and by means of the FEM we check for the last time that the piece would not break with the charging state imposed. In the Later Illustration we can observe the views of the refined, optimized final piece.



Ilustración 6 Refined optimum part views
Own source

Once the final piece is reached, a material study is carried out to carry out the additive manufacturing (FA) of the prototypes, the non-optimized support being printed by extrusion of material in PLA and the optimized and refined support by fusion of dust bed in polyamide 11.

5. Conclusions

The implementation of the OT has resulted in a significant decrease in production costs, which has generated a variation in the price of 372.56 €, as well as managed to reduce the total weight of the structure without losing its strength and rigidity.

During the development of this project, I got acquainted with Solid Edge software, where I expanded my skills and knowledge about the tools of this, such as modelling commands, assemblages, technical drawings, and simulations. On the other hand, I have also managed to learn many fundamentals and techniques of the FA, such as the different manufacturing processes, materials needed and design considerations, as well as the use of the machinery needed to print the parts.

6. References

- [25] J. M. Auria Apilluelo, P. Ibáñez Carabantes, y P. Ubieta Artur, *Dibujo industrial: conjuntos y despieces*, 1a. ed., 2a. reimp. Madrid: Thomson-Paraninfo, 2004

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN	20
1.1 OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA	20
1.2 MOTIVACIÓN DEL PROYECTO	23
1.3 OBJETIVOS DEL PROYECTO	24
1.4 OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE (ODS)	24
1.5 METODOLOGÍA DEL PROYECTO	26
2. ESTADO DE LA CUESTIÓN	27
2.1 FUNDAMENTOS DE LA FABRICACIÓN ADITIVA	27
2.2 FUNDAMENTOS DEL DISEÑO GENERATIVO	31
2.3 BREVE HISTORIA SOBRE EL ARTE GENERATIVO	33
2.1 FUNDAMENTOS DE LA OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA	35
2.2 EJEMPLOS USO DE OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA	38
2.6 TEORÍA MATEMÁTICA OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA	42
2.6.1 MÉTODO DE ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS	42
2.7 IMPLEMENTACIÓN MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS	46
2.7.1 PROCESAMIENTO PREVIO	47
2.7.1.1 SIMPLIFICACIÓN Y LIMPIEZA DE LA PIEZA	47
2.7.1.2 DISCRETIZACIÓN DE LA PIEZA	48
2.7.1.2.1 TAMAÑO DE MALLADO	49
2.7.1.2.2 GEOMETRÍA DE MALLADO	50
2.7.2 SOLUCIÓN INFORMÁTICA SOLIDEDGE	55
2.7.3 POSTPROCESO	55
3. PROPUESTA DE ESTUDIO	56
3.1 PROPUESTA DE GEOMETRÍA	57
3.2 PROPUESTA DE MATERIALES	58

3.3	CÁLCULO DE CARGAS	60
3.4	PROPUESTA DE ITERACIÓN DE OT	62
4.	METODOLOGÍA E IMPLANTACIÓN	63
4.1	DISEÑAR GEOMETRÍA	63
4.2	ASIGNAR MATERIALES	67
4.3	ASIGNAR CARGAS Y RESTRICCIONES	68
4.4	SIMULACIÓN FEM	73
4.5	OPTIMIZACIÓN DE LA PIEZA CON CDG	74
4.5.1	SERIE DE ITERACIONES 1	74
	ITERACIÓN 1	75
	ITERACION 2	76
	ITERACION 3	77
	ITERACION 4	78
	ITERACION 5	79
	ITERACION 6	80
	ITERACION 7	81
4.5.2	SERIE DE ITERACIONES 2	82
	ITERACIÓN 1.2	84
	ITERACION 2.2	85
	ITERACION 3.2	86
	ITERACION 4.2	87
	ITERACION 5.2	88
	ITERACION 6.2	89
	ITERACION 7.2	90
4.6	REFINAR GEOMETRÍA	94
4.7	VERIFICAR RENDIMIENTO CON FEM	97
5.	FABRICACIÓN DEL PROTOTIPO POR FA	98
5.1	METODOLOGÍA DE TRABAJO FA	99
5.1.1	FORMATO .STL	99
5.1.2	SOFTWARE I3D	100
5.2	TECNOLOGÍAS DE IMPRESIÓN	101

5.3	IMPRESIÓN DE PROTOTIPOS	102
5.3.1	SOPORTE SIN OPTIMIZAR.....	102
5.3.2	SOPORTE OPTIMIZADO Y REFINADO	103
6.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	107
6.1	PRESUPUESTOS ECONÓMICOS	107
6.1.1	COSTES DE PROTOTIPADO.....	107
6.1.2	COSTE DE IMPRESIÓN EN ACERO	109
6.2	ANÁLISIS Y COMPARATIVA	112
7.	CONCLUSIONES.....	113
8.	REFERENCIAS	114
9.	ANEXOS	115

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Diagrama de flujo del proyecto	4
Ilustración 2 Planos de la pieza a optimizar	5
Ilustración 3 Vistas de la pieza optima refinada.....	6
Ilustración 4 Project flow diagram	7
Ilustración 5 Plans of the piece to optimize.....	8
Ilustración 6 Refined optimum part views	9
Ilustración 7 Comparativa ilustrativa de una barra optimizada (a) paramétricamente (b) de forma y (c) topológicamente.....	20
Ilustración 8 Diagrama de flujo del ciclo de diseño de un producto para I3D.	21
Ilustración 9 Chasis de una bicicleta optimizada topológicamente	22
Ilustración 10 Pasos de la OT	22
Ilustración 11 Diagrama de flujo para pasar de diseño CAD a pieza con I3D.....	27
Ilustración 12 Detalle de la complejidad de una pieza del tamaño de una moneda.	28
Ilustración 13 Engranaje y rodamiento impresos a través de fabricación aditiva.	29
Ilustración 14 Proceso clásico de diseño.	32
Ilustración 15 Proceso de diseño generativo.	32
Ilustración 16 Juego de dados musical de Johann Philipp Kirnberger.	34
Ilustración 17 Prendas para la Prèmiere Vision Paris 2013.	35
Ilustración 18 Ciclos de diseño: tradicional y de OT	36
Ilustración 19 Ciclo de metodologia de la OT.....	37
Ilustración 20 Nueva ala prototipo con la cubierta superior quitada.	38
Ilustración 21 Estructura del coche tras haber sido optimizado topológicamente.	39
Ilustración 22 Pistones del motor 911 GT2 RS impresos for fabricación aditiva.	40
Ilustración 23 Detalle del antes y después de la OT de los pistones	41
Ilustración 24 Estructura real y esquema de cálculo	43
Ilustración 25 Detalle de una structura continua y una discreta.	43
Ilustración 26 Nodos y elementos definidos en una pieza en SolidEdge	44
Ilustración 27 Procedimiento del FEM.....	46

Ilustración 28 Procesamiento previo de la OT.	47
Ilustración 29 Modelo CAD y de mallado de una pieza con elementos tetraédricos.	48
Ilustración 30 Número de EF respecto al tiempo de computación.	49
Ilustración 31 Mallas generadas a partir de métodos algebraicos.	51
Ilustración 32 EDPs: (a)Laplace, (b) Poisson, (c) hiperbólico.	52
Ilustración 33 Pasos del método de superposición de retícula y ajuste de contorno.	53
Ilustración 34 Detalle de cómo se arrastra la malla de la base por el resto de la figura a partir del crecimiento estructurado.	53
Ilustración 35 Triangulación de Delaunay.....	54
Ilustración 36 Evolución de la malla por el método de frente de avance.	55
Ilustración 37 Diagrama de flujo del proceso del proyecto.....	56
Ilustración 38 Planos de conjunto de una polea cable.	57
Ilustración 39 Detalle de la lista de elementos del conjunto	58
Ilustración 40 Planos de conjunto de la rueda y eje de la polea cable.....	60
Ilustración 41 Soporte lateral derecho de la polea cable.	63
Ilustración 42 Diseño del agujero roscado	64
Ilustración 43 Soporte lateral izquierdo de la polea cable.....	64
Ilustración 44 Soporte superior o techo de la polea cable.	65
Ilustración 45 Conjunto de la polea cable.	65
Ilustración 46 Detalle de las características de los cordones de soldadura.	66
Ilustración 47 Adición de los cordones de soldadura.	66
Ilustración 48 Adición del acero F1150 a la lista de materiales de SolidEdge.	67
Ilustración 49 Detalle de la adición de las restricciones y cargas en la pieza	68
Ilustración 50 Detalle de la adición de la gravedad.....	68
Ilustración 51 Detalle de la división del agujero del soporte izquierdo	69
Ilustración 52 Adición del cojinete.....	69
Ilustración 53 Desplazamiento del borde de los agujeros del soporte superior.....	70
Ilustración 54 Aplicación de los apoyos fijos.....	70
Ilustración 55 Adición del deslizamiento a lo largo de las caras laterales	71
Ilustración 56 Detalle de la adición de los conectores en los cordones de soldadura	71
Ilustración 57 Detalle de la especificación de malla en zonas con mayores esfuerzos ..	72

Ilustración 58 Detalle del mallado de la pieza.....	72
Ilustración 59 Estudio estático previo a la OT	73
Ilustración 60 Detalle de las regiones preservadas en la pieza.....	74
Ilustración 61 Detalle de la reducción de la masa al 20%	75
Ilustración 62 OT de la pieza en la primera iteración.....	75
Ilustración 63 Simulación FEM a la pieza optimizada 1	75
Ilustración 64 Detalle de la reducción de la masa al 30%	76
Ilustración 65 OT de la pieza en la segunda iteración.....	76
Ilustración 66 Simulación FEM a la pieza optimizada 2	76
Ilustración 67 Detalle de la reducción de la masa al 40%	77
Ilustración 68 Simulación FEM a la pieza optimizada 3	77
Ilustración 69 OT de la pieza en la tercera iteración	77
Ilustración 70 OT de la pieza en la cuarta iteración	78
Ilustración 71 Detalle de la reducción de la masa al 50%	78
Ilustración 72 Simulación FEM a la pieza optimizada 4.....	78
Ilustración 73 OT de la pieza en la quinta iteración	79
Ilustración 74 Detalle de la reducción de la masa al 60%	79
Ilustración 75 Simulación FEM a la pieza optimizada 5	79
Ilustración 76 OT de la pieza en la sexta iteración.....	80
Ilustración 77 Detalle de la reducción de la masa al 70%	80
Ilustración 78 Simulación FEM a la pieza optimizada 5	80
Ilustración 79 OT de la pieza en la séptima iteración.....	81
Ilustración 80 Detalle de la reducción de la masa al 80%	81
Ilustración 81 Simulación FEM a la pieza optimizada 7	81
Ilustración 85 Detalle de la reducción de la masa al 30%	84
Ilustración 86 OT de la pieza en la primera iteración.....	84
Ilustración 87 Simulación FEM a la pieza optimizada 1	84
Ilustración 88 Detalle de la reducción de la masa al 30%	85
Ilustración 89 OT de la pieza en la segunda iteración.....	85
Ilustración 90 Simulación FEM a la pieza optimizada 2	85
Ilustración 91 Detalle de la reducción de la masa al 50%	86

Ilustración 92 Simulación FEM a la pieza optimizada 3.....	86
Ilustración 93 OT de la pieza en la tercera iteración	86
Ilustración 94 OT de la pieza en la cuarta iteración	87
Ilustración 95 Detalle de la reducción de la masa al 60%	87
Ilustración 96 Simulación FEM a la pieza optimizada 4.....	87
Ilustración 97 OT de la pieza en la quinta iteración	88
Ilustración 98 Detalle de la reducción de la masa al 70%	88
Ilustración 99 Simulación FEM a la pieza optimizada 5.....	88
Ilustración 100 OT de la pieza en la sexta iteración.....	89
Ilustración 101 Detalle de la reducción de la masa al 70%	89
Ilustración 102 Simulación FEM a la pieza optimizada 6.....	89
Ilustración 103 Detalle de la reducción de la masa al 75%	90
Ilustración 104 OT de la pieza en la sexta iteración.....	90
Ilustración 105 Simulación FEM a la pieza optimizada 7	91
Ilustración 106 Alzado de la pieza resultante optimizada	92
Ilustración 107 Planta de la pieza resultante optimizada.....	92
Ilustración 108 Vista derecha de la pieza optimizada resultante	93
Ilustración 109 Vista izquierda de la pieza optimizada resultante	93
Ilustración 110 Detalle de la protrusión por secciones realizada en el soporte superior	94
Ilustración 111 Detalle de la herramienta de Ajustar en Altair Inspire	95
Ilustración 112 Vistas de la pieza óptima refinada.....	95
Ilustración 113 Detalle del reajuste de los agujeros de la pieza	96
Ilustración 114 Detalle del ajuste de los agujeros para las arandelas	96
Ilustración 115 Simulación FEM de la pieza optimizada y refinada final	97
Ilustración 116 Fases de desarrollo de un producto	98
Ilustración 117 Ciclo de I3D	99
Ilustración 118 Detalle de la tolerancia de cuerda y angular en un fichero .stl.....	99
Ilustración 119 Detalle de cómo afecta el tamaño de capa.....	100
Ilustración 120 Patrones y porcentajes de I3D	100
Ilustración 121 Detalle de la orientación de la pieza en Cura	102
Ilustración 122 Ajustes de impresión de la pieza en Cura.....	102

Ilustración 123 Detalle de la orientación de la pieza en Cura	103
Ilustración 124 Ajustes de impresión de la pieza en Cura.....	103
Ilustración 125 Detalle de la cantidad de soporte que requeriría la pieza	104
Ilustración 126 Detalle de la pieza dentro de la zona de impresión en Netfabb.....	104
Ilustración 127 Soporte sin optimizar impreso.....	105
Ilustración 128 Soportes optimizados recién salidos de la impresora HP MJP	105
Ilustración 129 Comparativa entre ambos soportes.....	106
Ilustración 130 Soporte optimizado refinado tras ser limpiado.....	106
Ilustración 131 Comparativa entre tipos de fabricaciones.....	107
Ilustración 132 Comparativa entre ambas piezas	112

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Ventajas y Limitaciones actuales de la fabricación aditiva.....	30
Tabla 2 Propiedades del acero F1150 (CK55)	59

ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

OT: Optimización Topológica

DG: Diseño Generativo

CDG: Criterios de Diseño Generativo

I3D: Impresión 3D

FA: Fabricación Aditiva

FEM: "Finite Element Method": Método de los Elementos Finitos.

PLA: "Polylactic Acid": Ácido poliláctico

DMLS: "Direct Metal Laser Sintering": "Sinterización Directa por Láser de Metal"

MJP: "MultiJet Printing": "Impresión de Múltiples Inyectores"

1. INTRODUCCIÓN

1.1 OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA

La palabra "optimización" se refiere al proceso de determinar los valores de las variables involucradas en un proceso o sistema para lograr el mejor resultado posible. Al hablar de optimización, hay muchos tipos diferentes. Por ejemplo, podemos optimizar una barra de diferentes maneras dependiendo del objetivo que se tenga en mente; la Ilustración 1 muestra una comparación clara de tres tipos de optimización.

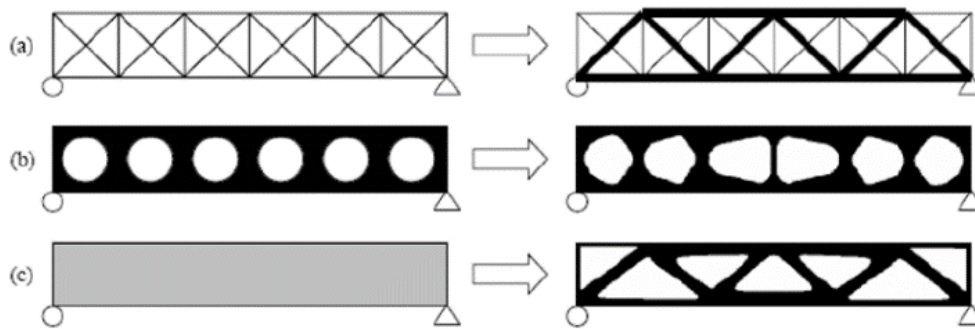


Ilustración 7 Comparativa ilustrativa de una barra optimizada (a) paramétricamente (b) de forma y (c) topológicamente

Fuente: (Chandan K. Mozumder,2010) [1]

La optimización topológica (OT) es una técnica en el campo del análisis estructural. Se basa en el análisis mecánico de un componente o estructura. Su objetivo principal es reducir el peso estructural manteniendo la funcionalidad mecánica del componente de destino. [2]

La OT ofrece un nuevo concepto de diseño estructural, a diferencia de otros tipos de optimización. Se enfoca en aplicaciones donde el peso de los componentes es crítico (por ejemplo, la industria aeroespacial).

La optimización se puede llevar a cabo en niveles de análisis más complejos, como niveles estáticos, dinámicos, plásticos, modales o de impacto. Los nuevos métodos de cálculo se pueden tener en cuenta durante el proceso de optimización.

El desarrollo de este método tiene una amplia aplicación en la tecnología de fabricación aditiva debido a las enormes posibilidades de diseño (geometrías muy complejas).

En este trabajo de fin de grado se va a llevar a cabo mediante el uso de herramientas de OT y se va a llevar a cabo el desarrollo de optimizar un diseño de un soporte de una polea cable con criterios de diseño generativo, con el objetivo de mejorar su rendimiento y eficiencia. Una vez optimizado, se dará forma física al diseño mediante fabricación aditiva (FA) en Solid Edge.

Para llevar a cabo el diseño de un producto, se dan varios pasos explicados en la ilustración 2, donde podemos analizar en detalle el ciclo de diseño.

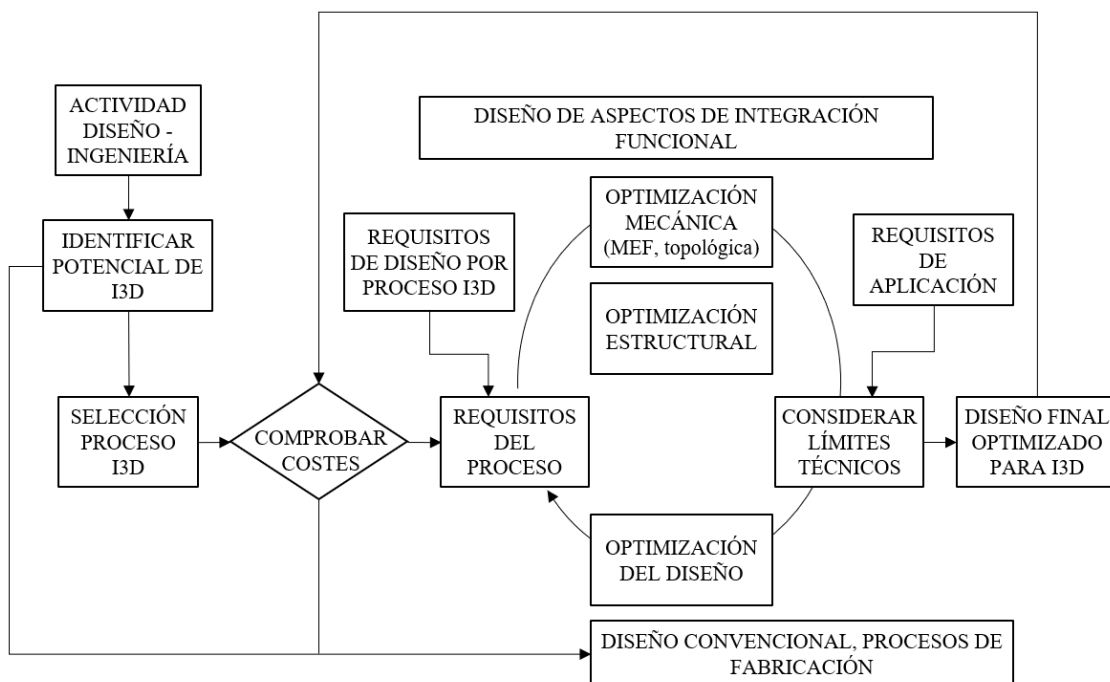


Ilustración 8 Diagrama de flujo del ciclo de diseño de un producto para I3D.

Fuente propia

Hoy en día, esta técnica es comúnmente conocida en una gran cantidad de campos, como la industria aeronáutica, automotriz, mecánica, arquitectura e ingeniería civil. Además, la expansión con la fabricación aditiva es muy grande debido a la capacidad de esta de crear diseños más complejos y personalizados con menos material, como por ejemplo la ilustración 3.



Ilustración 9 Chasis de una bicicleta optimizada topológicamente

Fuente: (Green rider,2016) [3]

Los pasos principales para optimizar topológicamente una pieza son los siguientes: [4]

1. Dibujar o importar la geometría
2. Simplificar la pieza
3. Definir uniones, juntas y contactos
4. Asignar materiales y cargas
5. Generar la optimización
6. Refinar la geometría
7. Verificar el rendimiento
8. Fabricar

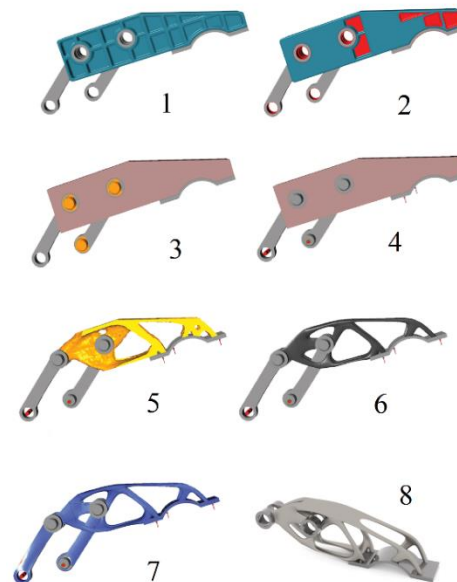


Ilustración 10 Pasos de la OT

Fuente: (Eita ingenieros) [5]

1.2 MOTIVACIÓN DEL PROYECTO

La motivación principal de este proyecto es optimizar la fabricación de piezas industriales de tal forma que mientras conseguimos las mismas funciones principales, obtenemos muchas ventajas, entre las cuales podemos destacar la reducción de peso, mejora de rendimiento y la reducción de costos.

En primer lugar, la OT puede ayudar a encontrar una **reducción de peso óptima**, de tal forma que la pieza siga cumpliendo con los requisitos de rendimiento. Esto da lugar a diseños más ligeros. Esto, en industrias como la aeroespacial, es vital, ya que se consigue reducir el peso de estructuras lo máximo posible mejorando enormemente la eficiencia y, por lo tanto, reducir el costo del combustible.

En segundo lugar, la OT, de la manera óptima, consigue repartir el material por la estructura de tal forma que se **mejore el rendimiento** lo máximo posible, lo que da lugar a una elevada rigidez, mejor resistencia a la fatiga y mayor capacidad de carga.

La optimización topológica puede ayudar a reducir los costos de materiales al reducir la cantidad de materiales necesarios para construir una estructura. La optimización topológica también puede aumentar la eficiencia y reducir los costos de producción al crear diseños más eficientes.

También podemos destacar la idea de que al realizar este proyecto, podemos ayudar a difundir la metodología de los criterios de diseño generativo (CDG) entre una amplia variedad de industrias. Con este fin, se proporcionará información valiosa sobre las ventajas de utilizar esta técnica para crear piezas optimizadas topológicamente.

1.3 OBJETIVOS DEL PROYECTO

Los objetivos que posee este Trabajo de Fin de Grado son varios y los podemos resumir en los cuatro más importantes, ya que son los que más importancia tienen en relación con la finalidad principal del proyecto.

Los objetivos principales que se pretende alcanzar son:

- Saber identificar y más tarde reducir las zonas de la pieza con material innecesario para su objetivo principal, para conseguir la disminución de los costos y tiempo de producción.
- Trabajar con el programa de Solid Edge y así familiarizarse con el aprendiendo una gran variedad de técnicas y herramientas que ofrece este mientras se hace la realización y estudio del proyecto.
- Conocimiento de la metodología de los CDG en profundidad entendiendo cómo funciona su proceso hasta llegar a la pieza optimizada final.
- Conocimiento de la FA y familiarización con la impresión 3D en profundidad a la hora de imprimir la pieza final a través del aprendizaje de todas las opciones de impresión y técnicas de esta.

1.4 OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE (ODS)

El 25 de septiembre de 2015, los líderes mundiales acordaron una nueva agenda de desarrollo sostenible que incluye objetivos globales para erradicar la pobreza, proteger el planeta y garantizar la prosperidad para todos.

Dentro de todos los objetivos que defiende este proyecto, podemos destacar tres que se alinean con el desarrollo de este proyecto de fin de grado:

➤ Objetivo 12: PRODUCCIÓN Y CONSUMO RESPONSABLES

“Garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles”

Este objetivo pretende promover una gestión sostenible y un uso eficiente de los recursos naturales, reducir considerablemente la generación de desechos, es decir, que se produzca igual o más mediante el uso de menos recursos y materia prima.

El uso de los criterios de diseño generativo potencia la optimización de una pieza de tal forma que el producto final tenga la misma eficiencia pero siendo más ligero, es decir, se haga uso de menos material, de tal forma que el uso de la materia prima empleada sea el mínimo y, por lo tanto, consiguiendo un uso responsable de producción.

➤ Objetivo 7: ENERGÍA ASEQUIBLE Y NO CONTAMINANTE

“Garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna”

Este objetivo se centra en garantizar el acceso universal a métodos de producción compatibles con el medio ambiente, potenciando el uso de una energía limpia y fuentes renovables.

Uno de los principales beneficios de la ligereza mencionado en el objetivo anterior está relacionado con la sostenibilidad: los productos más ligeros requieren menos materias primas. El diseño generativo permite a los usuarios explorar diferentes diseños para diferentes materiales, potenciando así el uso de materiales más asequibles y que no contaminen tanto.

➤ Objetivo 9: INDUSTRIA, INNOVACIÓN E INFRAESTRUCTURAS

“Construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización sostenible y fomentar la innovación”.

Este objetivo plantea la obtención de un modelo económico competitivo que prioriza la innovación con el objetivo de aumentar el empleo y el producto interno bruto, así como modernizar la infraestructura y promover una industria inclusiva y sostenible.

Mediante el uso de los criterios de diseño generativo y fabricación aditiva, se aumenta tanto la innovación como el desarrollo, ya que se proporcionan una serie de soluciones que mejoran la eficiencia de todo proceso.

1.5 METODOLOGÍA DEL PROYECTO

Para lograr el éxito del proyecto, es necesario completar una serie de tareas que ayudarán a lograr los objetivos dentro del plazo establecido. Las siguientes son las distintas etapas que realizar:

- Se llevará a cabo un **estudio en profundidad** sobre los principios de los CDG para elaborar tanto la introducción como el estado del arte. De esta manera, se tendrá un conocimiento detallado de las herramientas y técnicas utilizadas y se podrá establecer el procedimiento a seguir para aplicarlo en un soporte de una polea cable.
- Mientras se recopila la información en el apartado anterior se tomaran cursos de **preparación de Solid Edge** para adquirir los conocimientos necesarios y familiarización del programa. De esta manera, se podrá comprender mejor su uso para luego poder diseñar y optimizar la pieza mediante CDG.
- Con la información recogida y estudiada en los apartados de introducción y estado del arte, se procederá al **desarrollo de la optimización del soporte** a través de las herramientas proporcionadas por el programa de Solid Edge y elaborar así las mejores optimizaciones.
- Se procederá a **comparar** todas las versiones optimizadas del soporte para así, llegar a una decisión final sobre cual es mejor.
- Se procederá, a **fabricar el soporte** utilizando la técnica de FA. Este proceso permitirá dar forma física al soporte, permitiendo su presentación en el trabajo final.
- Se redactarán las **conclusiones** del proyecto en base a los resultados obtenidos, indicando todos los factores que demuestran que el soporte final es mucho más efectivo y eficiente para la polea cable.

2. ESTADO DE LA CUESTIÓN

Tal y como se ha introducido anteriormente, en este proyecto vamos a optimizar una pieza topológicamente a través de criterios generativos y fabricación aditiva y en este capítulo se va a profundizar sobre cada paso a seguir de este procedimiento. En la ilustración 5 podemos ver el proceso de CAD a una pieza impresa en 3D.

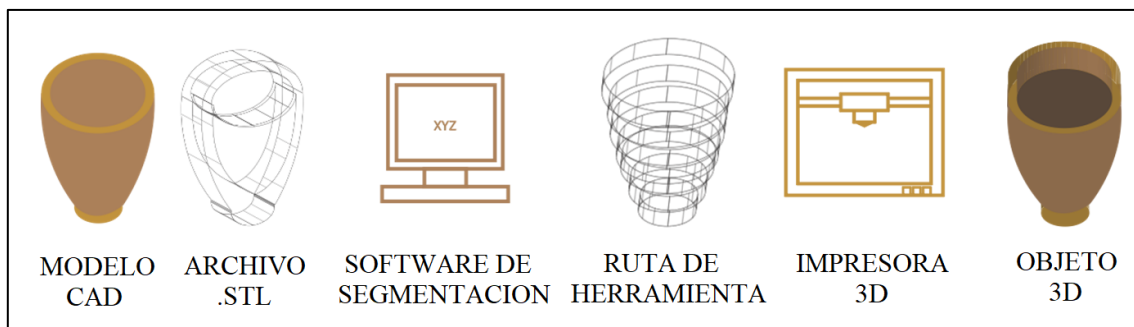


Ilustración 11 Diagrama de flujo para pasar de diseño CAD a pieza con I3D

Fuente propia

2.1 FUNDAMENTOS DE LA FABRICACIÓN ADITIVA

La FA es un nuevo concepto en la producción industrial mediante el cual se crean objetos a partir de materiales como plástico, metal o cerámica en donde este se deposita capa a capa. Gracias a esta técnica se permite la creación de objetos complejos que sería mucho más difícil a partir de la fabricación tradicional. Destaca mucho en áreas ingenieriles o médicas.

Varias ventajas principales de la FA son la reducción de los procesos intermedios, como las herramientas, lo que permite que se reduzca el tiempo empleado en la producción de piezas en comparación con las técnicas tradicionales de fabricación industrial, y, por otro lado, que utiliza solo el material necesario para la pieza a producir, sin generar desperdicios ni residuos.

Sin embargo, la FA a pesar de tener muchas ventajas también tiene muchas limitaciones, siendo muchas de estas citadas, analizadas por Manuel Zahera en su libro de “*La fabricación aditiva, tecnología avanzada para el diseño y desarrollo de productos*” y listadas en la Tabla 1. [5]

Como primeras dos ventajas principales a destacar son la **complejidad geométrica** y la **libertad creativa**, ya que, la esbeltez, vaciados interiores, variación de espesores o las formas irregulares son cosas que con otro tipo de fabricaciones más tradicionales no se pueden llegar a reproducir con exactitud y bajos costes.

También se puede destacar la **personalización**, ya que este tipo de fabricación es que permite la personalización de piezas y componentes sin limitaciones. A diferencia de la fabricación tradicional, que suele requerir la producción de grandes cantidades para que sea rentable.



Ilustración 12 Detalle de la complejidad de una pieza del tamaño de una moneda.

Fuente:(Manuel Zahera,2012) [5]

La FA, ha potenciado **accesos a nuevos nichos de mercado**, ya que ha permitido el descubrimiento de soluciones y aplicaciones novedosas de productos como la aparición de tejidos metálicos, producción de texturas nuevas o incluso prótesis personalizadas.

Gracias a la capacidad de combinar diversas formas y materiales en un único objeto, la FA permite los **mecanismos integrados**, es decir, permite la fabricación simultanea de objetos como los rodamientos (ilustración 7), muelles con sus soportes u otros mecanismos complejos que funcionan como conjuntos de piezas. Esto elimina la necesidad de montajes y ajustes posteriores.



Ilustración 13 Engranaje y rodamiento impresos a través de fabricación aditiva.

Fuente: (The 3D Mates, 2016) [6]

Derivando de la primera ventaja analizada, la complejidad geométrica aporta una aplicación muy importante al hablar de las ventajas de la FA, los **productos aligerados**. A través de por ejemplo, vaciados de estructuras y modificando las densidades de los materiales, se obtiene una significativa reducción de peso de los objetos a fabricar.

Al usar FA en vez de usar prototipos, se produce directamente el producto final, lo que hace que se adapte al mercado más fácilmente ya que este está en constante cambio y, por lo tanto, se reduce el llamado "**time to market**".

En cuanto a las limitaciones de esta tecnología, podemos destacar principalmente el hecho de que, al ser nueva, todavía se encuentra en proceso de desarrollo y requiere de procesos extras como la manipulación de los materiales y controles de calidad.

Aunque también cabe destacar la idea de que las materias primas que se necesitan para poder realizar estos procesos son muy limitadas, ya que la gama de materiales disponibles es significativamente inferior a la proporcionada por procesos de fabricación más tradicionales.

Dado que el volumen de impresión actualmente es muy pequeño en comparación con los procesos de fabricación convencionales, **el tamaño de las piezas** también es una limitación de FA.

La **velocidad de fabricación** puede afectar **la calidad del acabado superficial** de las piezas, lo que es otra limitación importante. En general, un aumento en la velocidad de impresión puede resultar en un acabado más áspero o impreciso en las superficies de las piezas.

Y, por último, es vital incluir el **costo de la maquinaria**. Los equipos de I3D pueden ser bastante costosos y pueden requerir mantenimiento y reparación frecuentes, lo que aumenta aún más los costos, a diferencia de los procesos de fabricación convencionales, que pueden requerir herramientas y maquinaria especializadas.

VENTAJAS	LIMITACIONES
Complejidad geométrica	Tecnología en desarrollo
Personalización	Procesos auxiliares
Libertad creativa	Disponibilidad de la materia prima
Acceso a nuevos nichos de mercado	Tamaño limitado de piezas
Mecanismos integrados	Acabado superficial
Reducción de peso, productos aligerados	Velocidad de fabricación
Reducción del “time to market”	Coste de la maquinaria

Tabla 1 Ventajas y Limitaciones actuales de la fabricación aditiva.

Fuente: (Manuel Zahera,2012) [5]

2.2 FUNDAMENTOS DEL DISEÑO GENERATIVO

El diseño generativo (DG) consiste en crear modelos que se adapten a su objetivo sin salir de las restricciones y limitaciones de diseño marcadas. Estos parámetros o variables, como volúmenes, fuerzas, límites espaciales o incluso temperaturas, se pueden manipular mediante algoritmos y obtener resultados de diseños originales y versátiles. De esta forma, se consigue llegar al modelo óptimo entre las posibles versiones del producto final.

A través del DG, somos capaces de encontrar los mejores modelos que los propuestos en primer lugar, cumpliendo con los requisitos establecidos principalmente y lograr los resultados óptimos. De esta forma conseguimos reducir imprevistos y costes a la vez que optimizamos los tiempos de desarrollo y producción. [7], [8]

Realizar una optimización a través de CDG nos aporta ventajas como una mayor sostenibilidad al ahorrar energía y materiales. La optimización topológica de una pieza, es decir, reducir el uso de material manteniendo suficiente rigidez, fuerza y resistencia, es uno de los objetivos más comunes, especialmente cuando el peso es un factor clave que afecta directamente al costo.

Podemos analizar las diferencias principales de dos tipos de proceso de diseño, el proceso clásico de diseño y el proceso de diseño generativo, analizados ambos en la *Onformative* en la Campus Party de Berlín en 2012 [9].

En el proceso clásico de diseño, mostrado en la ilustración 8, el diseñador parte de su propia idea y la desarrolla, analizando cómo llegar a una solución óptima desde su punto de vista. Luego, el diseñador mismo evalúa la solución y decide si cumple con sus expectativas iniciales. Si no es así, el diseñador realiza cambios para crear una nueva solución y repite el proceso hasta llegar a la solución óptima según su criterio.

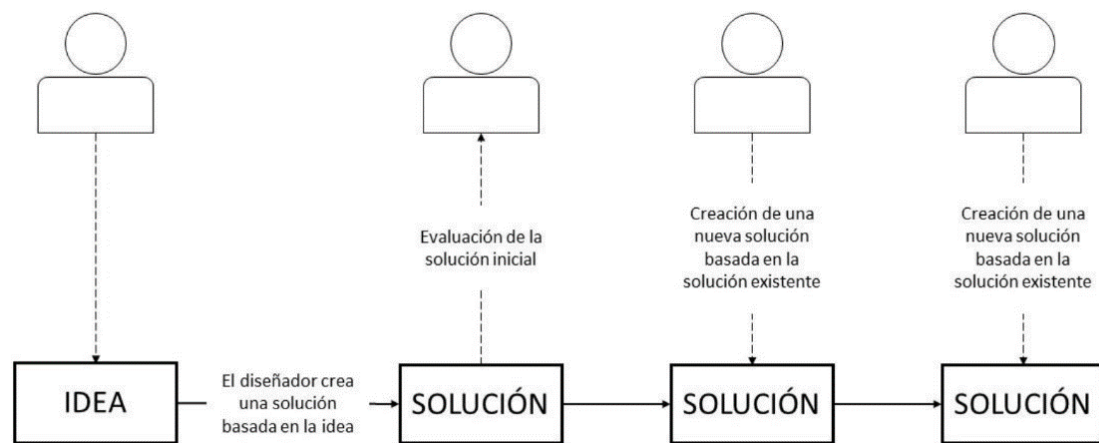


Ilustración 14 Proceso clásico de diseño.
 Fuente: (Campus Party, Berlín, 2012) [9]

Sin embargo, por otro lado, en el proceso de DG, mostrado en la ilustración 9, el diseñador, después de tener la idea, la traduce a reglas y algoritmos. A partir de estas reglas, se crea un código que dará forma a la idea, permitiendo obtener la solución final.

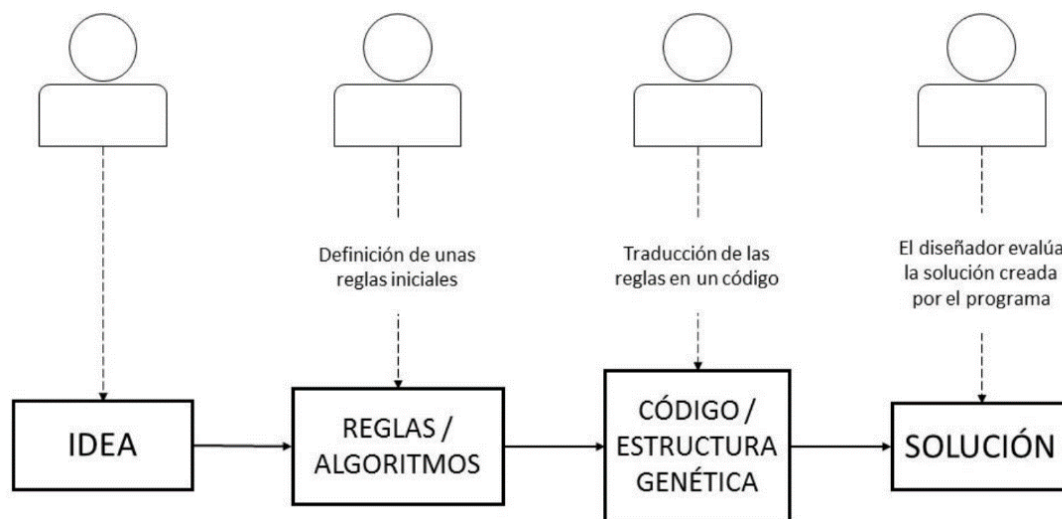


Ilustración 15 Proceso de diseño generativo.
 Fuente: (Campus Party, Berlín, 2012) [9]

La parte fundamental que distingue este proceso del anterior es que se obtiene una solución adaptable que evita que el diseñador tenga que retroceder al comienzo, es decir, a la idea original. Por lo tanto, para generar nuevas soluciones, basta con modificar las reglas o algoritmos, o ajustar diferentes parámetros del código.

En conclusión, como resultado del proceso lineal, cualquier modificación implica una reconstrucción de la representación. En cambio, la representación paramétrica incluye una descripción detallada del proceso de diseño, lo que elimina la necesidad de reconstruir la representación con cada modificación. Gracias a esta característica, la representación paramétrica permite crear diversos diseños adaptativos para diferentes situaciones.

2.3 BREVE HISTORIA SOBRE EL ARTE GENERATIVO

El DG es un término que se ha empezado a tratar en nuestra sociedad desde hace unos 30 años debido al desarrollo de la tecnología en estas últimas décadas con el auge de lenguajes de programación dedicados al diseño, arte, multimedia, impresión 3D, robótica y más. Pero, antes de esto, hay que destacar que el concepto de lo generativo es relativamente moderno, pero cabe señalar que algunos de los principios fundamentales del paradigma generativo son bastante antiguos, pudiendo ver como se ha reflejado claramente en gran variedad de expresiones artísticas.

Durante el Renacimiento, por medio de técnicas de pinturas decorativas renacentistas, conocidas como “brocha gorda” y mediante el uso de la experimentación de propiedades químicas, se simulaban, mediante modo generativo, para simular texturas como el mármol o la madera. Leonardo da Vinci, es un gran ejemplo de esto, utilizándolo en su obra “Tratado de la pintura” sobre como las manchas de humedad en muro podían simular paisajes naturales de manera generativa.

También cabe destacar brevemente cómo, en la era del inicio la Revolución Industrial, el arquitecto catalán Antoni Gaudí utilizó métodos generativos inspirados en los árboles para crear el diseño de las columnas del templo de la Sagrada Familia.

En relación con el DG que experimentamos hoy en día, podemos hacer grandes referencias al arte pasado ya que la base es la misma. El DG actualmente sigue las mismas reglas de experimentación que en el pasado, pero ahora se utiliza como una herramienta tecnológica para optimizar piezas con diferentes funciones y producir miles de resultados que cumplen con requisitos específicos. Es una forma de diseño que aprovecha la tecnología para crear soluciones más eficientes y personalizadas para problemas específicos.

Por ejemplo, podemos hablar del uso de este DG en la actualidad, destacando en el ambiente de la música a *Johann Philipp Kirnberger*, mostrado en la ilustración 10, que lo utilizó al desarrollar el sistema *Musikalisches Würfelspiel*. Este sistema consiste en utilizar dos dados para generar música aleatoria. Cada dado selecciona al azar breves pasajes de música que se colocan uno después del otro, creando así una pieza musical única. [10]

1. Walzerteil							
Takt 1	Takt 2	Takt 3	Takt 4	Takt 5	Takt 6	Takt 7	Takt 8
96	22	141	41	105	122	11	30
32	6	128	63	146	46	134	81
69	95	158	13	153	55	110	24
40	17	113	85	161	2	159	100
148	74	163	45	80	97	36	107
104	157	27	167	154	68	118	91
152	60	171	53	99	133	21	127
119	84	114	50	140	86	169	94
98	142	42	156	75	129	62	123
3	87	165	61	135	47	147	33
54	130	10	103	28	37	106	5
Kombination:							
4	9	12	3	12	3	11	7

2. Walzerteil							
Takt 1	Takt 2	Takt 3	Takt 4	Takt 5	Takt 6	Takt 7	Takt 8
70	121	26	9	112	49	109	14
117	39	126	56	174	18	116	83
66	139	15	132	73	58	145	79
90	176	7	34	67	160	52	170
25	143	64	125	76	136	1	93
138	71	150	29	101	162	23	151
16	155	57	175	43	168	89	172
120	88	48	166	51	115	72	111
65	77	19	82	137	38	149	8
102	4	31	164	144	59	173	78
35	20	108	92	12	124	44	131
Kombination:							
3	9	3	8	4	4	3	5

Ilustración 16 Juego de dados musical de Johann Philipp Kirnberger.

Fuente: (Raquel Velázquez Pérez y Pedro Molina-Siles, 2015) [10]

Como otro ejemplo podemos destacar en el ambiente de la moda, en donde en la Prèmiere Vision Paris de 2013, los diseñadores italianos de *Lashup*, *Claudio Granato* y *Enrico Pieraccioni*, en colaboración con *TexTeam* y *Jagarage*, desarrollaron un proyecto que codificaba la naturaleza mediante algoritmos paramétricos, creándolo a través de I3D, mostrando un ejemplo a continuación en la ilustración 11.



Ilustración 17 Prendas para la Prèmiere Vision Paris 2013.

Fuente: (Raquel Velázquez Pérez y Pedro Molina–Siles, 2015) [10]

El DG implica crear el proceso de diseño en sí mismo, ya que el resultado final es el producto autónomo, interactivo y paramétrico del proceso. Este es un enfoque de diseño "abierto" que se basa en un proceso generativo natural o en su simulación artificial, analógica o digital. [11]

2.1 FUNDAMENTOS DE LA OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA

El fundamento principal de la OT se basa en la idea de que al tener una estructura determinada, con un volumen inicial, se especifiquen una serie de restricciones y se ajuste la distribución de material a partir de una serie de iteraciones hasta que se alcanza el diseño óptimo deseado por el diseñador.

Una gran ventaja de usar la OT es que proporciona una idea inicial de cómo se podría diseñar la estructura final, lo que permite realizar iteraciones adicionales para llegar al diseño ideal deseado dentro de las limitaciones impuestas por el diseñador. Además, es muy útil para el cálculo de estructuras u objetos an analizar porque nos ayuda an encontrar los mejores caminos por los cuales las tensiones se transmiten dentro de la estructura, lo que permite mejorar la resistencia y el rendimiento general de la estructura.

Debido a sus similitudes, el DG y el OT con frecuencia se confunden. La OT se centra en optimizar la forma de un objeto para cumplir unos criterios específicos, mientras que el DG implica crear diseños complejos mediante la especificación de ciertos parámetros. La ilustración 12 muestra las diferencias en el proceso de cada uno de ellos.

En resumen, la OT es un proceso que consiste en reducir material de un objeto existente, manteniendo la función para la que ha sido diseñado, centrándose en mejorar un diseño preexistente o rediseñar un componente ya concebido.

Por otro lado, el diseño generativo crea nuevas posibilidades de diseño, teniendo en cuenta el propio proceso de fabricación. [12]

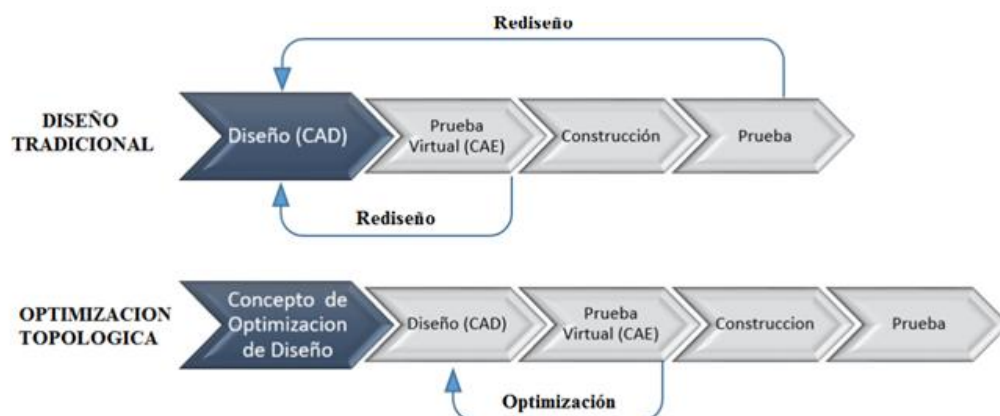


Ilustración 18 Ciclos de diseño: tradicional y de OT

Fuente: (Altair University, 2015, pág 16)

A continuación se muestra un diagrama de la metodología que se sigue para la OT:

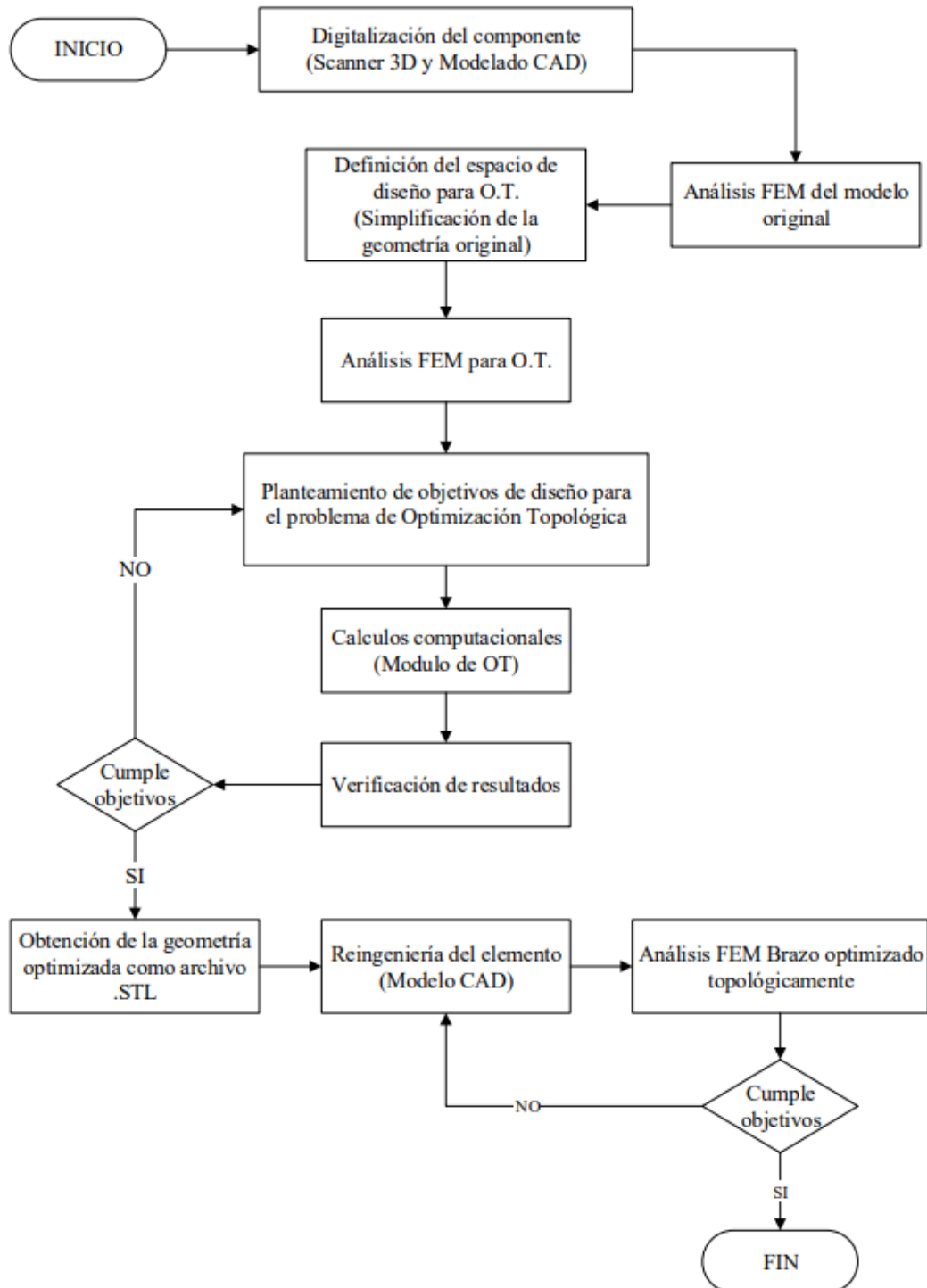


Ilustración 19 Ciclo de metodología de la OT.

Fuente: (Nelson J. Villarroel Herrera) [13]

2.2 EJEMPLOS USO DE OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA

Las empresas que hacen uso de esta técnica son mayoritariamente empresas de la aeronáutica y de la automotriz, haciendo que las piezas que componen a los aviones y coches cumplan sus funciones y el propio coche y avión tengan la menor masa posible, ya que, para ambas, a menor peso, menor gasto de combustible.

Entre las principales empresas aeronáuticas que hacen uso de esto cabe destacar el rediseño de las alas de un Boeing 777 (ilustración 14), que hace uso de esta técnica para optimizar en conjunto de “costillas” que forman la parte estructural de estas alas.

Para este caso simulado, los ingenieros de la empresa querían llegar a un resultado basándose en la anatomía de las alas de las aves, resultando en unas mucho más ligeras que las que se usan hoy en día, llegando a producirse un ahorro de hasta 200 toneladas de combustible por avión al año. [14]

Para llevarlo a cabo, se utilizó un superordenador para hacer cálculos y diseñar una solución durante un periodo de 5 días. El proceso implicó ajustar y mejorar el diseño a través de iteraciones, ajustando los resultados para irlo mejorando en aquellos puntos que quedaban más débiles; lo cual se asemeja al proceso de selección natural.

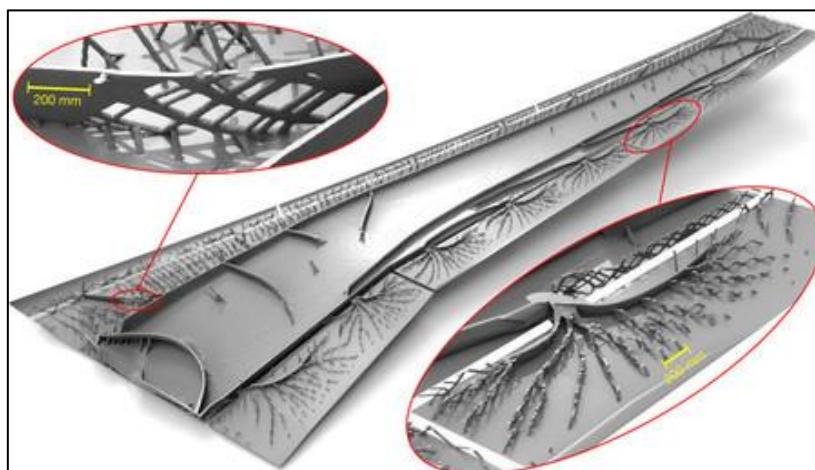


Ilustración 20 Nueva ala prototipo con la cubierta superior quitada.

Fuente: (Rocío Pérez,2017) [14]

En la ilustración anterior podemos ver el interior de la nueva ala optimizada donde se observa como los soportes internos imitan la anatomía de las aves.

Esta optimización, hace que gracias a la nueva estructura diseñada sin comprometer su rigidez, se logre reducir el peso entre un 2 y un 5%, lo que equivale a una disminución de entre 200 y 500 kilogramos con respecto a la estructura original. Esto, a su vez, permite ahorrar entre 40 y 200 toneladas de combustible por avión al año. [14]

Este caso particular de las alas de un Boeing 777 se trata, por el momento, solo de un prototipo simulado, ya que se necesitaría una impresora 3D gigante para su fabricación debido a la necesidad de precisión.

Respecto a la industria automotriz cabe destacar dos casos principales: la nueva invención de KLIO y de los pistones del motor de porche 911 GT2 RS.

KLIO es una empresa de automóviles surcoreana que revoluciona la industria 3D con su nuevo prototipo de coche de una sola plaza, que ha sido diseñado con OT y fabricado con tecnología de FA, ilustración 15. Esta técnica avanzada se ha utilizado para aprovechar mejor los materiales, considerando sus propiedades, y ha sido empleada tanto en la estructura como en los asientos del coche. [15]

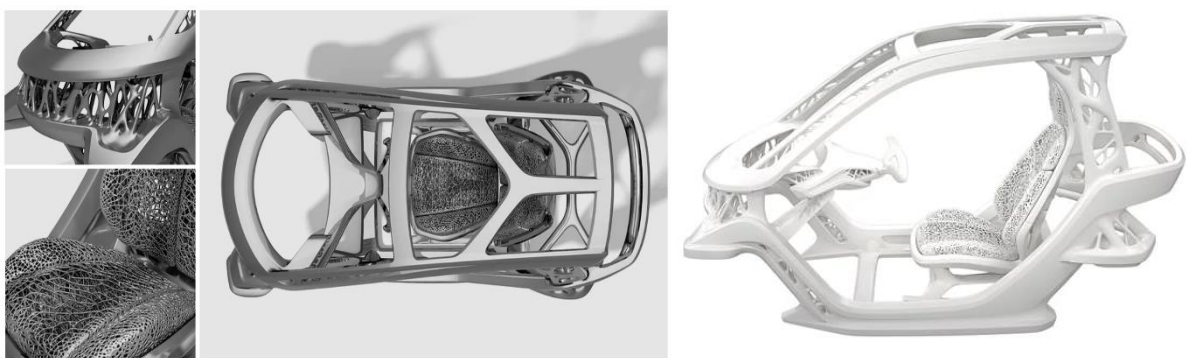


Ilustración 21 Estructura del coche tras haber sido optimizado topológicamente.

Fuente: (Empresa Klio Design, 2016) [16]

Para ello se construyó primero la estructura básica y más tarde, mediante un programa de Altair (Inspire) desarrollaron la OT del chasis para minimizar la masa para que soportase de igual forma la carga.

Para el desarrollo de este proyecto se usó la OT para encontrar las variables de diseño (densidad de elementos finitos) que cumplieran con la función objetivo (masa mínima) y la restricción (factor de seguridad) dentro del dominio de diseño. A partir de esto, se diseñó la forma de la estructura optimizada (masa minimizada) que se adapta a las fuerzas externas que actúan durante la situación de conducción.

A partir de aquí, se presentaron pautas de diseño en donde consideraban varias situaciones de conducción como velocidades, aceleraciones, frenado y volcaduras. Luego, se realizaron optimizaciones topológicas para cada una de estas situaciones y se unificaron los resultados para obtener una solución común. De esta manera, se logró una optimización eficiente de la estructura del prototipo, teniendo en cuenta las diversas fuerzas externas que actúan sobre él durante la conducción. [16]

En la misma línea temática nos encontramos con los pistones del motor de Porsche 911 GT2 RS, mostrados en la ilustración 16, los cuales se han fabricado a través de técnicas de FA de tal forma que la estructura de estos ha podido ser optimizada topológicamente respecto a su resistencia, pudiendo llegar a una reducción de peso en un 10% con respecto a los pistones anteriores forjados. [17]



Ilustración 22 Pistones del motor 911 GT2 RS impresos por fabricación aditiva.

Fuente: (Empresa Porsche) [17]

Frank Ickinger, del departamento de desarrollo de motores de Porsche explica esta idea diciendo: “Gracias a esto hemos conseguido aumentar el régimen del motor, reducir la carga de temperatura de los pistones y optimizar la combustión, obteniendo un resultado con una mayor potencia y una eficiencia elevada”.

El 911 GT2 RS ya tiene pistones forjados instalados de fábrica, los cuales ya han sido optimizados al máximo para futuros motores de alta potencia. Por lo tanto, cualquier mejora adicional solo se podría lograr a través de cambios que ya no pueden ser implementados con los métodos de producción convencionales. Por esto, la FA es una opción que ofrece la posibilidad de cambios para mejorar estos pistones, aplicando el llamado diseño biónico, donde se coloca material donde se someten fuerzas.

Aplicando la OT, los ingenieros utilizan una metodología de fabricación diseñada de forma específica para las condiciones concretas de la I3D. Y, por lo tanto, de esta forma se consiguió reducir en un 10% el peso de estos pistones, garantizando calidad y rendimiento, incluso, según Frank Ickinger, las simulaciones mostraban una posible reducción de hasta un 20% por pistón.[17]



Ilustración 23 Detalle del antes y después de la OT de los pistones

Fuente: (Empresa Porsche) [17]

2.6 TEORÍA MATEMÁTICA OPTIMIZACIÓN TOPOLOGICA

Como se ha introducido antes, la OT consiste en un programa matemático en el cual analizando la estructura, volumen de diseño, sujeciones y fuerzas que se ejercen sobre un objeto concreto, se minimice la masa de esta y tenga un máximo beneficio económico. Esto se obtiene a partir de métodos matemáticos a partir de variables, parámetros, condiciones de contorno y modelos, siendo el programa de software principal para resolución matemática, el Análisis o Método de los Elementos Finitos (FEM por sus siglas en inglés).

Esta técnica ha resultado ser una herramienta muy útil ya que se usa para muchos problemas de ingeniería y de investigación, extendiéndose ampliamente en esta comunidad ingenieril, tanto para casos de estudio, como para investigaciones o incluso para empresas de producción.

2.6.1 MÉTODO DE ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS

La idea detrás del FEM consiste en dividir un medio continuo en un conjunto de elementos más pequeños que están conectados por nodos. De esta manera, se simplifica el análisis de un medio continuo al dividirlo en pequeños elementos conectados por nodos, ya que las mismas ecuaciones que describen el comportamiento de un medio continuo también se pueden aplicar para describir el comportamiento de un elemento individual. Esto permite pasar de un sistema continuo, que tiene un número infinito de posibles movimientos o grados de libertad y que se rige por una o varias ecuaciones diferenciales, a un sistema con un número finito de grados de libertad. [18]

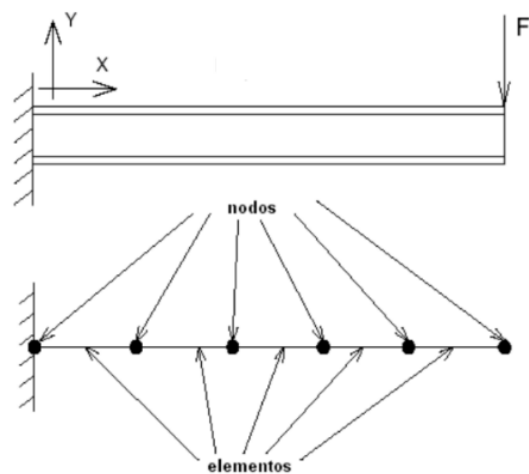
De esta manera, podemos analizar y estudiar cómo se comporta cada componente individualmente y luego combinar esta información para comprender el comportamiento global del sistema complejo.

Como inicio de este proceso, la estructura a analizar ha de dividirse en pequeñas partes denominadas “elementos”, conectados estos conectados entre sí a partir de los “nodos”. A estos nodos se les asignarán las variables de estudio y por lo tanto, se aproximará el comportamiento de la estructura como un sumatorio de cada uno de estos elementos.

Para ello, se formula un Esquema o Modelo de Cálculo de la estructura a analizar para poder pasar de un modelo continuo a uno discreto, ilustración 18.

Ilustración 24 Estructura real y esquema de cálculo

Fuente: (L. L. Ortero Pereiro, 2006) [18]



Al hablar de una estructura discreta, hablamos de una cantidad finita de variables, de un vector finito de deformaciones, hablamos de una estructura con un número limitado de posibles desplazamientos, y, por otro lado, al hablar de una estructura continua, hablamos de una estructura que tiene infinitos desplazamientos independientes posibles, por lo tanto, no podemos definir a la estructura por medio de un vector finito, sino que a partir de una función vectorial. Se puede ver la clara diferencia entre estas dos en la siguiente Ilustración 19.

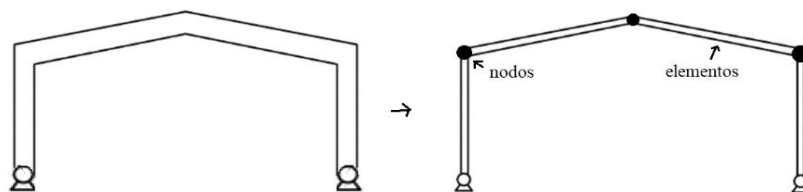


Ilustración 25 Detalle de una estructura continua y una discreta.

Fuente: (Elaboración propia)

Los elementos son variables de salida que se usan para el análisis de los desplazamientos de los nodos adyacentes como del resto de los nodos de la estructura (ver ilustración 20). Estas variables de salida se definen en la dirección de los grados de libertad de cada nodo. Los grados de libertad son las variables que determinan el estado de cada nodo.

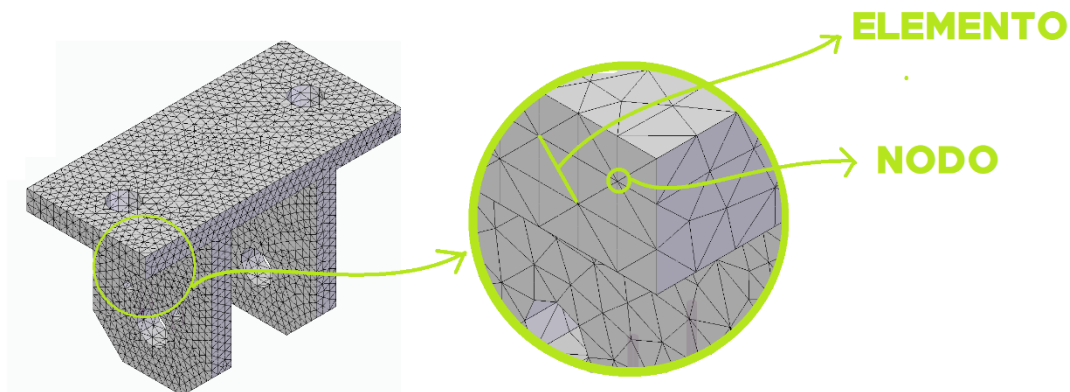


Ilustración 26 Nodos y elementos definidos en una pieza en SolidEdge

Fuente propia

De esta forma, con las variables definidas, al conocerse la variación de desplazamiento de cada nodo, se conoce la solución final a partir de la función vectorial. Una vez en este estado final, ya que se tienen los valores de los grados de libertad se pueden determinar muchas otras variables de salida como otras fuerzas o tensiones. [18]

Pero, no obstante, no puede asegurarse que la función vectorial tenga una expresión analítica manejable. Para resolver esto, se utiliza la hipótesis de discretización analizada por Celigüeta Lizarza en 2011 en su libro *Método de los elementos finitos para el análisis estructural*. [19]

Siendo esta misma definida por los siguientes puntos:

- El espacio continuo es dividido a partir de líneas en una serie de regiones geométricas contiguas, llamadas elementos finitos, que se unen entre si a partir de un número de puntos llamados nudos. Este proceso de generación se le denomina mallado.
- Las incógnitas independientes del problema son los desplazamientos de los nudos y determinan unívocamente la configuración deformada de la estructura.
- El desplazamiento de un punto se determina unívocamente por los desplazamientos de los nodos del elemento al que pertenece, a partir de funciones de interpolación.
- Mediante ecuaciones constitutivas del material y los desplazamientos de los nodos se define el estado de tensiones de cada elemento, y por lo tanto el de la estructura completa.
- En cada nodo hay un sistema de fuerzas que equilibran las tensiones y las fuerzas exteriores que actúan sobre el elemento.

Celigüeta Lizarza también recalca la importancia de dos aspectos principales de la hipótesis, siendo estos:

- En una estructura dividida en múltiples elementos, se pueden utilizar funciones de interpolación distintas para cada elemento, siempre y cuando se respeten las condiciones de compatibilidad en las fronteras entre los elementos.
- La función solución es aproximada en cada elemento, apoyándose en un número pequeño de parámetros.

2.7 IMPLEMENTACIÓN MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

En el libro “*Introducción al método del elemento finito: SolidEdge y Matlab.*”, los autores Oscar González Woge, Carlos Omar González Morán y Asdrúbal López Chau describen el proceso de implementación de este método en el software de SolidEdge, el cual consta de tres pasos principales (ilustración 21) : Procesamiento previo, solución informática y postproceso. [20]

1. **Procesamiento previo:** Se prepara el modelo, definen restricciones, propiedades y el mallado de la pieza.
2. **Solución Informática:** El solucionador del programa de SolidEdge aplica el FEM para su resolución
3. **Postproceso:** Análisis de resultados

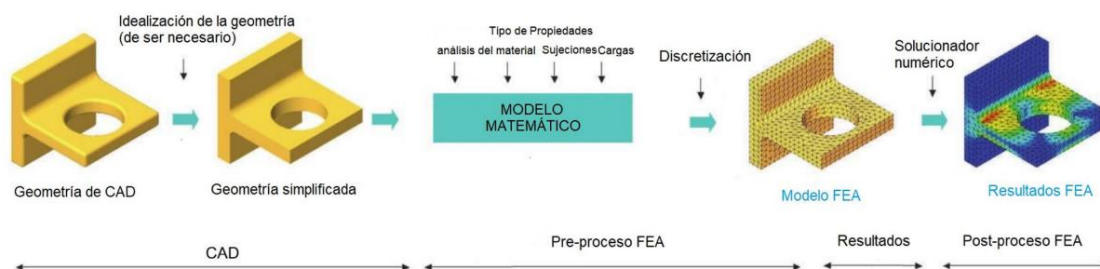


Ilustración 27 Procedimiento del FEM.

Fuente: (Oscar González Woge, 2020) [20]

2.7.1 PROCESAMIENTO PREVIO

Esta primera etapa consiste en la preparación previa donde se establece el tipo de análisis que se va a llevar a cabo y se establecen los parámetros de este. A partir de esto, se genera el mallado o discretización de la estructura u objeto a analizar (ver ilustración 22).

El análisis que se llevará a cabo es un análisis estructural, un procedimiento que evalúa cómo responde una estructura o pieza a cargas externas y determina su capacidad para soportar esas cargas sin falla. Las condiciones de contorno, las cargas que actúan sobre la pieza y las propiedades del material son los parámetros que se tendrán en cuenta para este análisis.

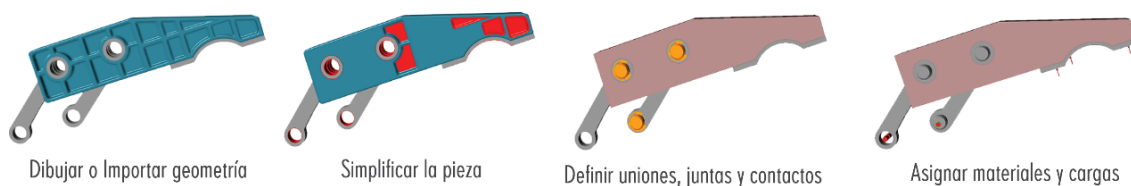


Ilustración 28 Procesamiento previo de la OT.

Fuente: (Eita ingenieros) [21]

2.7.1.1 SIMPLIFICACIÓN Y LIMPIEZA DE LA PIEZA

En el contexto del mallado, los criterios de calidad son las medidas utilizadas para determinar la validez de una malla que se ha generado a partir de una pieza para obtener el óptimo análisis estructural de la pieza que va a realizar después.

En el libro, los autores recalcan la importancia de asegurarse de que la geometría de la pieza que la malla ha producido nos proporcione una solución precisa de los datos, como los desplazamientos o las tensiones internas, por lo tanto, para comenzar este proceso hay que hacer uso de una simplificación y una limpieza de la geometría inicial de nuestra pieza.

Es por esto por lo que las modificaciones que se realicen a la geometría de la pieza van a permitir una mejor conexión entre las diferentes partes de la estructura en el análisis y un tiempo más corto en la computación de los resultados.

Para poder llevar a cabo la **simplificación** de la pieza hay que comenzar por un proceso de eliminación de detalles geométricos que no son relevantes para el análisis, es decir, detalles pequeños que no tenga un impacto significativo en el comportamiento global de la pieza, detalles decorativos como logos o patrones o redondeos.

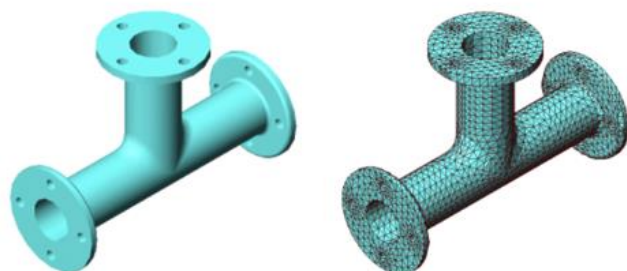
Por otro lado, en muchos casos es necesario hacer también una **limpieza** de la pieza a analizar para que pueda cumplir con los criterios de calidad mencionados anteriormente. Para aplicarla, es necesario emplear herramientas que identifiquen problemas como caras astilladas, bordes irregulares, superposición de superficies, sólidos que se solapan entre sí o discontinuidades en las superficies de la pieza, problemas que dificultarían el análisis y el proceso del mallado.

2.7.1.2 DISCRETIZACIÓN DE LA PIEZA

A continuación, se procede al proceso de discretización o mallado, es decir, una representación geométrica de la pieza. Para ello, se divide a la pieza en formas geométricas llamadas elementos finitos, mostrado en la ilustración 23. Con ese objetivo, es necesario generar una malla que sea óptima de tal forma que los resultados obtenidos sean lo más precisos posible, para ello, hay que analizar la cantidad de elementos y la geometría de estos elementos.

*Ilustración 29 Modelo CAD
y de mallado de una pieza
con elementos tetraédricos.*

Fuente: (intelligy.com) [22]



2.7.1.2.1. TAMAÑO DE MALLADO

Al analizar la cantidad de elementos que forman la malla hay que hacerlo de tal forma que esta esté suficientemente detallada y esté formada por la menor cantidad de elementos. Esto se debe a que un mallado con mucho detalle formado por muchos elementos, aumenta el tiempo de análisis y afecta a la eficiencia de su proceso. Por lo tanto es importante encontrar el balance óptimo entre la cantidad de elementos que forman la malla y la precisión del análisis.

Henryk Kaminsk y Pawel Fritzkowski, autores del libro *“Non-linear dynamics of a hanging rope”*, analizan la idea de cómo afecta la cantidad de elementos finitos (RFEM)¹ en los que se ha dividido la estructura a analizar respecto al tiempo de computado (ilustración 24). Este análisis lo llevan a cabo por medio del uso de un Multiple Physical Pendulum (MPP), traducido como péndulo físico múltiple, que es un sistema que consta de varios péndulos conectados en serie con longitudes y masas diferentes. [23]

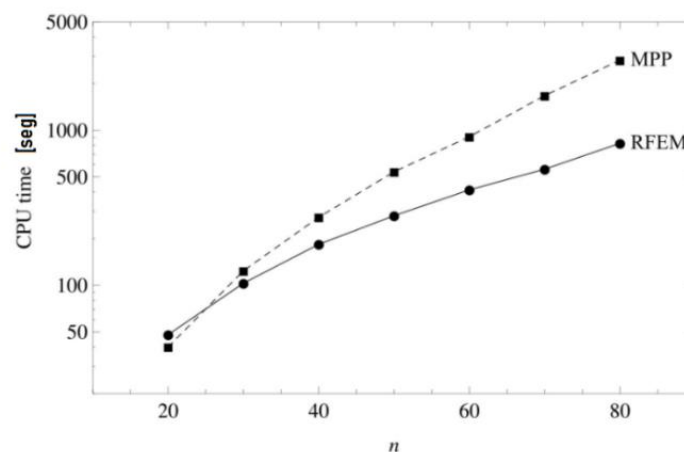


Ilustración 30 Número de EF respecto al tiempo de computación.

Fuente: (Henryk Kaminsk y Pawel Fritzkowski, 2013) [23]

¹ RFES: Rigid Finite Elements

2.7.1.2.2. GEOMETRÍA DE MALLADO

Por otro lado, es muy importante decidir la mejor geometría para el mallado de nuestra pieza, ya que algunos mallados pueden suponer más tiempo de computación del análisis que otros, lo que afectaría a la eficiencia del proceso.

La tesis doctoral de Alejandro Díaz Morcillo, titulada *"Métodos de mallado y algoritmos adaptativos en dos y tres dimensiones para la resolución de problemas electromagnéticos cerrados mediante el método de los elementos finitos"*, divide los tipos de malla en dos categorías principales: mallas estructuradas y no estructuradas.

La malla no estructurada tiene una distribución de nodos más irregular y aleatoria, mientras que la malla estructurada tiene formas regulares y simétricas.

Ambos tipos de malla se pueden generar a través de diferentes tipos de métodos de generación: [24]

- Métodos de generación de **malla estructurada**:
 - Algebraicos.
 - Basados en EDPs.
 - Superposición de retícula y ajuste de contorno.
 - Crecimiento estructurado.
- Métodos de generación de **malla no estructurada**:
 - Inserción de nodos y posterior conexión: Delaunay.
 - Generación simultánea de nodos y conectividad: Frente de avance.

MALLADOS ESTRUCTURADOS

Las mallas estructuradas son discretizaciones caracterizadas por conexiones que siguen patrones reticulares, es decir, patrones en donde se hace uso de elementos triangulares y cuadriláteros (2 dimensiones) o tetraédricos y hexaédricos (3 dimensiones).

- Métodos Algebraicos

Este método es el más rápido y sencillo, y se usan dos técnicas principales: transformación en geometrías canónicas o “mapping” e interpolación transfinita. En el *mapping* se pasa del dominio previo a un dominio canónico (como un rectángulo) y a partir de ahí, se genera la retícula y se transportan los nodos a donde se encontraban anteriormente en el dominio original.

En la *interpolación transfinita*, se desarrollan funciones de interpolación entre los bordes del dominio original de tal forma que la posición del resto de nodos interiores se determina a partir de los nodos del contorno.

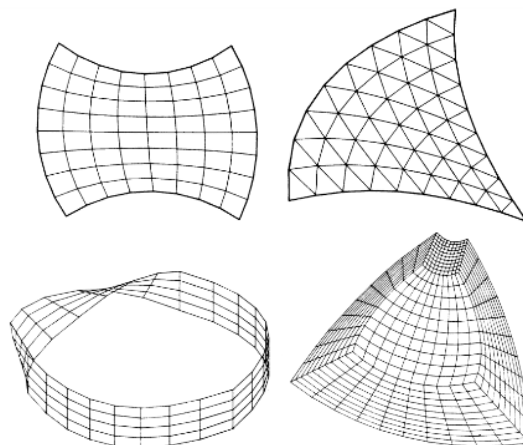


Ilustración 31 Mallas generadas a partir de métodos algebraicos.

Fuente: (Alejandro Díaz Morcillo, 2000) [24]

- **Métodos basados en EDPs**

En este método se hace uso de Ecuaciones de Derivadas Parciales (EDPs) para poder discretizar la figura y conseguir un mayor control de la densidad de la malla. Para su aplicación, se usan como condición de contorno la geometría del borde del dominio a mallar.

La elección de la ecuación diferencial influye directamente en la calidad de la malla generada. La ecuación de Laplace se utiliza para obtener una malla uniforme, mientras que la ecuación de Poisson se utiliza para obtener una malla con una densidad variable. En situaciones en las que el dominio del problema está formado por dos curvas o superficies cerradas y una de ellas se extiende hacia el infinito, los sistemas hiperbólicos son más económicos que los sistemas elípticos.

Una de las desventajas de este método es que implica un alto coste computacional. En la ilustración 32 siguiente se muestran algunas mallas obtenidas con varios tipos de EDPs.

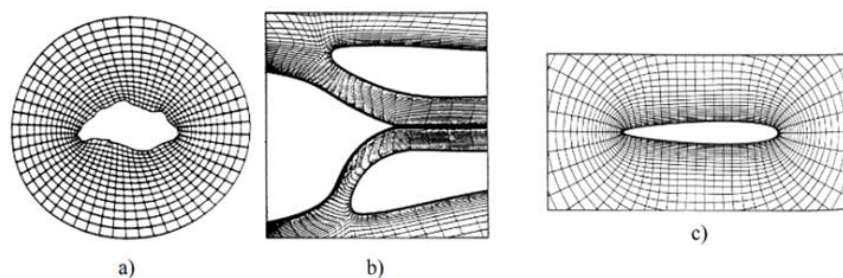
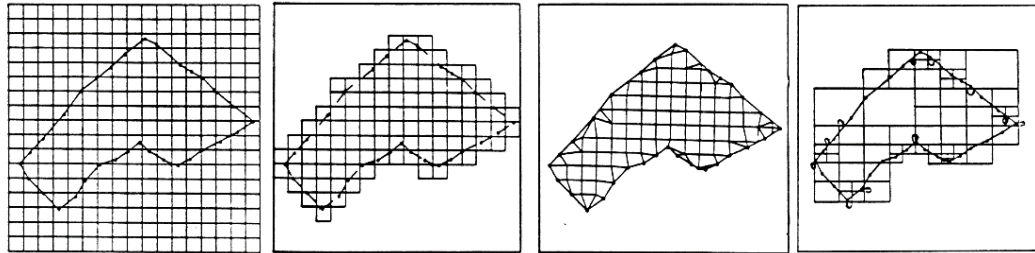


Ilustración 32 EDPs: (a) Laplace, (b) Poisson, (c) hiperbólico.

Fuente: (Alejandro Díaz Morcillo, 2000) [24]

- **Método de Superposición de Retícula y Ajuste de Contorno**

En este método se genera una retícula cuadrada o cubica que cubre todo el dominio a discretizar, se quitan las secciones que no se encuentran en el dominio y se ajustan las que cubren el contorno parcialmente, modificándolas de tal forma que el dominio quede totalmente dividido en secciones discretas.

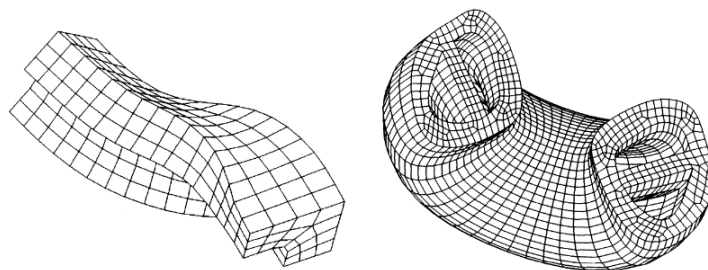


*Ilustración 33 Pasos del método de superposición de retícula y ajuste de contorno.
Fuente: (Alejandro Díaz Morcillo, 2000) [24]*

- **Métodos de Crecimiento estructurado**

También conocido como “extrusión”, este método se caracteriza por la traslación de la geometría de mallado de la base (que puede ser también un mallado no estructurado), es decir, se repite la discretización de la base a lo largo del resto del volumen del dominio (ver ilustración 28) y establece dos restricciones:

- La malla lateral ha de ser estructurada
- La conectividad de las dos superficies básicas ha de ser la misma para ambas.



*Ilustración 34 Detalle de cómo se arrastra la malla de la base por el
resto de la figura a partir del crecimiento estructurado.*

Fuente: (Alejandro Díaz Morcillo, 2000) [24]

MALLADOS NO ESTRUCTURADOS

Las mallas no estructuradas son diferentes de las mallas estructuradas porque no tienen un patrón de conectividad predefinido, en su lugar, esta conectividad se determina a partir de la función del contorno y la ubicación de los nodos interiores.

El hecho de que la conectividad no este definida permite que cualquier dominio pueda discretizarse a partir de una situación de contorno aleatorio, lo que hace que sea un mallado más aplicable a una gran variedad de situaciones, pero conlleva un mayor coste computacional.

- Método de Delaunay-Voronoi

Este método es una técnica de discretización triangular que se utiliza para los dominios que parten de una distribución determinada de nodos y se ocupa de obtener una conectividad adecuada, buscando una conexión en donde los elementos presenten una buena relación de aspecto, es decir, se busca una triangulación óptima.

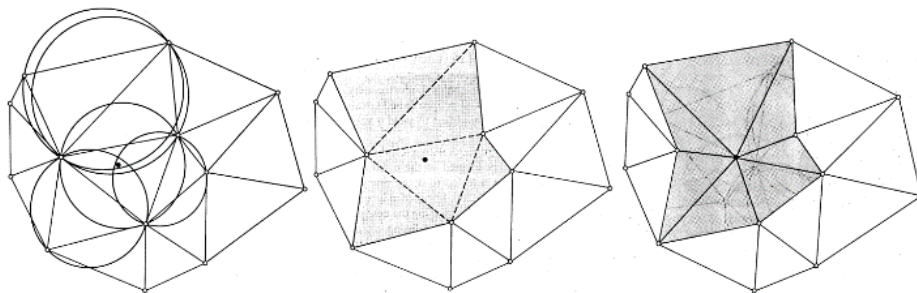


Ilustración 35 Triangulación de Delaunay
Fuente: (Alejandro Díaz Morcillo, 2000) [24]

- Método de proceso de avance

Este método se caracteriza por la generación de nodos, aristas, caras y elementos conforme la malla va creciendo y teniendo en cuenta unos criterios de regularidad que indican las posiciones optimas de los próximos nodos y aristas, mostrado en la ilustración 30. Se aplica por medio de un proceso iterativo que empieza por el contorno de la figura y continua modificándose mientras se avanza hasta la zona interior.

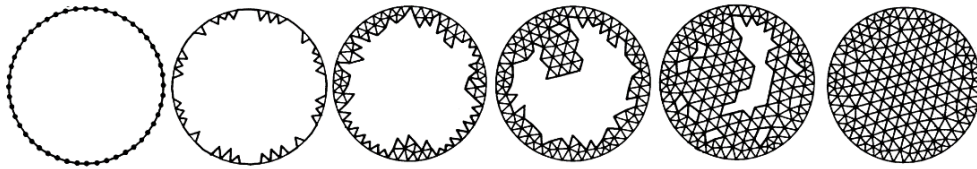


Ilustración 36 Evolución de la malla por el método de frente de avance.

Fuente: (Alejandro Díaz Morcillo, 2000) [24]

2.7.2 SOLUCIÓN INFORMÁTICA SOLIDEDGE

Después de crear el modelo matemático, de dividir la pieza a analizar en elementos finitos por medio del mallado, de discretizar también las cargas y sujeciones y de aplicarlas a los nodos de la malla, se pasa al siguiente paso, a poner en uso el solucionador numérico de SolidEdge, para que así podamos obtener los datos solución.

2.7.3 POSTPROCESO

Esta etapa final se basa en el análisis de los resultados obtenidos por el programa de SolidEdge en el paso anterior a partir de herramientas que facilita el propio programa como diagramas de esfuerzos.

3. PROPUESTA DE ESTUDIO

La propuesta de estudio de este trabajo es optimizar topológicamente una polea cable con CDG y más tarde imprimirla con FA. Para ello se va a ejecutar el procedimiento de la Ilustración mostrada a continuación compuesto por las siguientes fases:

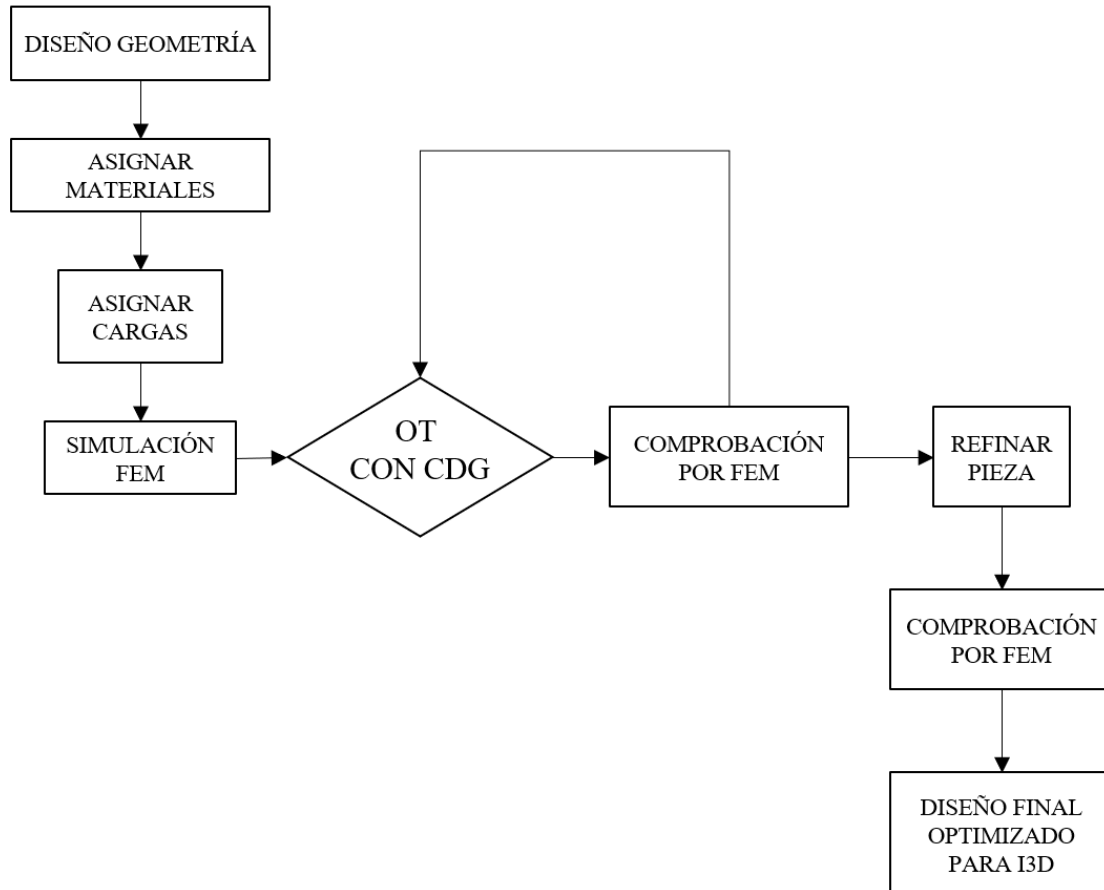


Ilustración 37 Diagrama de flujo del proceso del proyecto

Fuente propia

Por lo tanto, en la siguiente propuesta de estudio se comenzará por un diseño de la pieza, seguido de un cálculo de las fuerzas y una elección de los materiales.

3.1 PROPUESTA DE GEOMETRÍA

Para poder llevar a cabo la propuesta de diseño haremos uso de los planos de conjunto de una polea cable mostrados en el libro de “*Dibujo industrial: conjuntos y despieces*” de 2004. Estos planos de conjunto proporcionan información detallada sobre el diseño y la funcionalidad de esta pieza, incluyendo dimensiones precisas, detalles de montaje, materiales sugeridos y especificaciones de carga.

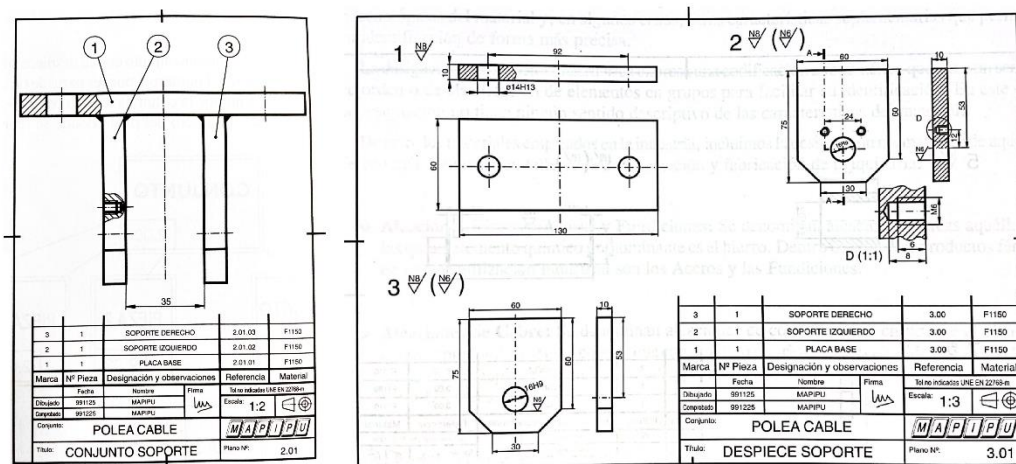
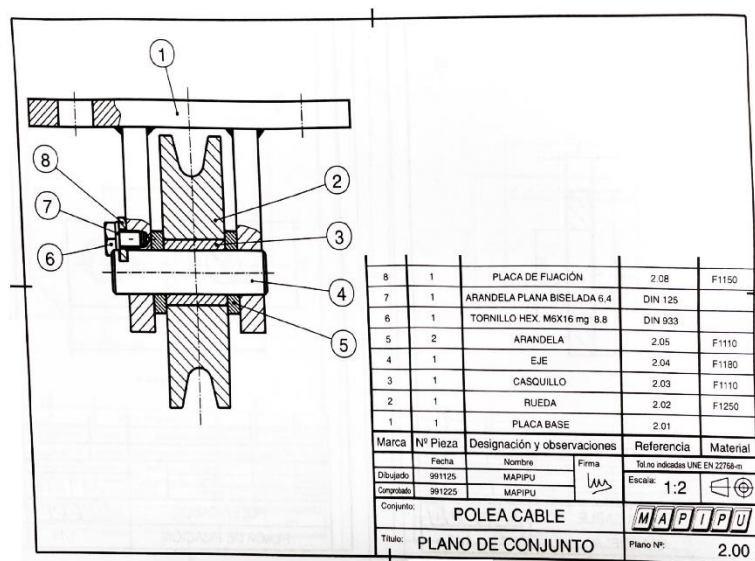


Ilustración 38 Planos de conjunto de una polea cable.

Fuente: (Dibujo industrial: conjuntos y despieces, 2004) [25]

3.2 PROPUESTA DE MATERIALES

Por un lado, **los materiales** que utilizar serán los adjudicados también por los planos de conjunto del libro de “*Dibujo industrial: conjuntos y despieces*” de 2004.

3	1	SOPORTE DERECHO	3.00	F1150
2	1	SOPORTE IZQUIERDO	3.00	F1150
1	1	PLACA BASE	3.00	F1150
Marca	Nº Pieza	Designación y observaciones	Referencia	Material

Ilustración 39 Detalle de la lista de elementos del conjunto

Fuente: (Dibujo industrial: conjuntos y despieces, 2004) [25]

El acero F1150 es una aleación de acero de alta resistencia que se utiliza con frecuencia en aplicaciones de ingeniería y mecánica. Estos son algunos beneficios de usar este acero como soporte de polea:

Resistencia a la tracción: La alta resistencia a la tracción del acero F1150 le permite soportar cargas pesadas sin deformarse o romperse.

Resistencia a la corrosión: El acero F1150 es resistente a la corrosión y la oxidación, por lo que es adecuado para uso en ambientes húmedos o corrosivos.

Durabilidad: El acero F1150 es extremadamente resistente al desgaste y la fatiga provocados por el uso diario.

Facilidad de mecanizado: El acero F1150 se puede cortar y dar forma con herramientas comunes de la industria.

Disponibilidad: El acero F1150 se usa ampliamente en el sector y es fácilmente accesible en la mayoría de los proveedores de materiales.

Costo razonable: En comparación con otras aleaciones de acero de alta resistencia, el acero F1150 es relativamente económico a pesar de sus características y beneficios.

Versatilidad: El acero F1150 se puede usar en una amplia gama de piezas mecánicas, como soportes de polea, ejes, engranajes y otros componentes.

Por lo tanto, según observamos en la imagen anterior, sabemos que el soporte de la polea cable tiene adjudicado un acero F1150 o DIN CK55. Para analizar todas las propiedades de este material, haremos uso de su tabla de características normalizada, donde la encontramos en “matweb.com”.

JIS S55C Steel, Normalized

Categories:	Metal ; Ferrous Metal ; Carbon Steel ; AISI 1000 Series Steel ; Medium Carbon Steel
Material Notes:	Very common grade in Asia.
Key Words:	Similar to AISI 1050 and 1055 and DIN CK55.
Vendors:	No vendors are listed for this material. Please click here if you are a supplier and would like information on how to add your listing to this material.

Physical Properties	Metric	English	Comments
Density	7.85 g/cc	0.284 lb/in ³	AISI 1055
Mechanical Properties	Metric	English	Comments
Hardness, Brinell	183 - 255	183 - 255	
Hardness, Rockwell C	9.0 - 24.5	9.0 - 24.5	
Tensile Strength, Ultimate	647 MPa	93900 psi	
Tensile Strength, Yield	392 MPa	56900 psi	
Elongation at Break	15 %	15 %	
Modulus of Elasticity	205 GPa	29700 ksi	Typical steel
Poissons Ratio	0.29	0.29	Typical steel
Machinability	55 %	55 %	Based on AISI 1212 steel as 100% machinability
Shear Modulus	80.0 GPa	11600 ksi	Typical steel
Electrical Properties	Metric	English	Comments
Electrical Resistivity	0.0000163 ohm-cm @Temperature 0.000 °C	0.0000163 ohm-cm @Temperature 32.0 °F	condition of specimen unknown
Thermal Properties	Metric	English	Comments
CTE, linear 	11.0 µm/m-°C @Temperature 20.0 - 100 °C	6.11 µin/in-°F @Temperature 68.0 - 212 °F	
	12.4 µm/m-°C @Temperature 0.000 - 300 °C	6.89 µin/in-°F @Temperature 32.0 - 572 °F	
	13.9 µm/m-°C @Temperature 0.000 - 500 °C	7.72 µin/in-°F @Temperature 32.0 - 932 °F	
Specific Heat Capacity	0.486 J/g-°C @Temperature 50.0 - 100 °C	0.116 BTU/lb-°F @Temperature 122 - 212 °F	(AISI 1045) annealed
Thermal Conductivity	49.8 W/m-K	346 BTU-in/hr-ft ² -°F	Typical steel
Component Elements Properties	Metric	English	Comments
Carbon, C	0.52 - 0.58 %	0.52 - 0.58 %	
Chromium, Cr	<= 0.20 %	<= 0.20 %	
Copper, Cu	<= 0.30 %	<= 0.30 %	
Iron, Fe	97.5 - 98.7 %	97.5 - 98.7 %	
Manganese, Mn	0.60 - 0.90 %	0.60 - 0.90 %	
Nickel, Ni	<= 0.20 %	<= 0.20 %	
Phosphorus, P	<= 0.030 %	<= 0.030 %	
Silicon, Si	0.15 - 0.35 %	0.15 - 0.35 %	
Sulfur, S	<= 0.035 %	<= 0.035 %	

Tabla 2 Propiedades del acero F1150 (CK55)

Fuente: matweb.com

3.3 CÁLCULO DE CARGAS

Y, por otro lado, **las cargas** a asignar a nuestra pieza serán el peso de la rueda de la polea y el del eje sobre los dos agujeros principales de los soportes. También habría que añadir como carga la cantidad de peso puede llegar a soportar nuestro soporte de polea y tras hacer un estudio sobre otras poleas del mercado ponemos como valor máximo un valor de 1000 kg.

Para comenzar con los cálculos de los pesos de rueda + eje son necesarios los planos de conjunto de estos, siendo los mostrados en la ilustración posterior.

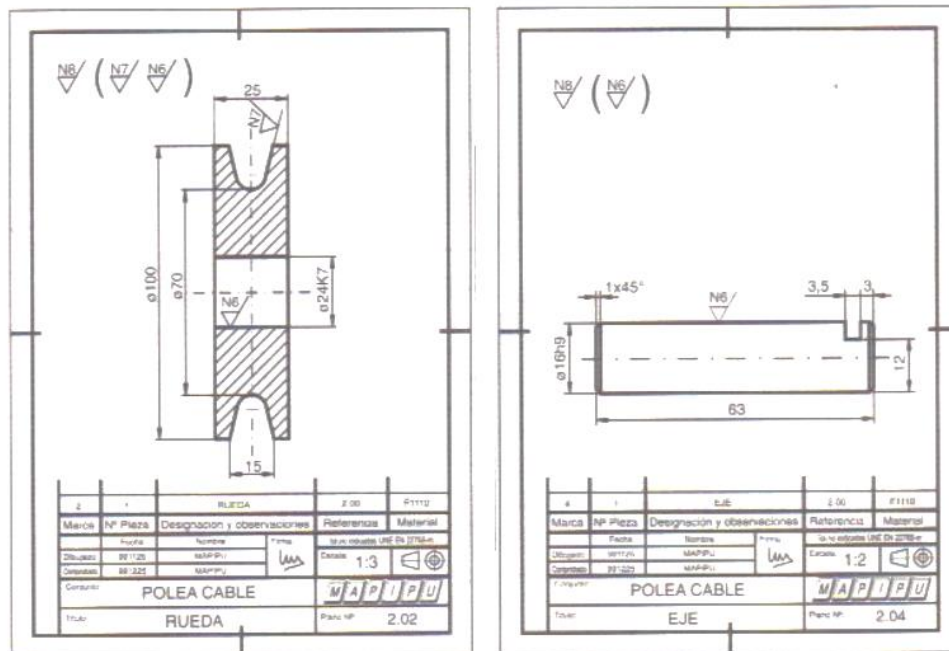


Ilustración 40 Planos de conjunto de la rueda y eje de la polea cable

Fuente: (Dibujo industrial: conjuntos y despieces, 2004) [25]

Una vez se tienen sus planos de conjunto se procede a calcular sus volúmenes:

$$\text{Volumen rueda} = V_R = \pi * (R - r)^2 * h = \pi * (20 - 3.2)^2 * 5 = 4433.4155 \text{ cm}^3$$

$$\text{Volumen eje} = V_E = \pi * (r)^2 * h = \pi * (3.2)^2 * 12.6 = 402.1238 \text{ cm}^3$$

$$\text{Volumen total} = V_T = V_R + V_E = 4835.539412 \text{ cm}^3$$

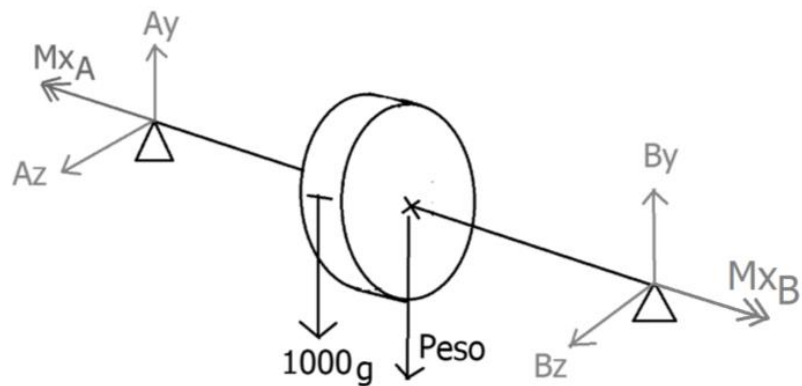
A continuación, fijándonos en la tabla de las propiedades del material F1150 o CK55, podemos ver que tiene una densidad de 7.85 g/cm^3 , por lo que se puede calcular la masa total que tendrá que soportar el soporte de la polea.

$$Masa\ total = M_T = D * V_T = 7.85 * 4835.5394 = 37958.98439 \text{ g} = 37.9589 \text{ kg}$$

Por lo tanto, para contarlo como una fuerza se hace uso de la gravedad (9.81 m/s^2) y se divide entre dos para que se aplique equitativamente en cada agujero de cada soporte.

$$Peso\ total = P_T = M_T * g = 37.9589 * 9.81 = 372.3768 \text{ N}$$

Y, por otro lado, el eje gira junto a la rueda y genera un efecto de cojinete, aplicado en la mitad de abajo del agujero de los soportes laterales. Como ejercicio esquematizado tendríamos el siguiente:



$$\sum F_x = 0 ; \sum F_z = 0 \rightarrow \text{Al no haber nada que demuestre lo contrario, las ejudicamos 0}$$

$$\sum F_y = 0 \rightarrow A_y + B_y - 1000kg = 0$$

$$\sum M_z = 0 \rightarrow -(1000 * 9.81 + Peso)kg * 0.063m + B_y * 0.063 * 2 = 0$$

$$\sum M_x = 0 \rightarrow M_x - 1000kg * 9.81 * \frac{0.07}{2} m = 0$$

Las fuerzas en los apoyos de los soportes laterales resultantes serían las siguientes:

$$M_x = 343.35 \text{ Nm}$$

$$A_y = B_y = 5091.18 \text{ N}$$

3.4 PROPUESTA DE ITERACIÓN DE OT

Tras la determinación de todos los factores a incluir para los casos de carga, se procederá más tarde con el proceso iterativo de optimización.

Este proceso se caracteriza por la serie de iteraciones en las cuales se optimizará el proceso con CDG y se comprobará que la pieza no supere su tensión máxima, es decir, no se rompa.

Este proceso iterativo tendrá fin cuando se consiga reducir el máximo porcentaje de masa sin que la pieza rompa y cumpla todos sus objetivos iniciales.

4. METODOLOGÍA E IMPLANTACIÓN

En este apartado se analizará paso a paso el diagrama de flujo propuesto en la propuesta de estudio del proyecto.

4.1 DISEÑAR GEOMETRÍA

Como bien se indicó previamente en la propuesta de estudio, vamos a hacer uso de los planos de conjunto del libro de “*Dibujo industrial: conjuntos y despieces*” de 2004.

Una vez se han comprendido al completo estos planos de conjunto, pasamos a diseñar la pieza a partir de estos y así poder llevar a cabo el resto de los pasos. Los planos de conjunto muestran una polea muy pequeña en comparación con el objetivo a realizar, por lo que realizaremos en este caso una 2 veces más grande.

Para comenzar el diseño del soporte de la polea cable, hemos de crear cada pieza por separado, para más tarde unificarlas en un solo conjunto. Para ello, comenzamos por el diseño de los soportes izquierdo y derecho, siendo estos soportes unos apoyos laterales que sujetarán al eje y la rueda y que asegurarán la estabilidad del conjunto.

En primer lugar diseñamos el soporte derecho, el cual no tiene agujeros normalizados, sino que solo se caracteriza por el agujero que sostendrá al eje.

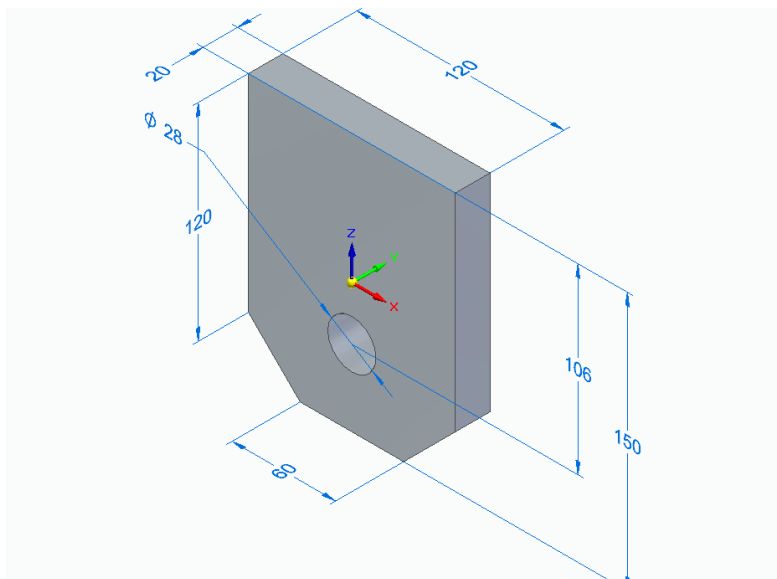


Ilustración 41 Soporte lateral derecho de la polea cable.

Fuente propia

En segundo lugar, diseñamos el soporte lateral izquierdo, el cual si que tiene dos agujeros normalizados M12 separados a 48 mm de distancia entre ellos.

En la siguiente ilustración se muestra el diseño de los agujeros roscados a partir de la información presentada en los planos de conjunto.

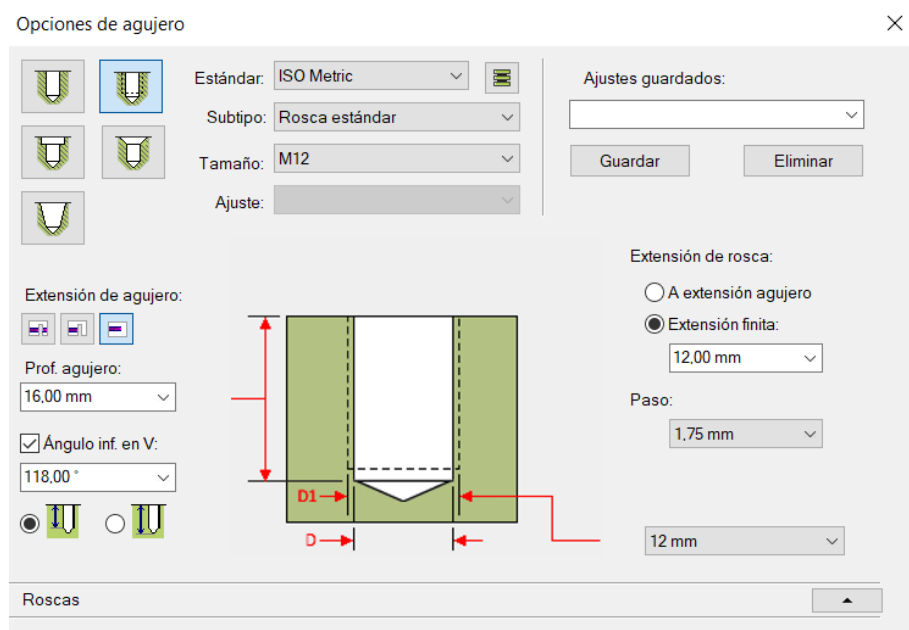


Ilustración 42 Diseño del agujero roscado

Fuente propia

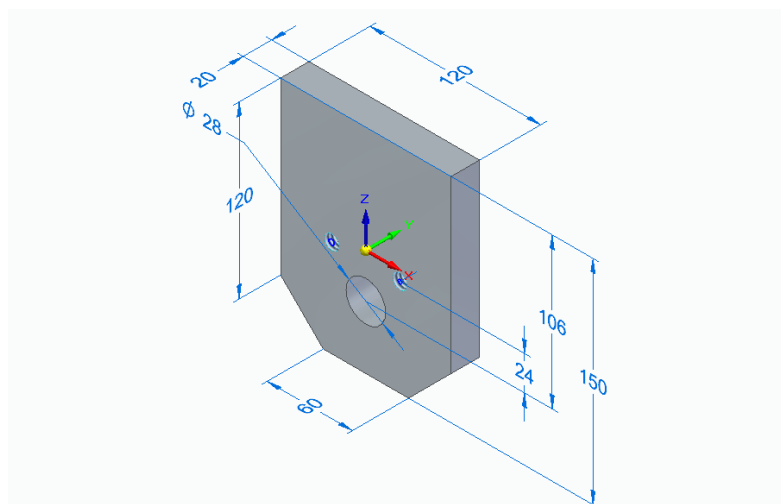


Ilustración 43 Soporte lateral izquierdo de la polea cable

Fuente propia

Una vez se han diseñado los soportes laterales, paramos al diseño del techo o soporte superior del conjunto que sostendría a todo este. El tamaño de este techo o soporte tiene que ser lo suficientemente grande como para que la rueda de la polea pueda girar libremente y también que su cable deslice sin problema.

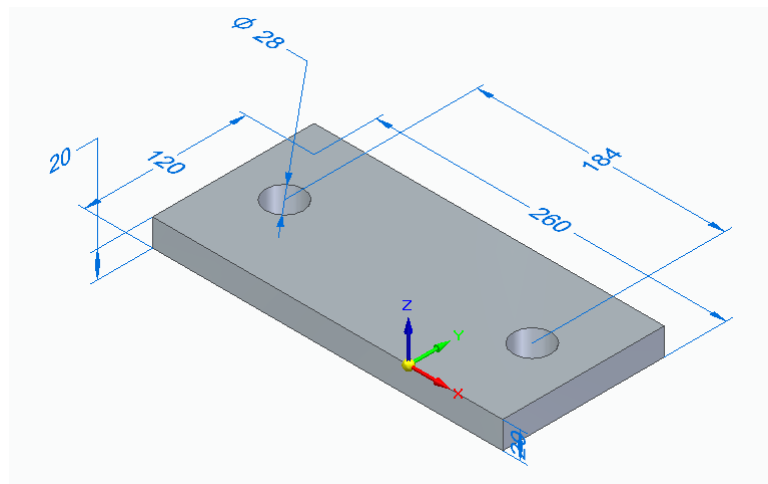


Ilustración 44 Soporte superior o techo de la polea cable.

Fuente propia

Cuando se hayan diseñado todas las partes del conjunto de la polea, se deben unir para que formen el conjunto completo y se debe hacer de tal forma que se apliquen restricciones y uniones determinadas entre ellas para que queden limitados algunos movimientos y la figura quede totalmente restringida.

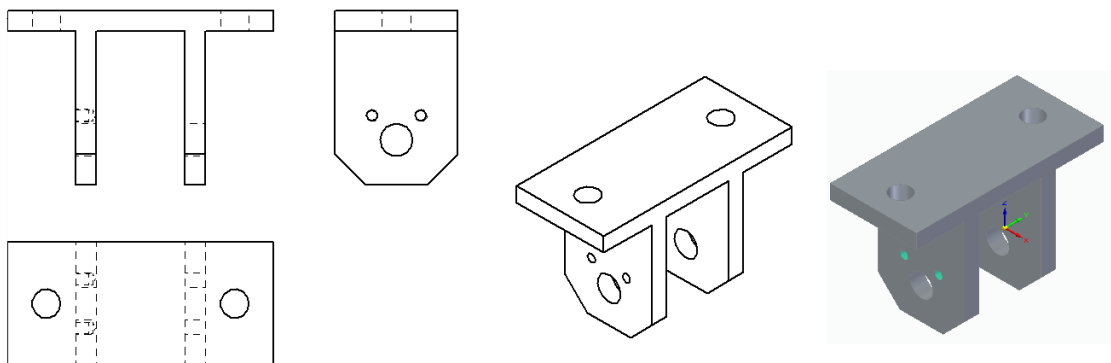


Ilustración 45 Conjunto de la polea cable.

Fuente propia

Por último, crearemos los cordones de soldadura de la pieza, en donde quedaran unidos los soportes laterales con el soporte del techo mediante dos cordones por soporte. El dato de la densidad del cordón lo obtenemos de la tabla del material del Acero F1150, analizado en el apartado 3.2.

Las características del cordón serán las mostradas a continuación en la figura inferior.

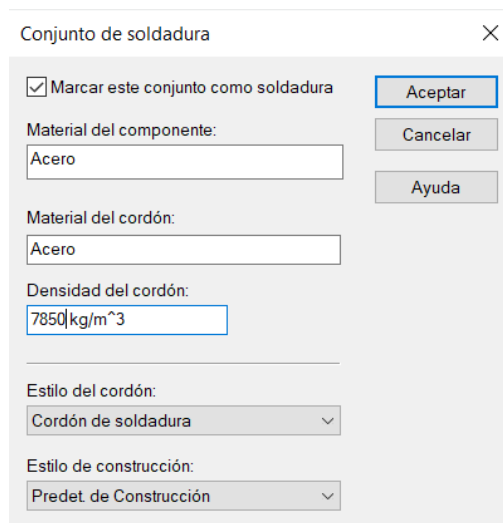


Ilustración 46 Detalle de las características de los cordones de soldadura.

Fuente propia

Y, a continuación, añadimos los cordones a la pieza mediante una soldadura angular.

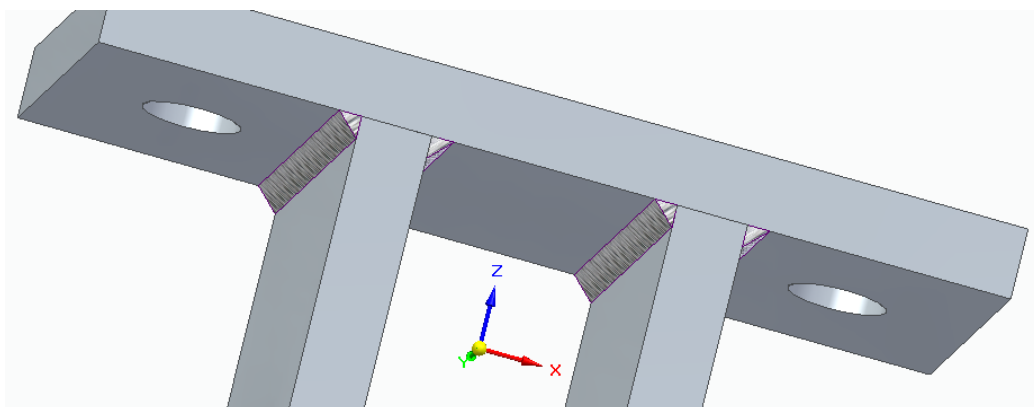


Ilustración 47 Adición de los cordones de soldadura.

Fuente propia

4.2 ASIGNAR MATERIALES

En el apartado de la propuesta de estudio se determina el material a utilizar en el proyecto, siendo este el acero F1150 o CK55. Sin embargo, este acero no queda incluido en la tabla de materiales a elegir en el programa de Solid Edge.

Como consecuencia, habrá que crear un nuevo material llamado “AceroF1150” y se le pondrán las características y propiedades procedentes de la tabla 2 analizada anteriormente en el apartado de la propuesta de estudio, tabla que incluye toda la información necesaria sobre este acero.

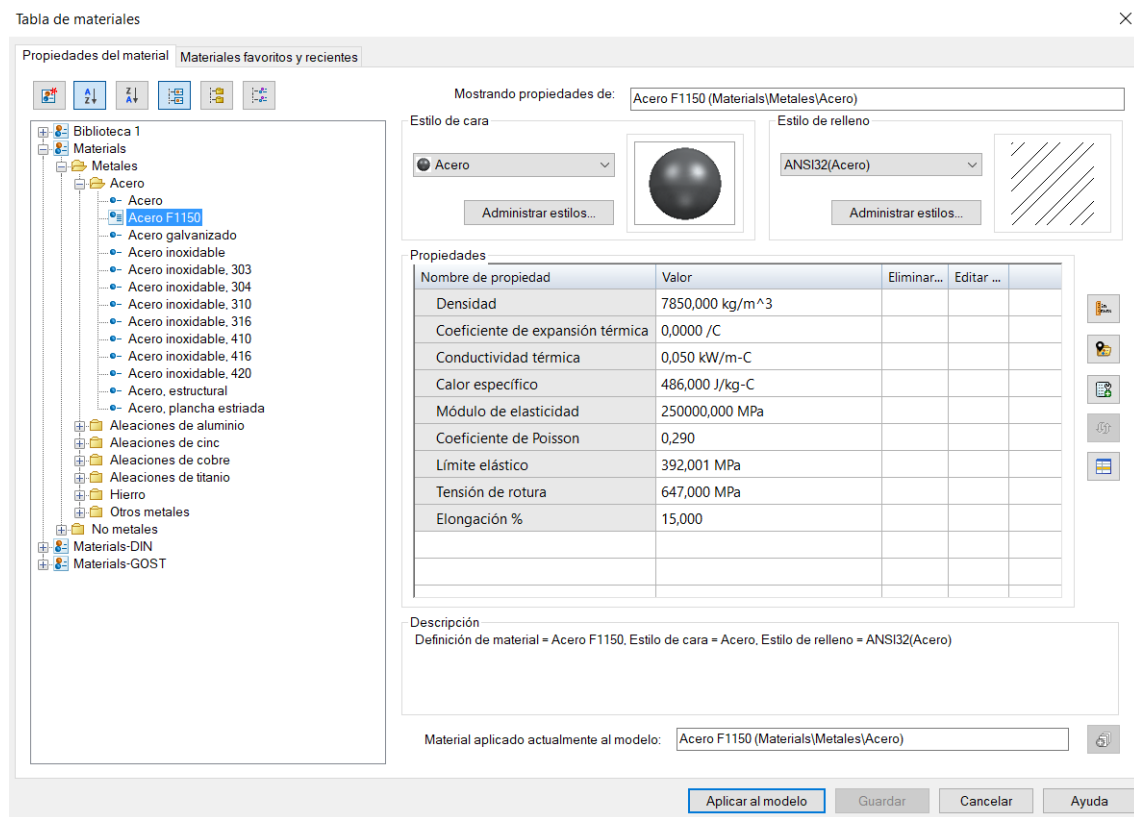


Ilustración 48 Adición del acero F1150 a la lista de materiales de SolidEdge.

Fuente propia

4.3 ASIGNAR CARGAS Y RESTRICCIONES

En este paso se añaden las cargas calculadas en el apartado 3.5 y se restringirán las regiones alrededor de los agujeros en la pieza para que evite la deformación o fractura en esas áreas críticas durante el proceso de carga.

En primer lugar, aplicamos en los agujeros de los soportes laterales la fuerza del peso de la rueda y eje calculada en el apartado 3.3, siendo en cada agujero una fuerza negativa en el eje z de -5091.18 N.

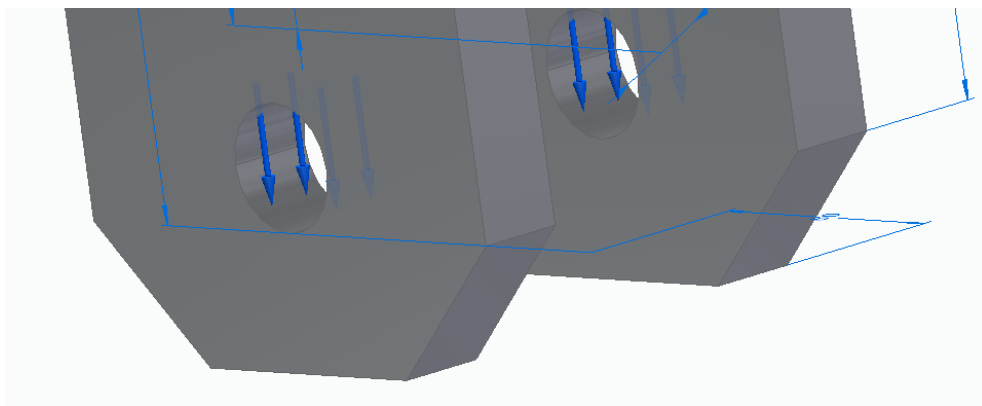


Ilustración 49 Detalle de la adición de las restricciones y cargas en la pieza

Fuente propia

En segundo lugar, se añadirá la gravedad para que la simulación también tenga en cuenta el peso de todo el soporte, no solo el de la rueda y el eje.

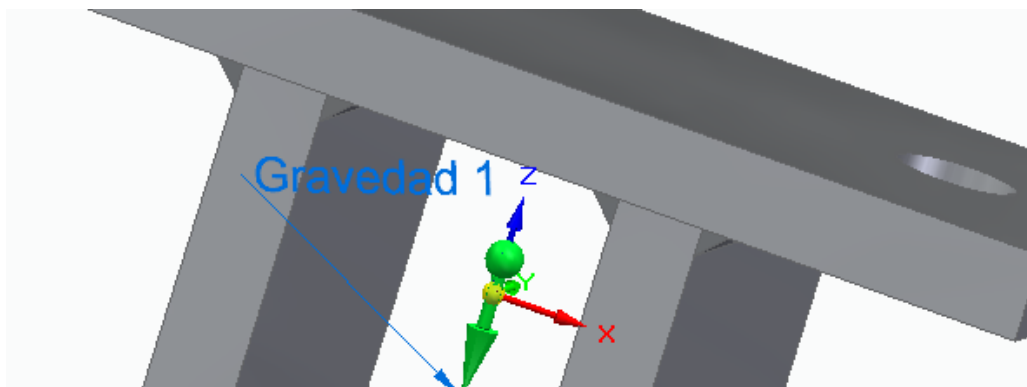


Ilustración 50 Detalle de la adición de la gravedad

Fuente propia

En tercer lugar, hay que aplicar fuerzas de tipo cojinete, para poder hacerlo, tendremos que realizar primero una división de la superficie de todo el agujero del soporte, dividiéndola por la mitad, ya que el par de cojinete solo afecta a la mitad inferior de esta superficie debido al peso que ejerce la rueda y el eje.

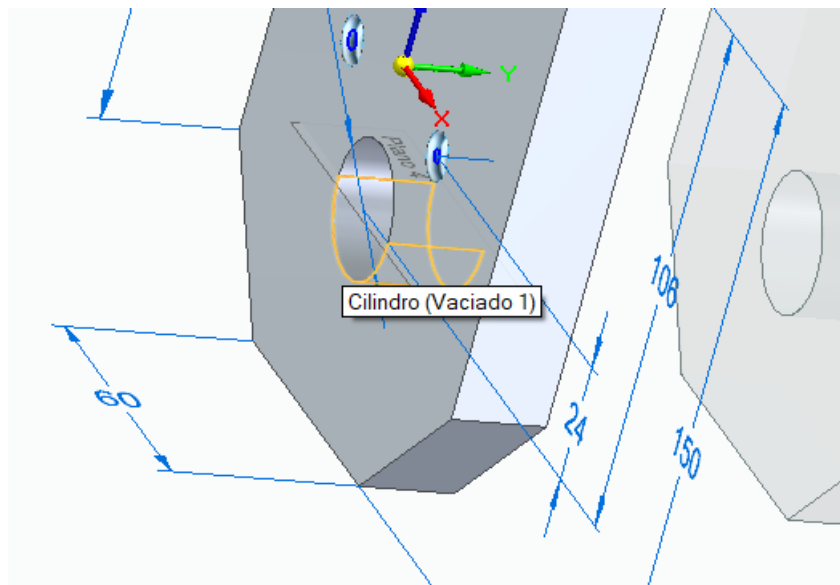


Ilustración 51 Detalle de la división del agujero del soporte izquierdo

Fuente propia

A continuación, aplicamos un cojinete de valor de 343.35N, calculado anteriormente en el apartado 3.3:

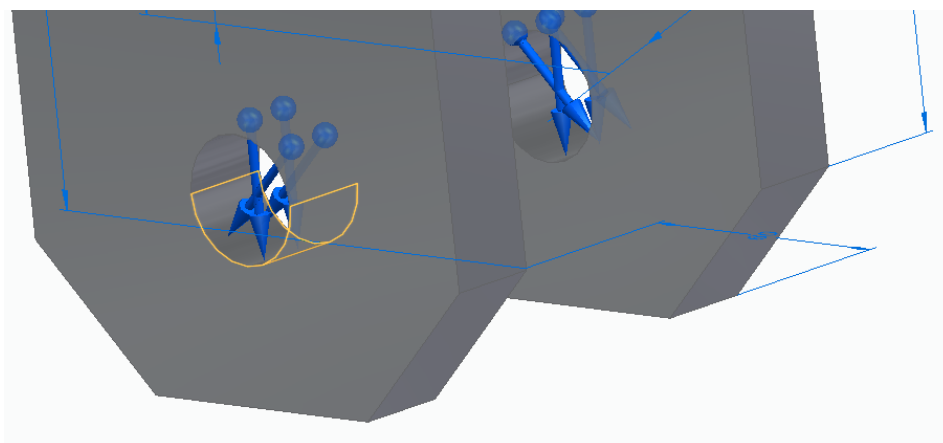


Ilustración 52 Adición del cojinete

Fuente propia

En cuarto lugar, añadimos el apoyo fijo, que, debido a la arandela, va a ser en la zona inferior de los agujeros del soporte superior. Por medio de la herramienta del apartado de superficies, en división por partición, separamos el borde lo que ocupe la arandela, en este caso elegimos un valor de 4 mm, mostrándose esto en la figura inferior.

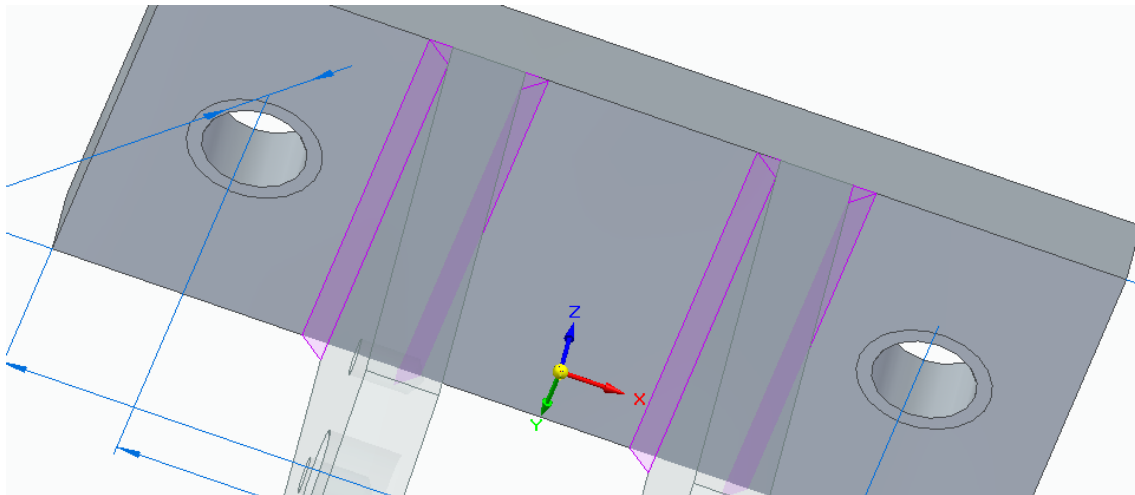


Ilustración 53 Desplazamiento del borde de los agujeros del soporte superior.

Fuente propia

Una vez definidas estas regiones, definimos estas como apoyos fijos.



Ilustración 54 Aplicación de los apoyos fijos

Fuente propia

En quinto lugar, también hay que aplicarle a las cuatro caras de los soportes la restricción de que se pueda deslizar a lo largo de su superficie ya que al aplicar esto, permitimos el desplazamiento de las caras laterales debido al peso de la estructura y las fuerzas aplicadas, es decir, que permita un desplazamiento lineal en el plano de las caras. Esto lo hacemos para que también el programa cuente con que la deformación se vaya a realizar también a lo largo de estas superficies.

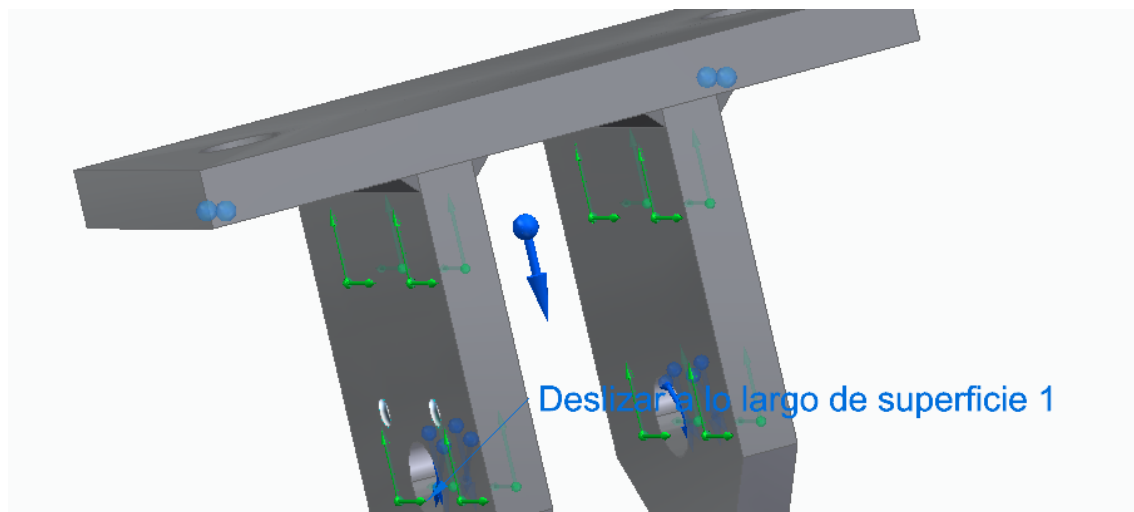


Ilustración 55 Adición del deslizamiento a lo largo de las caras laterales

Fuente propia

Y, por sexto y último lugar, tenemos que definir que los cordones de soldadura están pegados a cada soporte y techo, y esto se realiza mediante conectores.

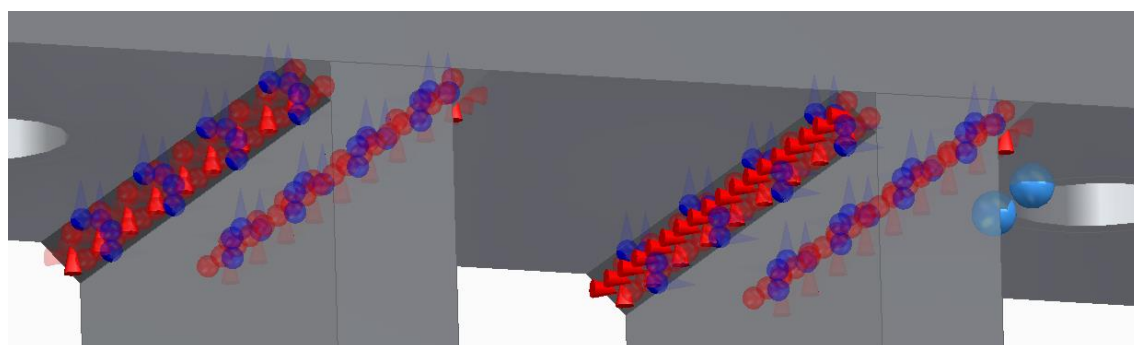


Ilustración 56 Detalle de la adición de los conectores en los cordones de soldadura

Fuente propia

Por otro lado, para mallar la pieza, tendremos que seleccionar un mallado diferente para algunas partes concretas de la pieza, como alrededor de los agujeros de los soportes, zonas en donde más va a sufrir la pieza para poder tener más precisión de malla en esas zonas. La malla tiene que estar más pulida en las zonas que realizan más esfuerzos.

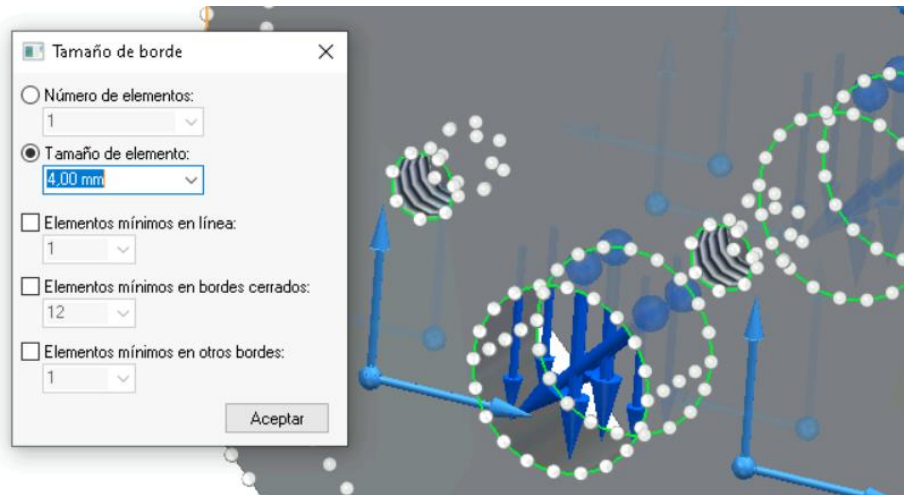


Ilustración 57 Detalle de la especificación de malla en zonas con mayores esfuerzos

Fuente propia

Quedando el mallado de la pieza, de la siguiente manera, donde podemos observar claramente que en los bordes de los agujeros aumenta el número de elementos para que podamos, ahora en la simulación, ver con mayor claridad cómo se comportan esas zonas con mayores esfuerzos.

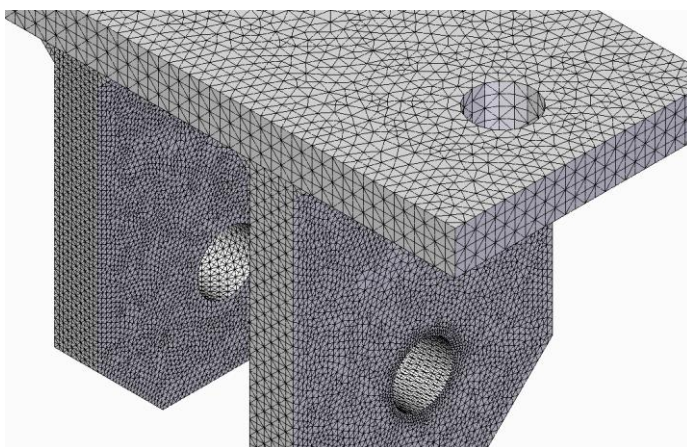


Ilustración 58 Detalle del mallado de la pieza

Fuente propia

4.4 SIMULACIÓN FEM

Antes del proceso iterativo, realizaremos un primer estudio estático a través de la herramienta de Solid Edge.

Un estudio estático es un análisis de simulación que se realiza en una pieza o conjunto para evaluar su comportamiento bajo diferentes cargas o condiciones de carga estáticas. Se realiza para determinar si la pieza tiene suficiente resistencia para soportar las cargas impuestas. Se aplican cargas a la pieza durante este estudio, en este caso el peso de la rueda y el eje en los agujeros de los soportes laterales, así como la gravedad, para simular su comportamiento.

A través del software de Solid Edge, que utiliza modelos matemáticos y el FEM para determinar la distribución de las cargas y el comportamiento de la pieza ante estas cargas, se obtiene el resultado siguiente (Ilustración 53).

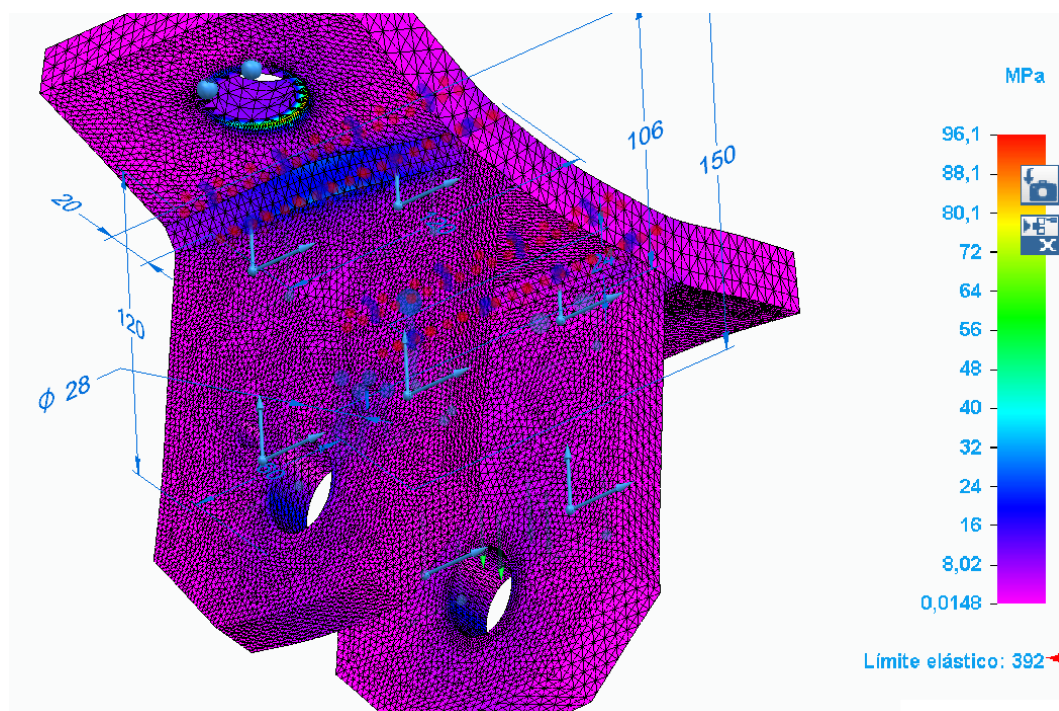


Ilustración 59 Estudio estático previo a la OT
Fuente propia

Podemos observar como el valor máximo de tensión sufrida por la pieza es de 96.8Mpa, un valor mucho menor a su límite elástico, por lo cual nuestra pieza no se rompería antes este estado de cargas.

4.5 OPTIMIZACIÓN DE LA PIEZA CON CDG

4.5.1 SERIE DE ITERACIONES 1

Una vez se haya comprobado que la pieza no se rompería con el estado de cargas impuesto, se pueden aplicar criterios de diseño generativo para iniciar el proceso iterativo para optimizar la topología de la pieza. Esto implica utilizar algoritmos para generar varias opciones de diseño que cumplan con las especificaciones de carga y restricciones impuestas. Luego, se evaluarán estas opciones y se seleccionará la topología óptima.

En la ilustración posterior podemos observar unas zonas rojas de 5mm alrededor de cada agujero, estas zonas son las anteriormente llamadas “regiones preservadas”.

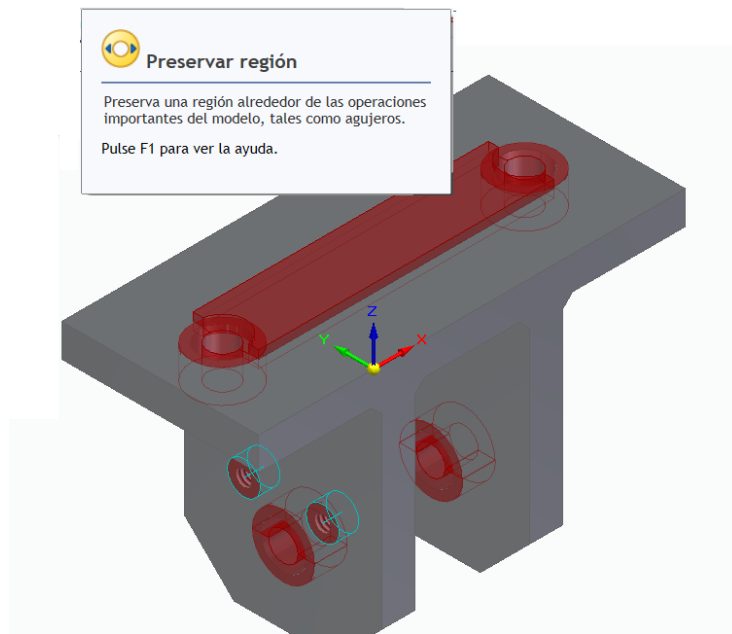


Ilustración 60 Detalle de las regiones preservadas en la pieza

Fuente propia

A partir de ahora, se iniciará la fase iterativa con el objetivo de lograr la pieza óptima, la cual requerirá realizar diversas pruebas y evaluaciones. En esta ocasión, se iniciará la iteración optimizando la pieza mediante una reducción del 20% de su masa.

A medida que se van realizando las pruebas, se irá aumentando o reduciendo el porcentaje de reducción de masa en función de los resultados obtenidos mediante las simulaciones de FEM, con el objetivo de encontrar el punto óptimo donde se logre un equilibrio adecuado entre la reducción de masa y que no rompa la pieza.

ITERACIÓN 1

Esta primera iteración, se llevará a cabo con una reducción de la masa de un 20% y una calidad de estudio de 50, dando lugar a la siguiente figura:

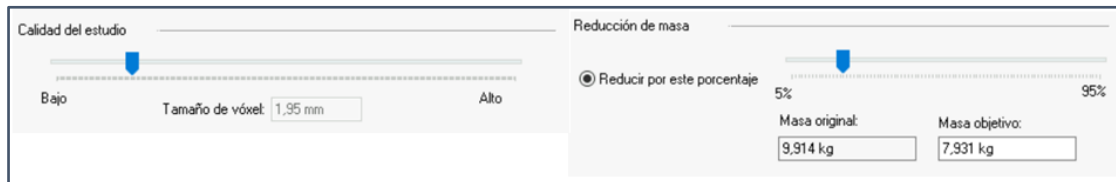


Ilustración 61 Detalle de la reducción de la masa al 20%

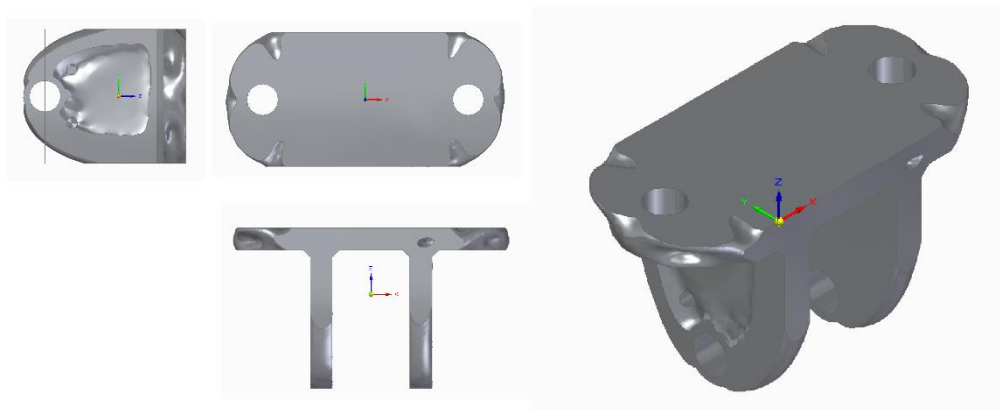
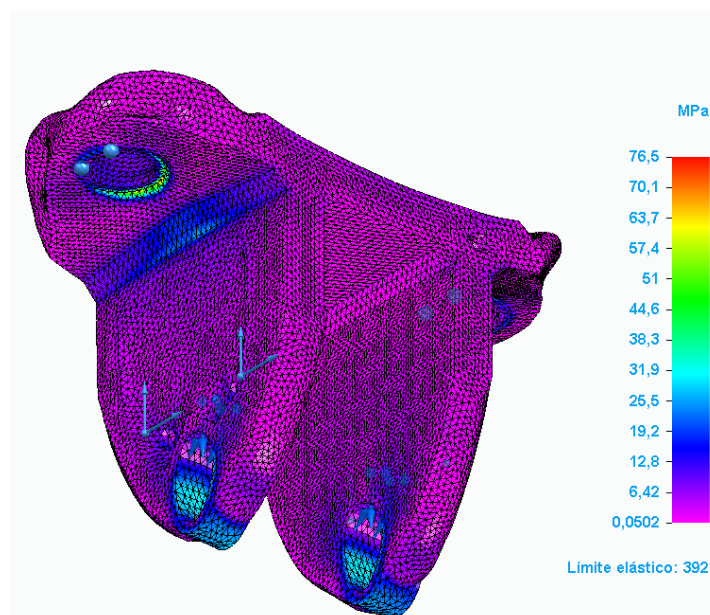


Ilustración 62 OT de la pieza en la primera iteración

En la Ilustración siguiente podemos observar como la pieza optimizada de la primera iteración no rompería teniendo un 20% menos de masa, ya que $76,5 < 392$. Por lo cual, continuaremos la segunda iteración aumentando este porcentaje.

*Ilustración 63
Simulación FEM a la
pieza optimizada 1*



ITERACION 2

Esta segunda iteración, se llevará a cabo con una reducción de la masa de un 30% y una calidad de estudio de 50, dando lugar a la siguiente figura:

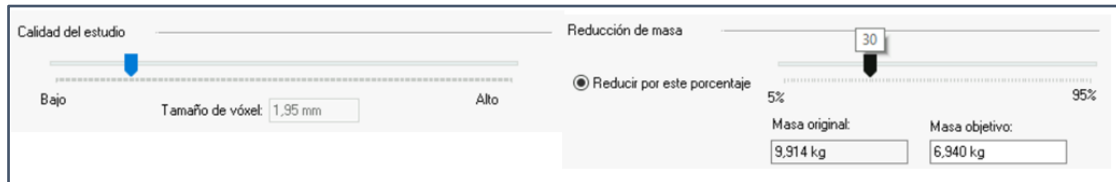


Ilustración 64 Detalle de la reducción de la masa al 30%

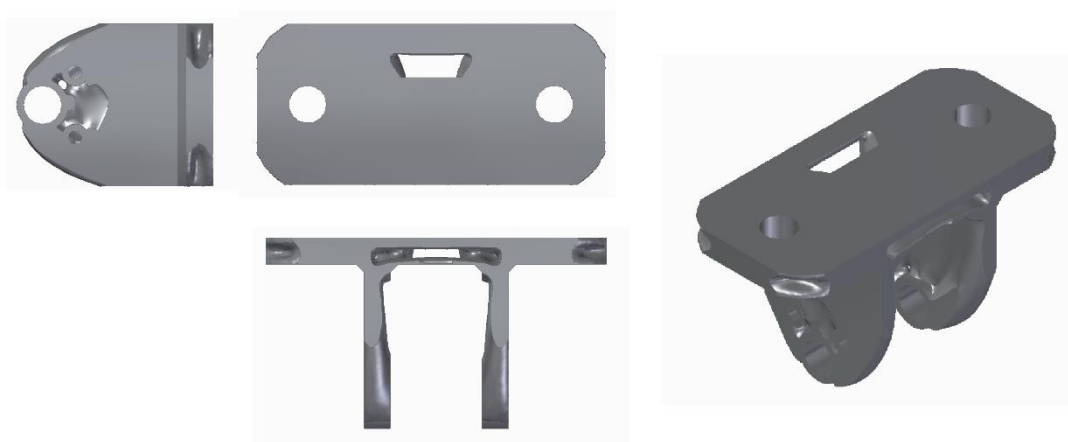
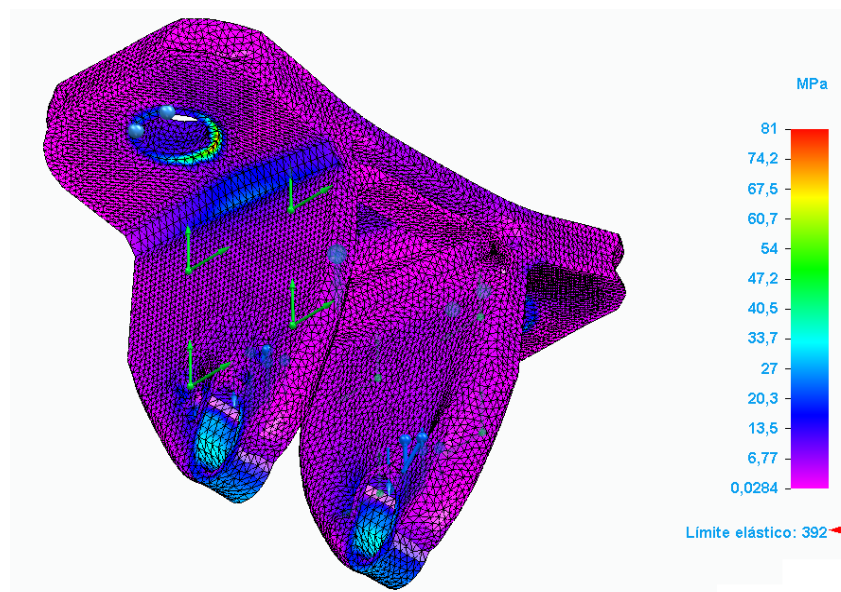


Ilustración 65 OT de la pieza en la segunda iteración

En la Ilustración siguiente podemos observar como la pieza optimizada de la segunda iteración no rompería teniendo un 30% menos de masa, por lo cual, continuaremos la tercera iteración aumentando este porcentaje.

*Ilustración 66
Simulación FEM a la
pieza optimizada 2*



ITERACION 3

Esta tercera iteración, se llevará a cabo con una reducción de la masa de un 50% y una calidad de estudio de 50, dando lugar a la siguiente figura:

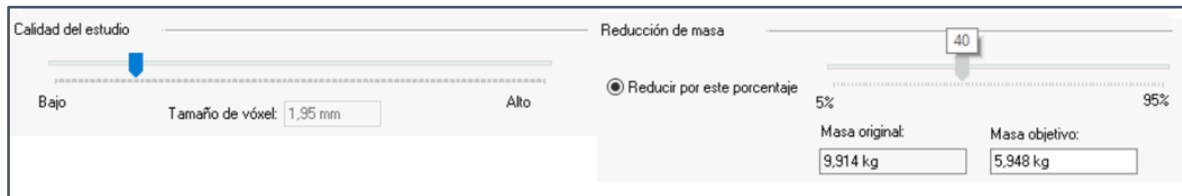


Ilustración 67 Detalle de la reducción de la masa al 40%

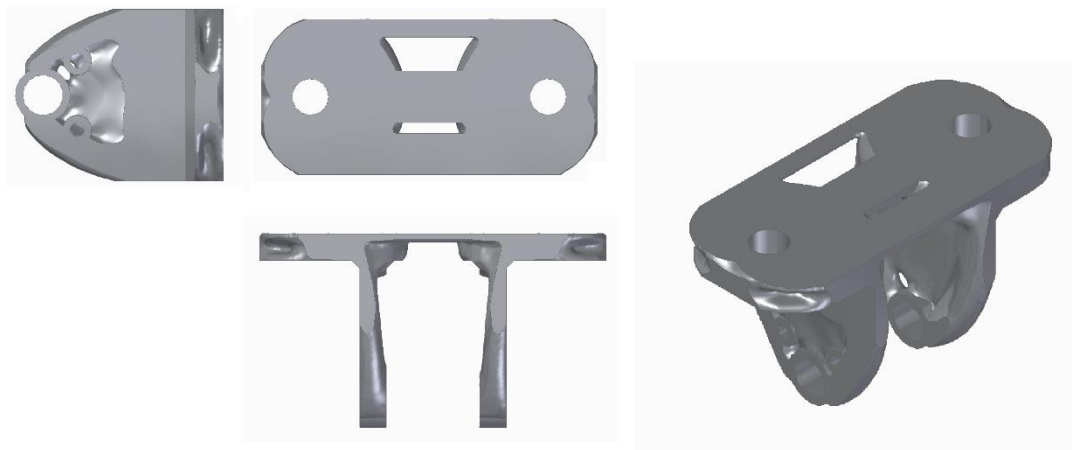
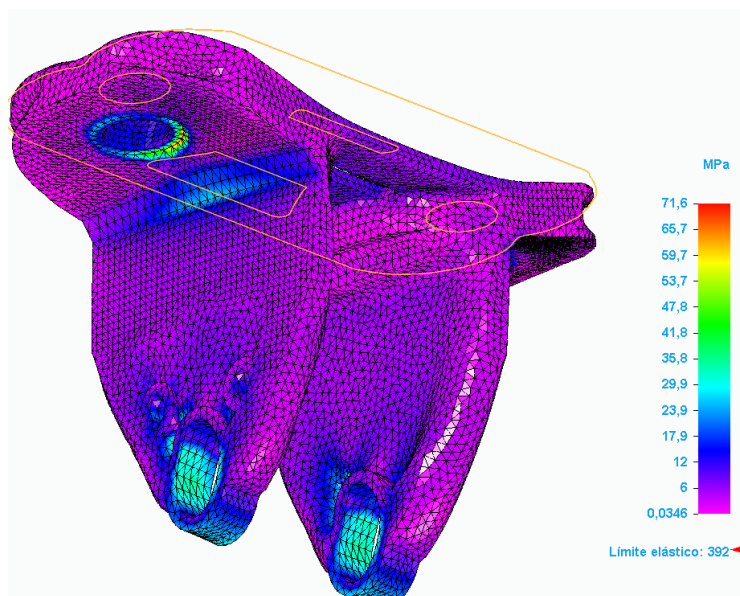


Ilustración 69 OT de la pieza en la tercera iteración

En la Ilustración siguiente podemos observar como la pieza optimizada de la segunda iteración no rompería teniendo un 40% menos de masa, por lo cual, continuaremos la tercera iteración aumentando este porcentaje.

*Ilustración 68
Simulación FEM a la
pieza optimizada 3*



ITERACION 4

Esta cuarta iteración, se llevará a cabo con una reducción de la masa de un 50% y una calidad de estudio de 50, dando lugar a la siguiente figura:

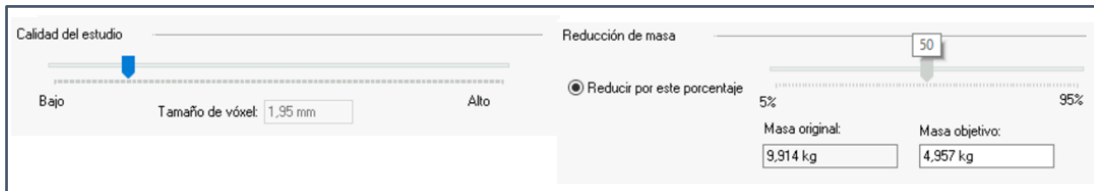


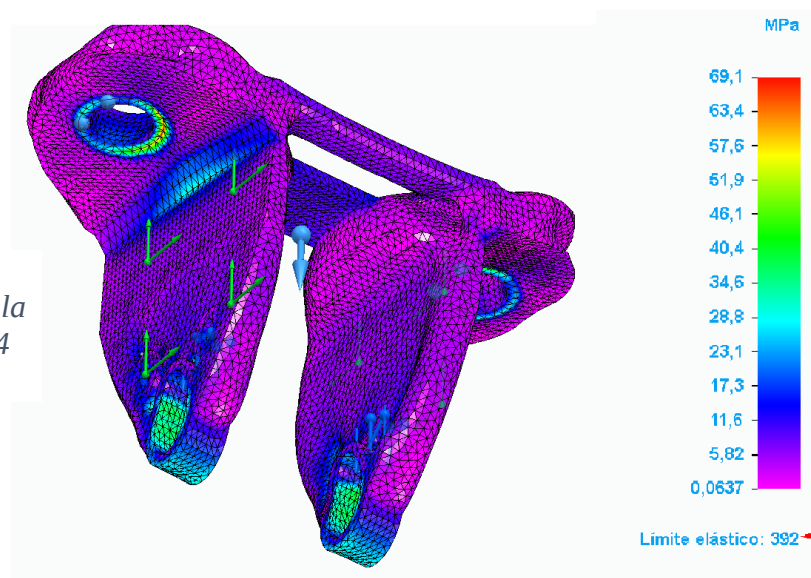
Ilustración 71 Detalle de la reducción de la masa al 50%



Ilustración 70 OT de la pieza en la cuarta iteración

En la Ilustración siguiente podemos observar como la pieza optimizada de la cuarta iteración no rompería teniendo un 50% menos de masa, por lo cual, continuaremos la quinta iteración aumentando este porcentaje.

*Ilustración 72
Simulación FEM a la
pieza optimizada 4*



ITERACION 5

Esta quinta iteración, se llevará a cabo con una reducción de la masa de un 60% y una calidad de estudio de 50, dando lugar a la siguiente figura:

Calidad del estudio	Reducción de masa
<input type="range"/>	<input type="range"/>
Bajo	☒ Reducir por este porcentaje
Tamaño de vóxel: 1,95 mm	5% 95%
	Masa original: 9,914 kg Masa objetivo: 3,966 kg

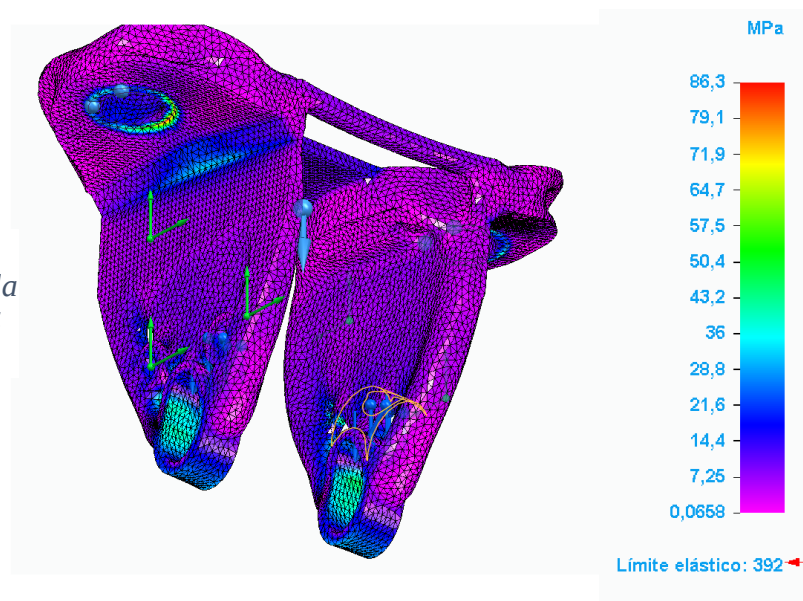
Ilustración 74 Detalle de la reducción de la masa al 60%



Ilustración 73 OT de la pieza en la quinta iteración

En la Ilustración siguiente podemos observar como la pieza optimizada de la cuarta iteración no rompería teniendo un 60% menos de masa, por lo cual, continuaremos la sexta iteración aumentando este porcentaje

*Ilustración 75
Simulación FEM a la
pieza optimizada 5*



ITERACION 6

Esta sexta iteración, se llevará a cabo con una reducción de la masa de un 70% y una calidad de estudio de 50, dando lugar a la siguiente figura:

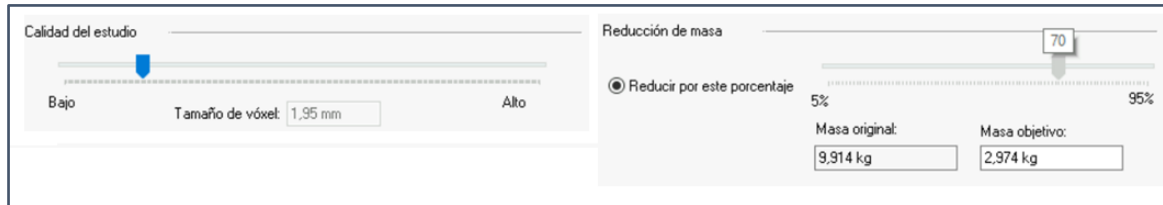


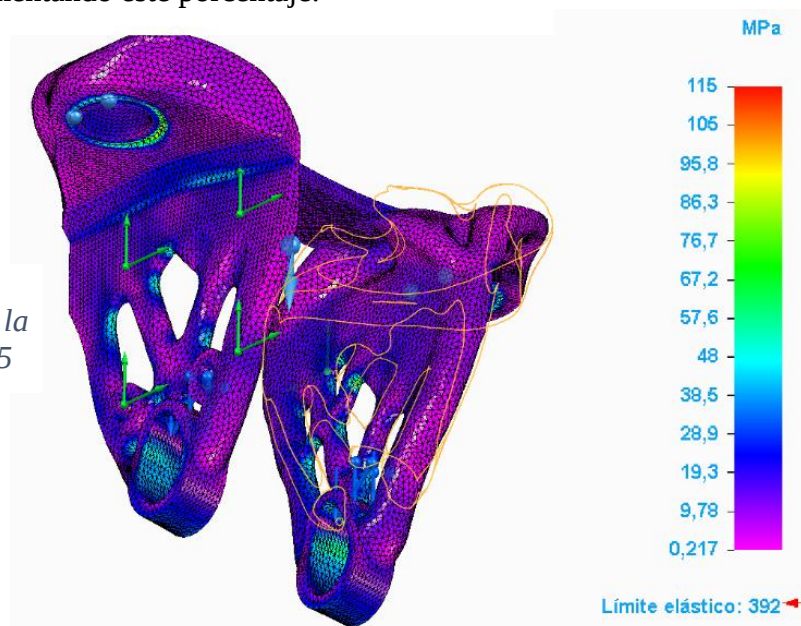
Ilustración 77 Detalle de la reducción de la masa al 70%



Ilustración 76 OT de la pieza en la sexta iteración

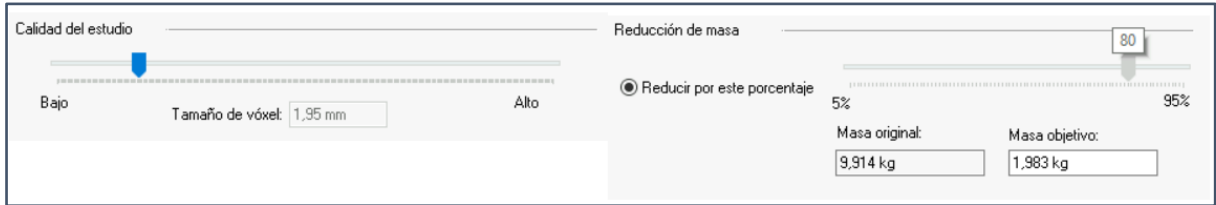
En la Ilustración siguiente podemos observar como la pieza optimizada de la cuarta iteración no rompería teniendo un 70% menos de masa, por lo cual, continuaremos la séptima iteración aumentando este porcentaje.

*Ilustración 78
Simulación FEM a la
pieza optimizada 5*



ITERACION 7

Esta séptima iteración, se llevará a cabo con una reducción de la masa de un 80% y una calidad de estudio de 50, dando lugar a la siguiente figura:



Calidad del estudio: [Slider from Bajo to Alto, set to 50]
 Tamaño de vóxel: 1,95 mm
 Reducción de masa: [Slider from 5% to 95%, set to 80]
☒ Reducir por este porcentaje
 Masa original: 9,914 kg
 Masa objetivo: 1,983 kg

Ilustración 80 Detalle de la reducción de la masa al 80%

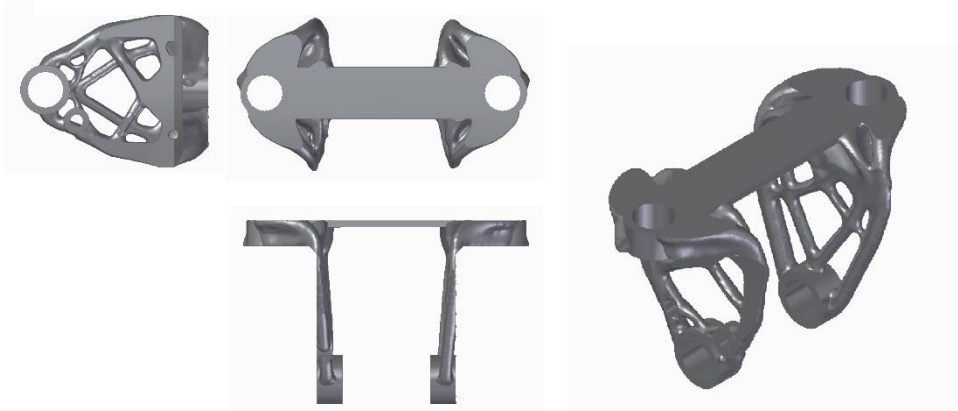
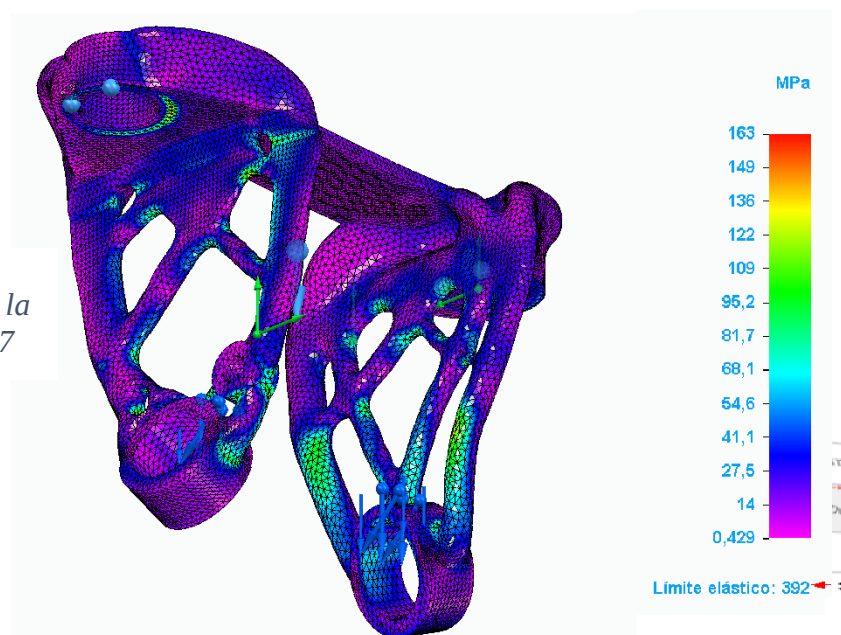


Ilustración 79 OT de la pieza en la séptima iteración

En la Ilustración siguiente podemos observar como la pieza optimizada de la cuarta iteración no rompería teniendo un 80% menos de masa, por lo cual, continuaremos la octava iteración aumentando la masa máxima soportada.

*Ilustración 81
Simulación FEM a la
pieza optimizada 7*



4.5.2 SERIE DE ITERACIONES 2

Para poder llegar a una iteración en la cual podamos observar que en cierto punto la pieza llega a romper, tenemos que subir el peso establecido máximo que puede soportar la polea.

Los cálculos e iteraciones anteriores son los resultantes de un sistema de fuerzas en el cual el peso que estaba soportando la polea era de 1 tonelada; por lo tanto, ahora, realizaremos la siguiente tanda de iteraciones respecto a una masa mayor, una masa de 3500 kg.

Por lo tanto, las nuevas fuerzas serían las siguientes:

$$\sum F_x = 0 ; \sum F_z = 0 \rightarrow \text{Al no haber nada que demuestre}$$

lo contrario, las ejudicamos 0

$$\sum F_y = 0 \rightarrow A_y + B_y - 3500kg = 0$$

$$\sum M_z = 0 \rightarrow -(3500 * 9.81 + \text{Peso})kg * 0.063m + B_y * 0.063 * 2 = 0$$

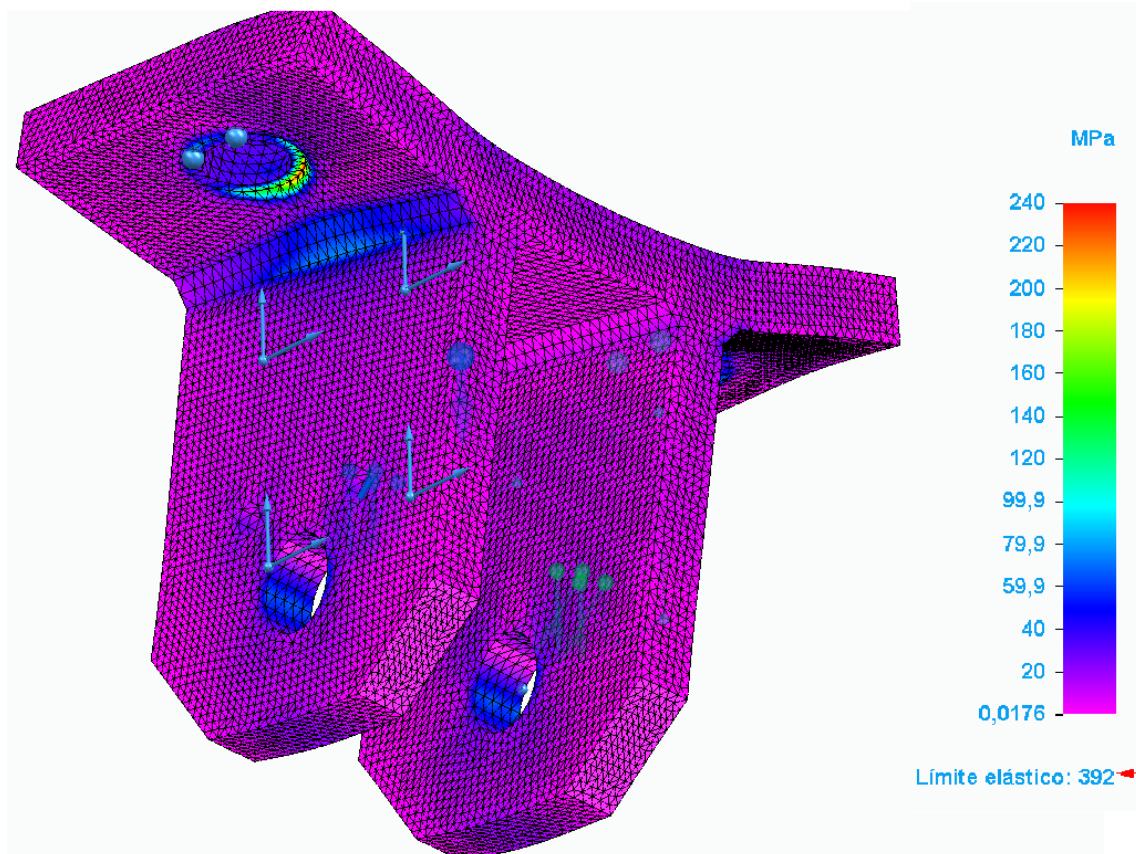
$$\sum M_x = 0 \rightarrow M_x - 3500kg * 9.81 * \frac{0.07}{2}m = 0$$

Las fuerzas en los apoyos de los soportes laterales resultantes serían las siguientes:

$$M_x = 1201.725 Nm$$

$$A_y = B_y = 17353.68 N$$

Y, por otro lado, la simulación FEM con este nuevo caso de cargas sería la siguiente:



ITERACIÓN 1.2

Esta primera iteración, se llevará a cabo con una reducción de la masa de un 30% y una calidad de estudio de 50, dando lugar a la siguiente figura:

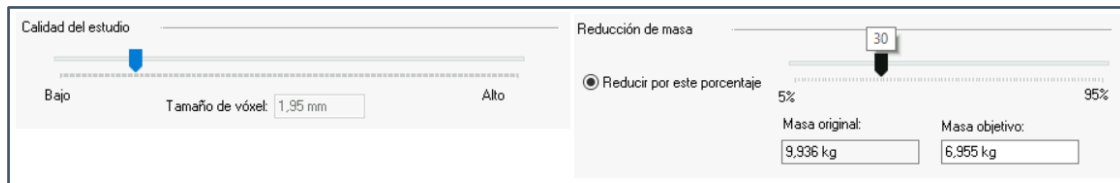


Ilustración 82 Detalle de la reducción de la masa al 30%

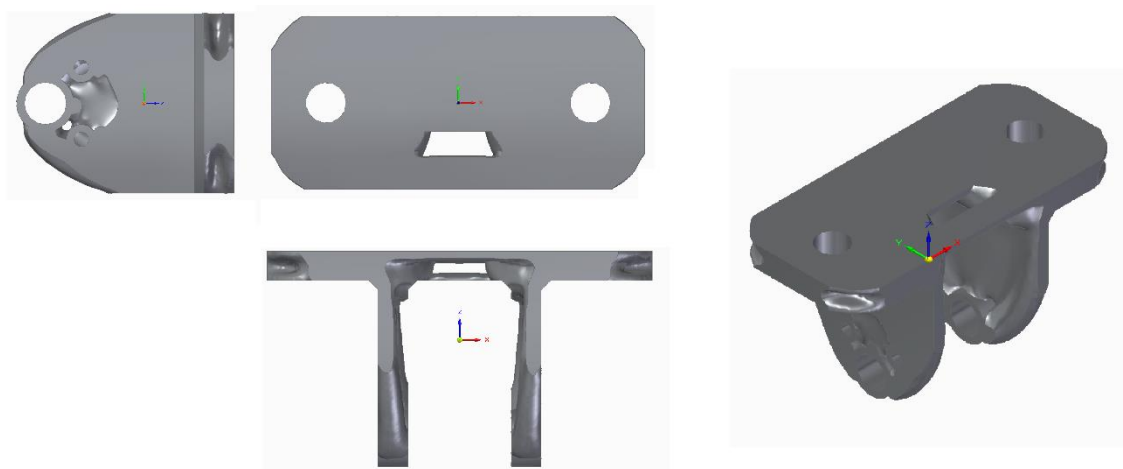
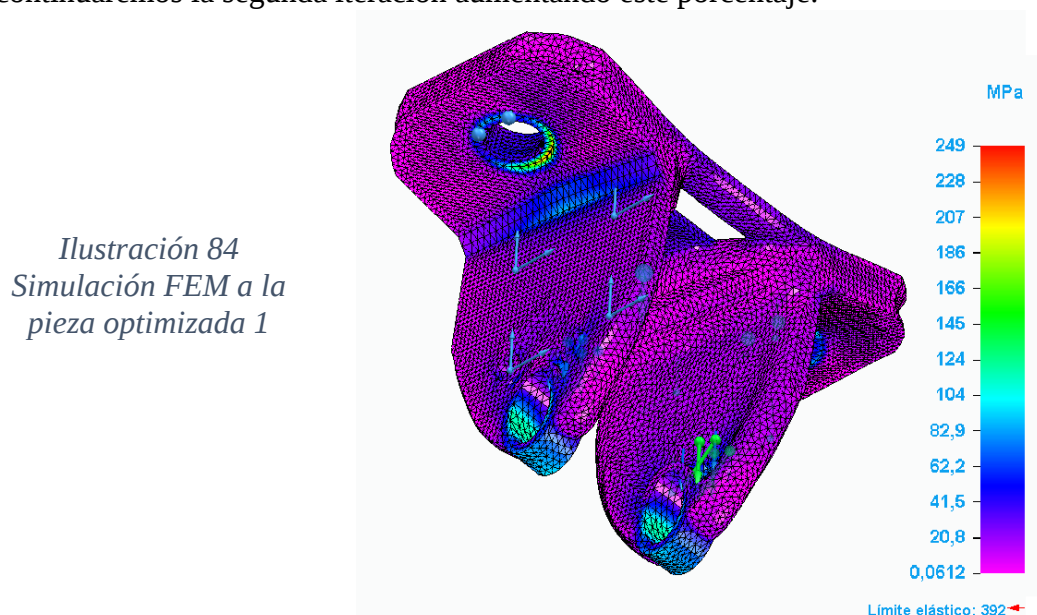


Ilustración 83 OT de la pieza en la primera iteración

En la Ilustración siguiente podemos observar como la pieza optimizada de la primera iteración no rompería teniendo un 30% menos de masa, ya que. Por lo cual, continuaremos la segunda iteración aumentando este porcentaje.



*Ilustración 84
Simulación FEM a la
pieza optimizada 1*

ITERACION 2.2

Esta segunda iteración, se llevará a cabo con una reducción de la masa de un 40% y una calidad de estudio de 50, dando lugar a la siguiente figura:

Calidad del estudio Bajo Alto Tamaño de vóxel: 1,95 mm		Reducción de masa 40 ☒ Reducir por este porcentaje 5% 95% Masa original: 9,936 kg Masa objetivo: 5,961 kg	
--	--	--	--

Ilustración 85 Detalle de la reducción de la masa al 30%

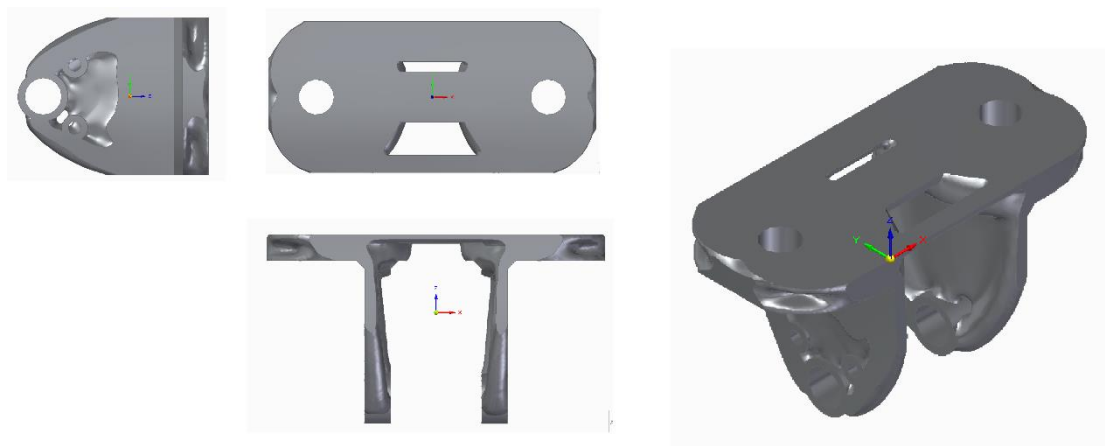
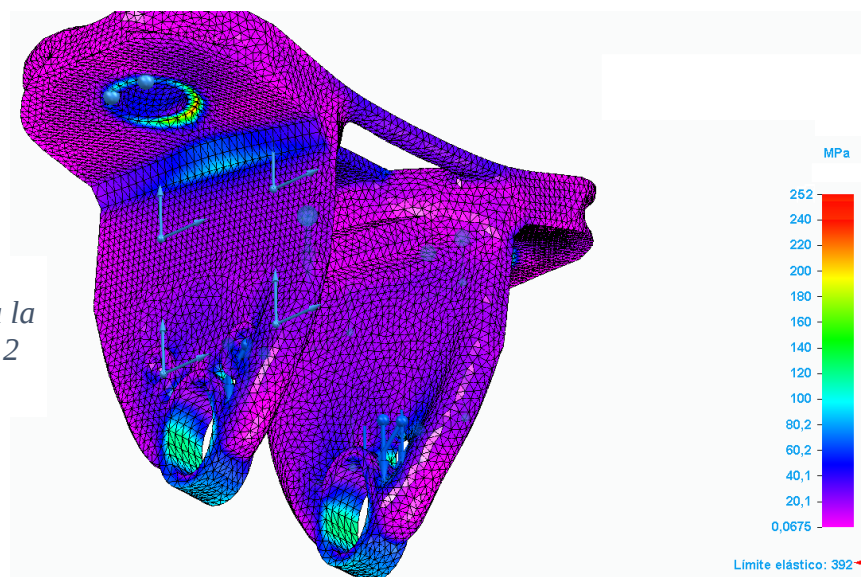


Ilustración 86 OT de la pieza en la segunda iteración

En la Ilustración siguiente podemos observar como la pieza optimizada de la segunda iteración no rompería teniendo un 40% menos de masa, por lo cual, continuaremos la tercera iteración aumentando este porcentaje.

*Ilustración 87
Simulación FEM a la
pieza optimizada 2*



ITERACION 3.2

Esta tercera iteración, se llevará a cabo con una reducción de la masa de un 50% y una calidad de estudio de 50, dando lugar a la siguiente figura:

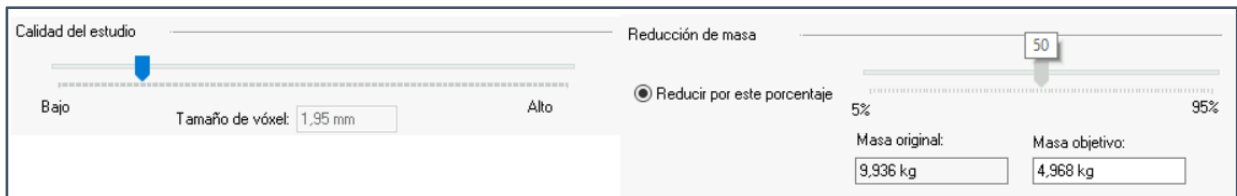


Ilustración 88 Detalle de la reducción de la masa al 50%

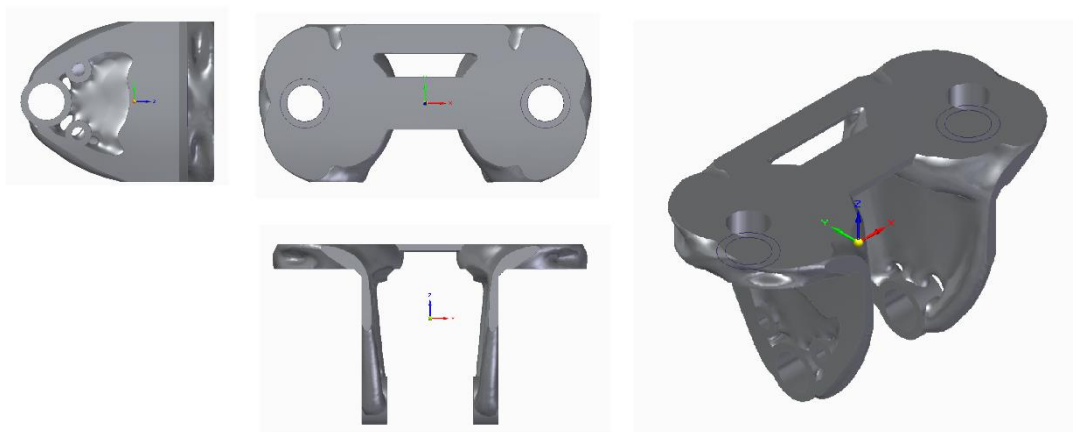
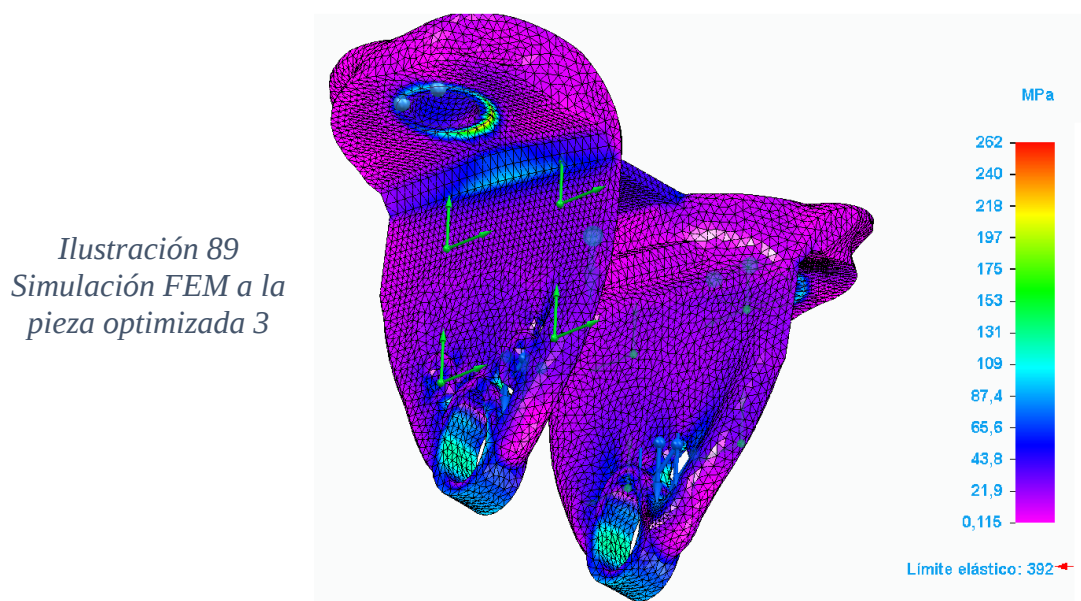


Ilustración 90 OT de la pieza en la tercera iteración

En la Ilustración siguiente podemos observar como la pieza optimizada de la segunda iteración no rompería teniendo un 50% menos de masa, por lo cual, continuaremos la tercera iteración aumentando este porcentaje.



*Ilustración 89
Simulación FEM a la
pieza optimizada 3*

ITERACION 4.2

Esta cuarta iteración, se llevará a cabo con una reducción de la masa de un 60% y una calidad de estudio de 50, dando lugar a la siguiente figura:

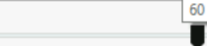
Calidad del estudio  Bajo Alto Tamaño de vóxel: 1,95 mm	Reducción de masa  60 ☒ Reducir por este porcentaje 5% 95% Masa original: 9,936 kg Masa objetivo: 3,974 kg
---	---

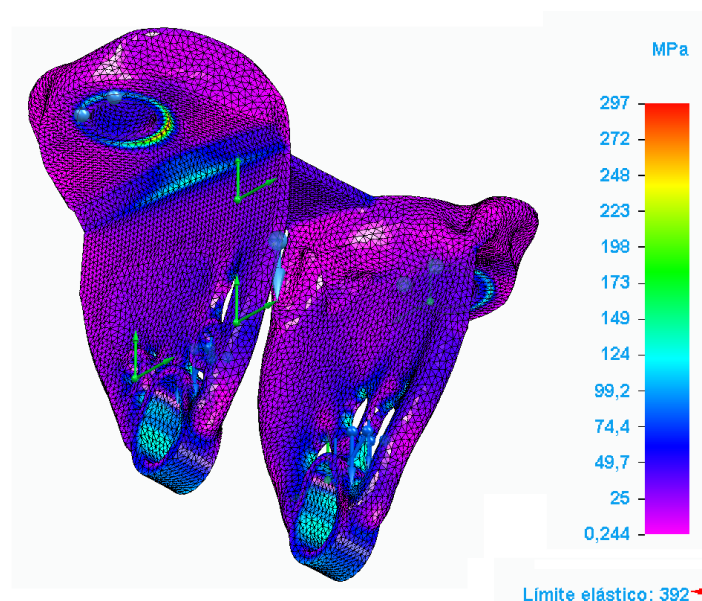
Ilustración 92 Detalle de la reducción de la masa al 60%



Ilustración 91 OT de la pieza en la cuarta iteración

En la Ilustración siguiente podemos observar como la pieza optimizada de la cuarta iteración no rompería teniendo un 60% menos de masa, por lo cual, continuaremos la quinta iteración aumentando este porcentaje.

*Ilustración 93
Simulación FEM a la
pieza optimizada 4*



ITERACION 5.2

Esta quinta iteración, se llevará a cabo con una reducción de la masa de un 70% y una calidad de estudio de 50, dando lugar a la siguiente figura:

Calidad del estudio Bajo Alto Tamaño de vóxel: 1.95 mm	Reducción de masa 70 ☒ Reducir por este porcentaje 5% 95% Masa original: 9.914 kg Masa objetivo: 2.974 kg
---	--

Ilustración 95 Detalle de la reducción de la masa al 70%

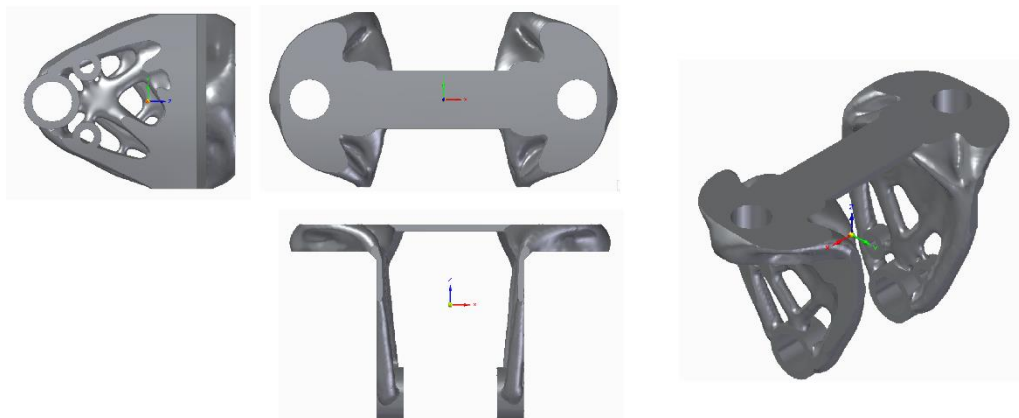
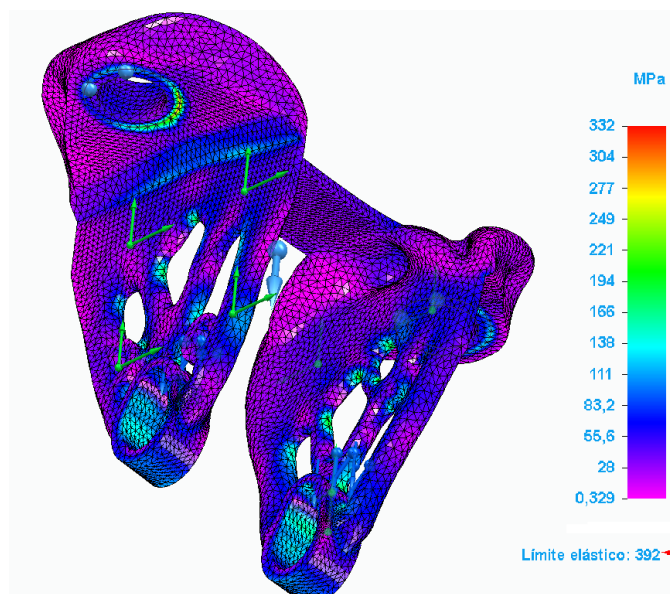


Ilustración 94 OT de la pieza en la quinta iteración

En la Ilustración siguiente podemos observar como la pieza optimizada de la cuarta iteración no rompería teniendo un 70% menos de masa, por lo cual, continuaremos la sexta iteración aumentando este porcentaje

*Ilustración 96
Simulación FEM a la
pieza optimizada 5*



ITERACION 6.2

Esta sexta iteración, se llevará a cabo con una reducción de la masa de un 80% y una calidad de estudio de 50, dando lugar a la siguiente figura:

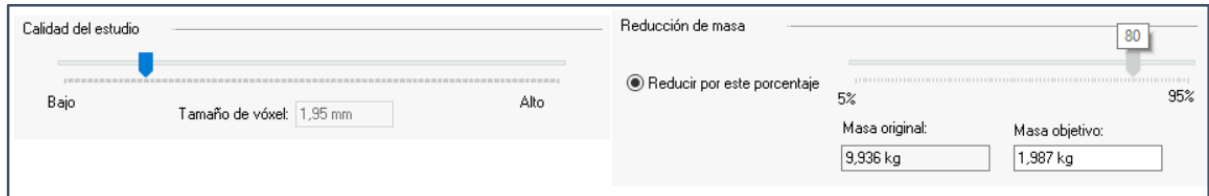


Ilustración 98 Detalle de la reducción de la masa al 70%

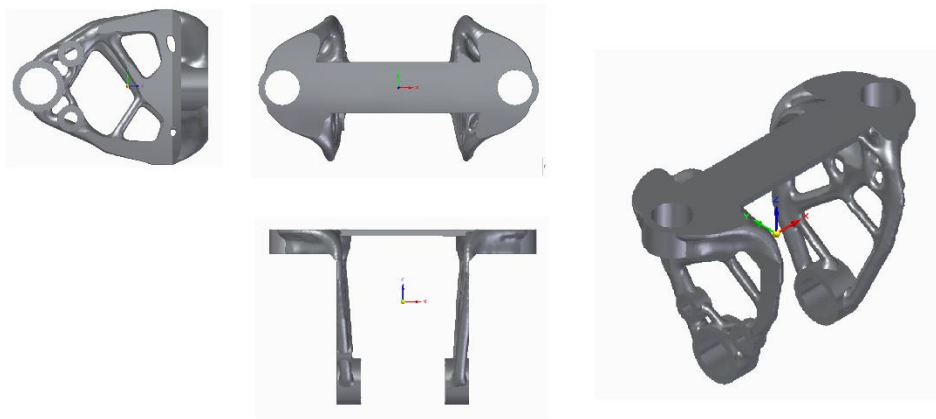
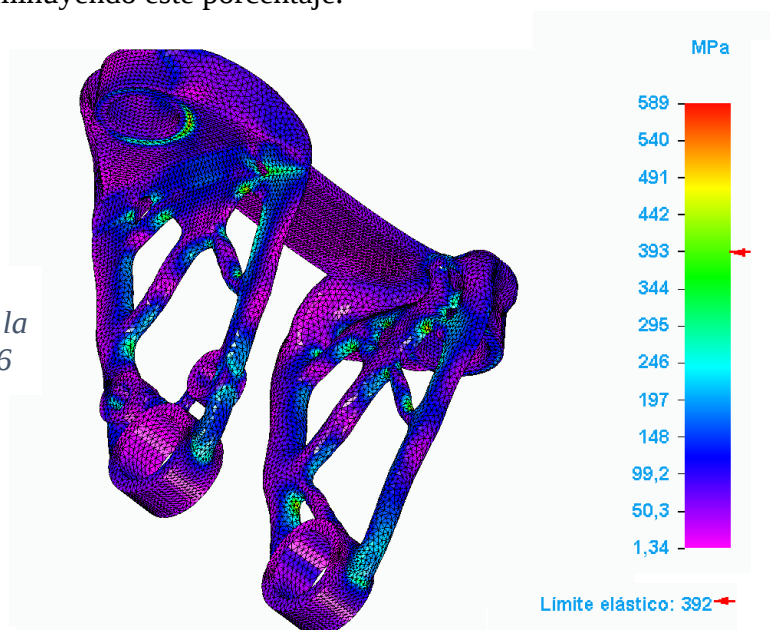


Ilustración 97 OT de la pieza en la sexta iteración

En la Ilustración siguiente podemos observar como la pieza optimizada de la cuarta iteración sí que rompería teniendo un 80% menos de masa, por lo cual, continuaremos la séptima iteración disminuyendo este porcentaje.

*Ilustración 99
Simulación FEM a la
pieza optimizada 6*



ITERACION 7.2

Esta séptima iteración, se llevará a cabo con una reducción de la masa de un 75% y una calidad de estudio de 50, dando lugar a la siguiente figura:



Ilustración 101 OT de la pieza en la sexta iteración

Generar estudio

Calidad del estudio

Bajo Alto

Tamaño de vóxel: 1,95 mm

Reducción de masa

75

5% 95%

Reducir por este porcentaje

Masa original: 9,936 kg

Masa objetivo: 2,484 kg

Ilustración 100 Detalle de la reducción de la masa al 75%

En la Ilustración siguiente podemos observar como la pieza optimizada de la séptima iteración no rompería teniendo un 80% menos de masa, sin embargo podemos observar que está cerca de hacerlo, es decir, podemos dar por concluida la iteración, siendo esta nuestra figura resultante.

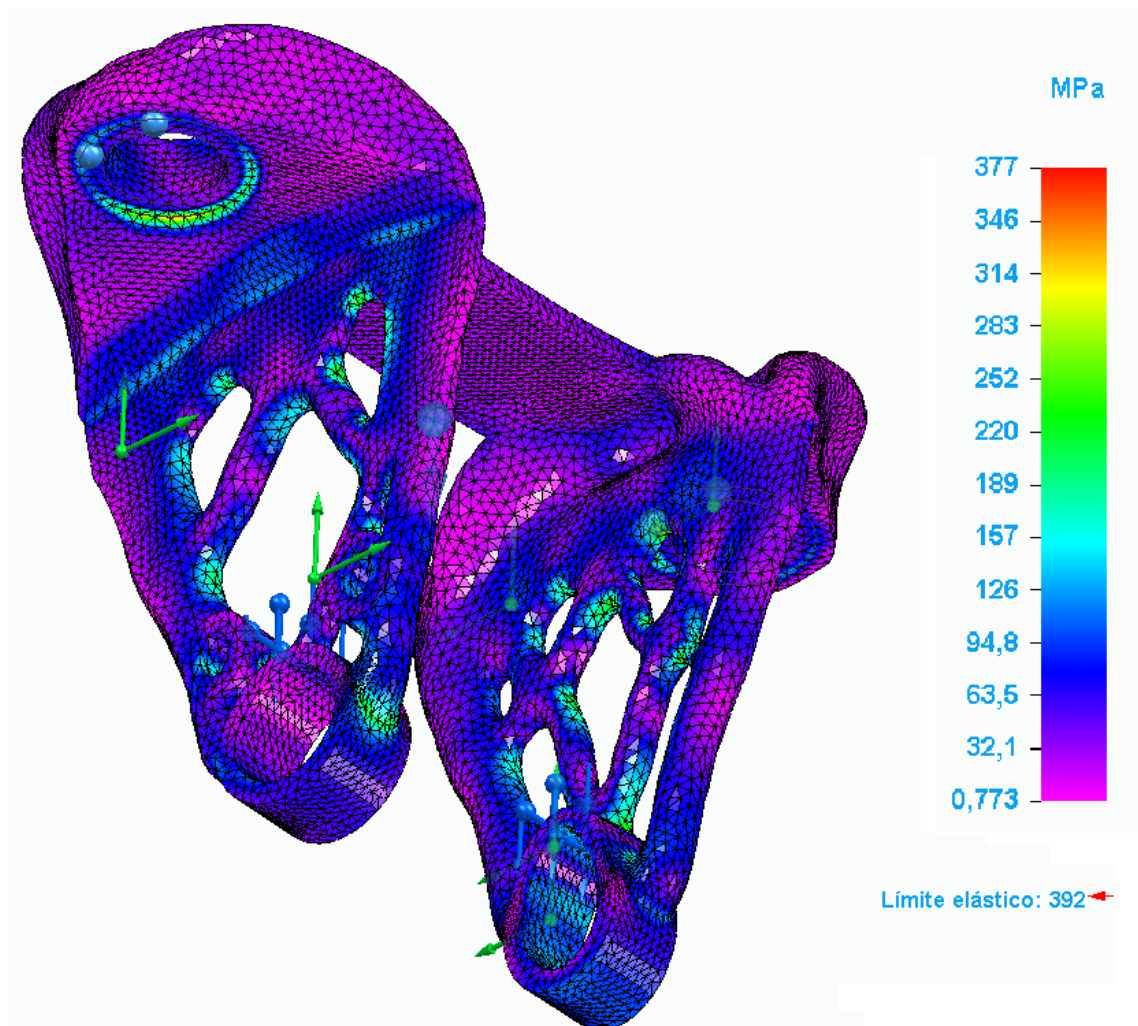


Ilustración 102 Simulación FEM a la pieza optimizada 7

Fuente propia

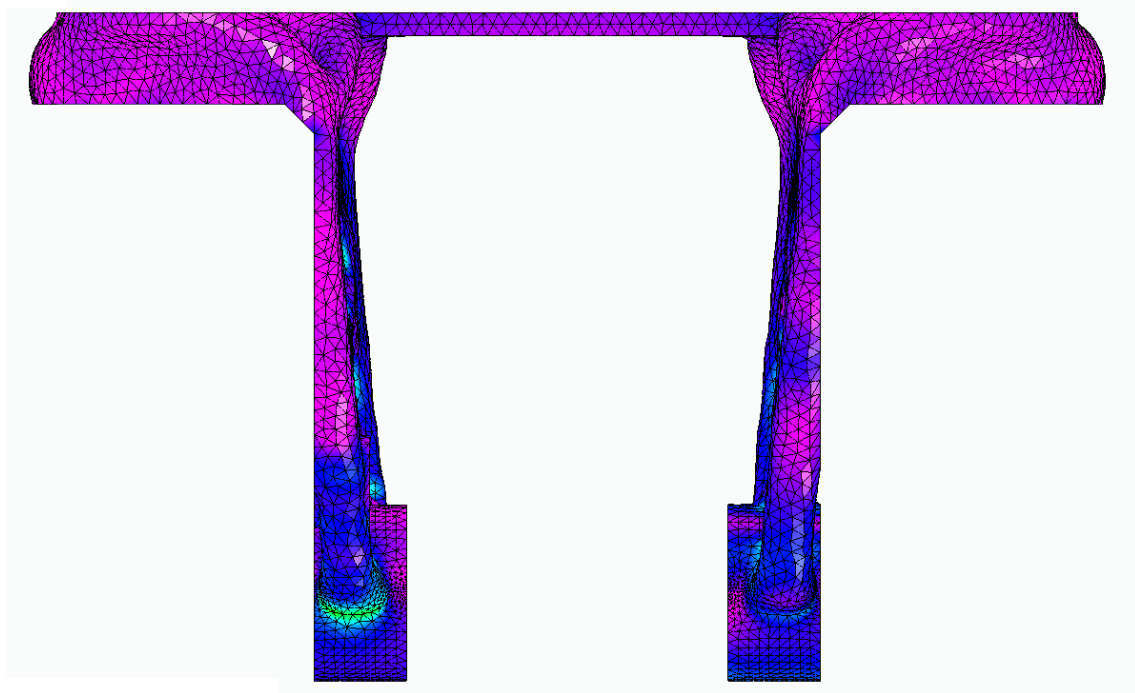


Ilustración 103 Alzado de la pieza resultante optimizada

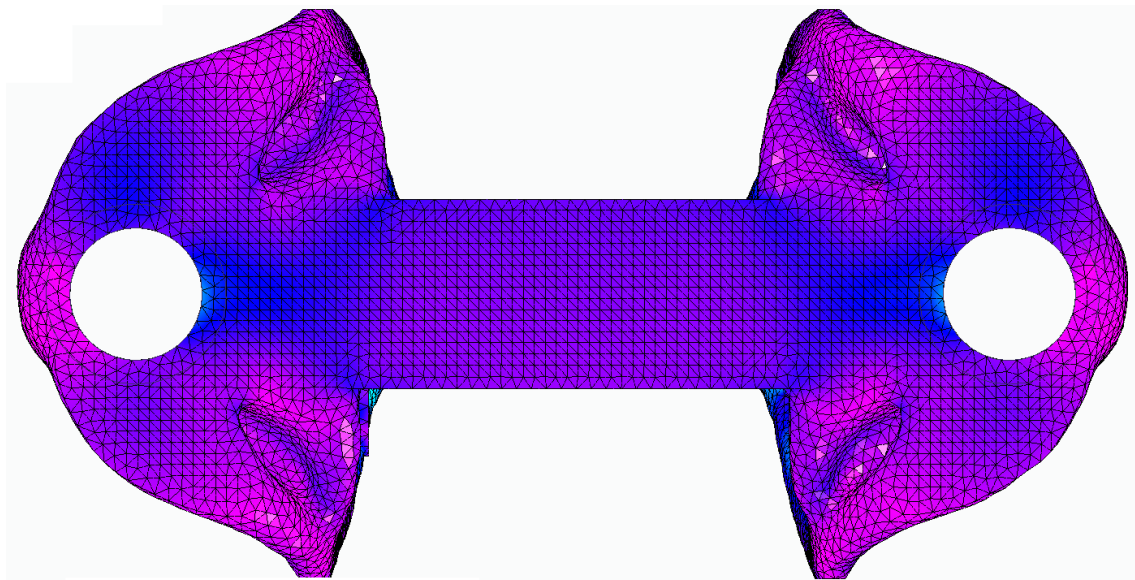


Ilustración 104 Planta de la pieza resultante optimizada

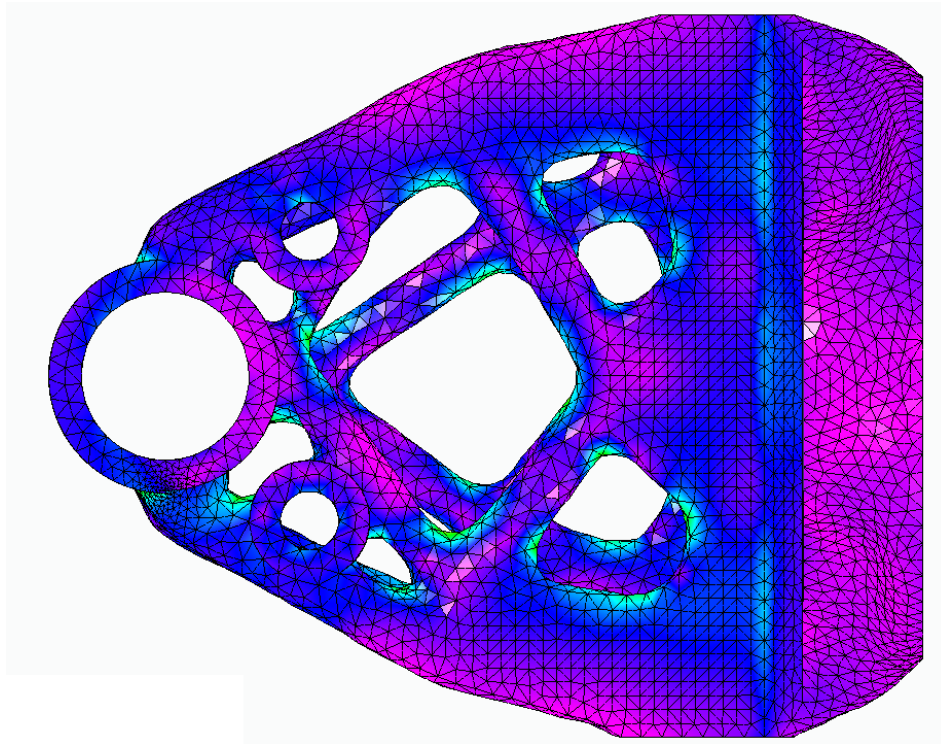


Ilustración 106 Vista izquierda de la pieza optimizada resultante

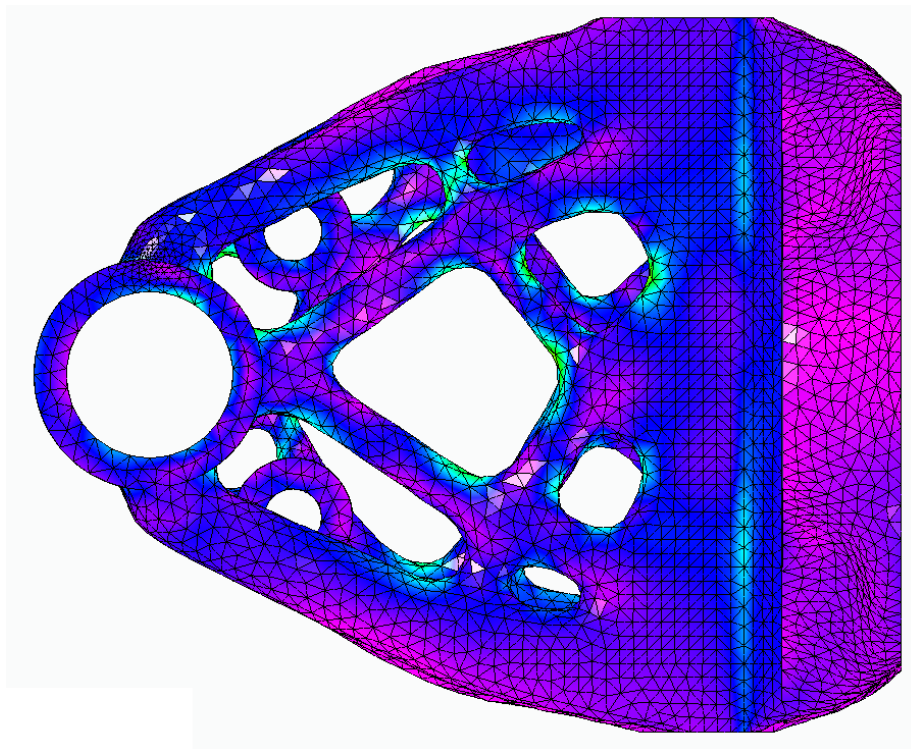


Ilustración 105 Vista derecha de la pieza optimizada resultante

4.6 REFINAR GEOMETRÍA

Finalmente, se puede mejorar la geometría de la pieza refinándola, utilizando técnicas de diseño generativo para crear una forma más efectiva y funcional.

Antes de todo, modificaremos la pieza resultante para que tenga el soporte superior más estable, crearemos un sólido por secciones para crear un puente entre los soportes laterales.

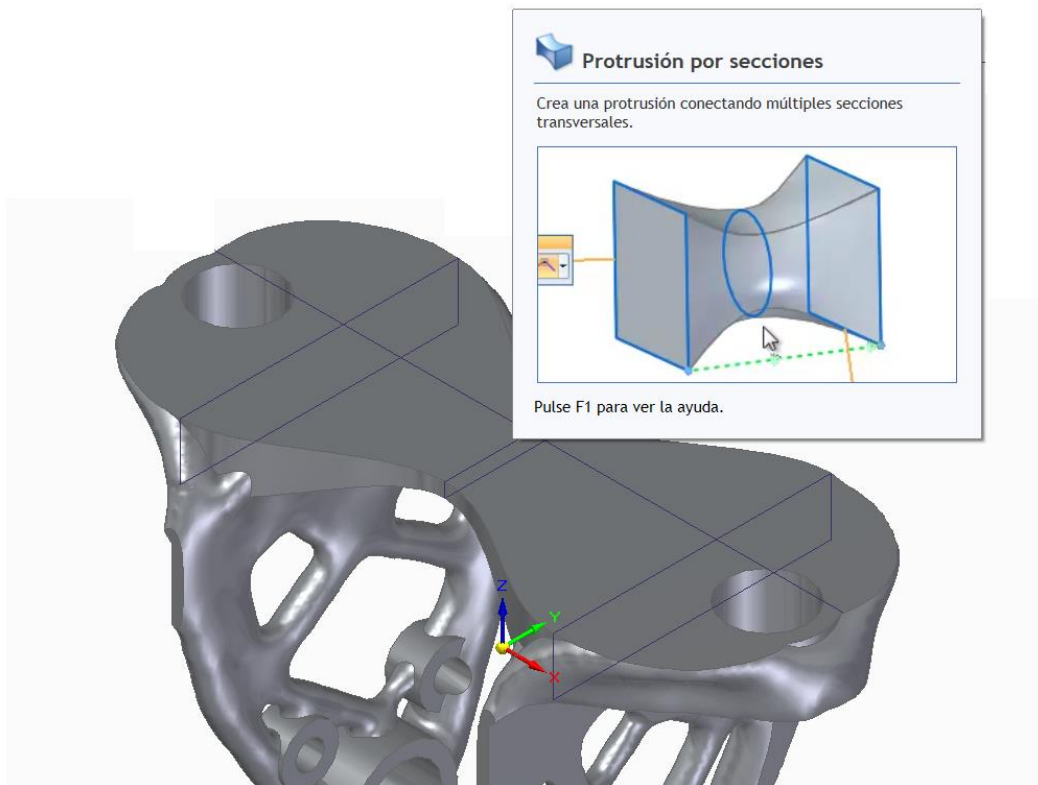


Ilustración 107 Detalle de la protrusión por secciones realizada en el soporte superior

Para llevar a cabo este proceso, utilizaremos el programa de trabajo "Altair Inspire", que incluye la herramienta de PolyNurbs, una técnica de modelado 3D que utiliza superficies de subdivisión poligonal para crear objetos con formas suaves y detalladas en la industria del diseño.

Para ello, haremos uso de la herramienta de “Ajustar”, con la cual el propio programa, consigue dejar la pieza pulida sin zonas rugosas y bien restringida.



Ilustración 108 Detalle de la herramienta de Ajustar en Altair Inspire

Tras ejecutar esta herramienta, obtenemos la pieza refinada y lista para volver a simular y comprobar que sigue sin romper.

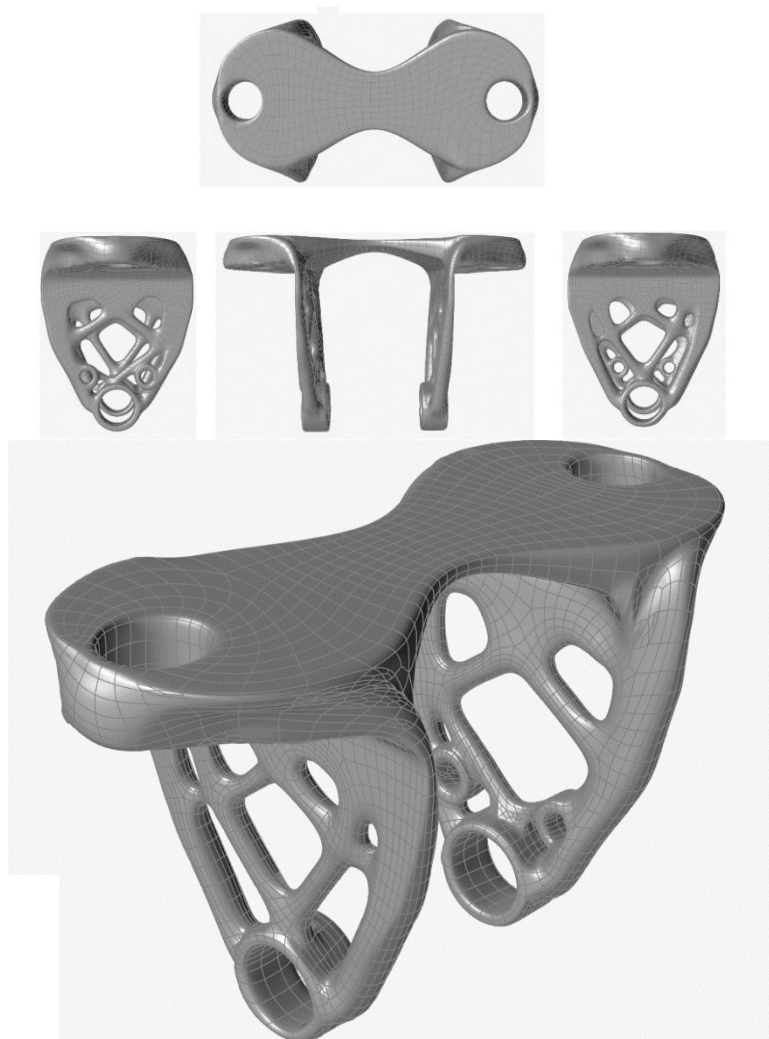


Ilustración 109 Vistas de la pieza óptima refinada

A continuación, debido al factor de haber refinado la pieza, los agujeros de la pieza también han sido modificados, por lo cual, es necesario volver al programa de Solid Edge y volver a realizar los agujeros de tal forma que sigan con las medidas propuestas en el apartado 3.1 Propuesta de la geometría.

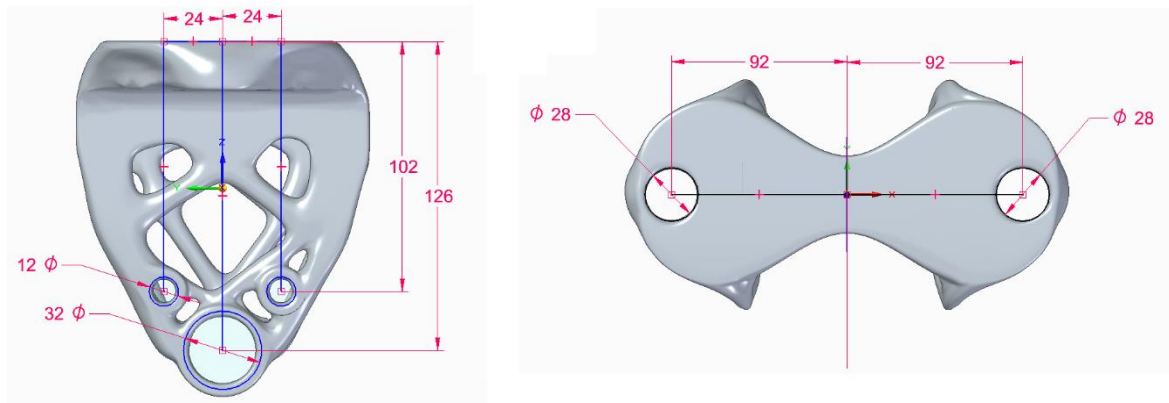


Ilustración 110 Detalle del reajuste de los agujeros de la pieza

Por otro lado, como ahora la parte inferior del techo es irregular, para que las arandelas que soportan la pieza desde el techo, es necesario hacerles un agujero recto para también en la simulación poder ponérselo a la pieza como restricción.

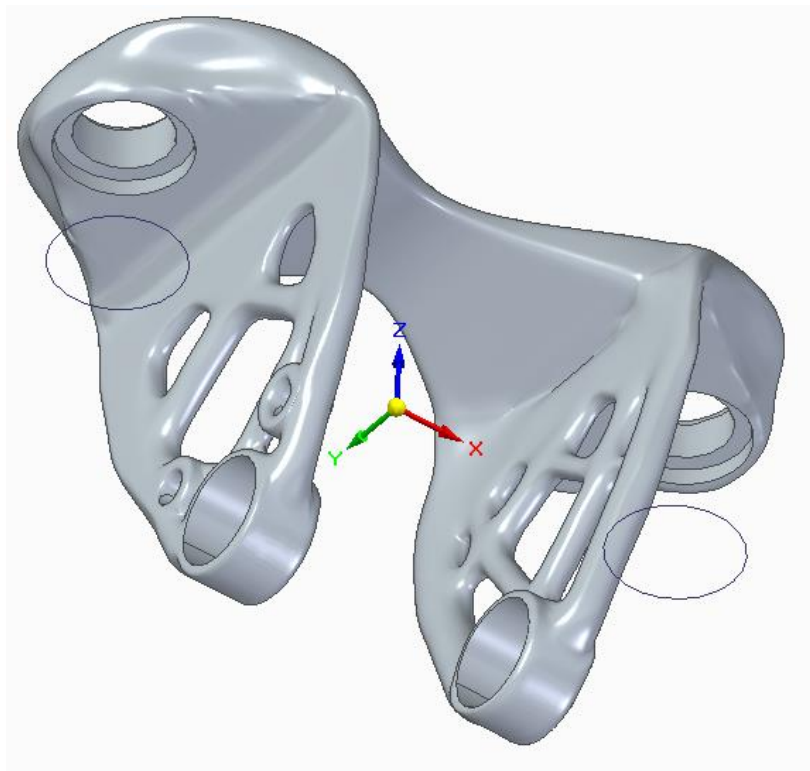


Ilustración 111 Detalle del ajuste de los agujeros para las arandelas

4.7 VERIFICAR RENDIMIENTO CON FEM

Este proceso, como bien se ha introducido anteriormente en el estado de la cuestión del proyecto, consiste en dividir la pieza en elementos finitos (en este caso tetraédricos) para poder realizar cálculos en cada sección.

Para ello, volvemos a dividir las superficies de los agujeros de los soportes para aplicar en la parte inferior las fuerzas y el cojinete, realizamos el desplazamiento del borde para los agujeros del soporte superior para las arandelas e incluimos todas las restricciones y fuerzas determinadas en el apartado 4.5.2.

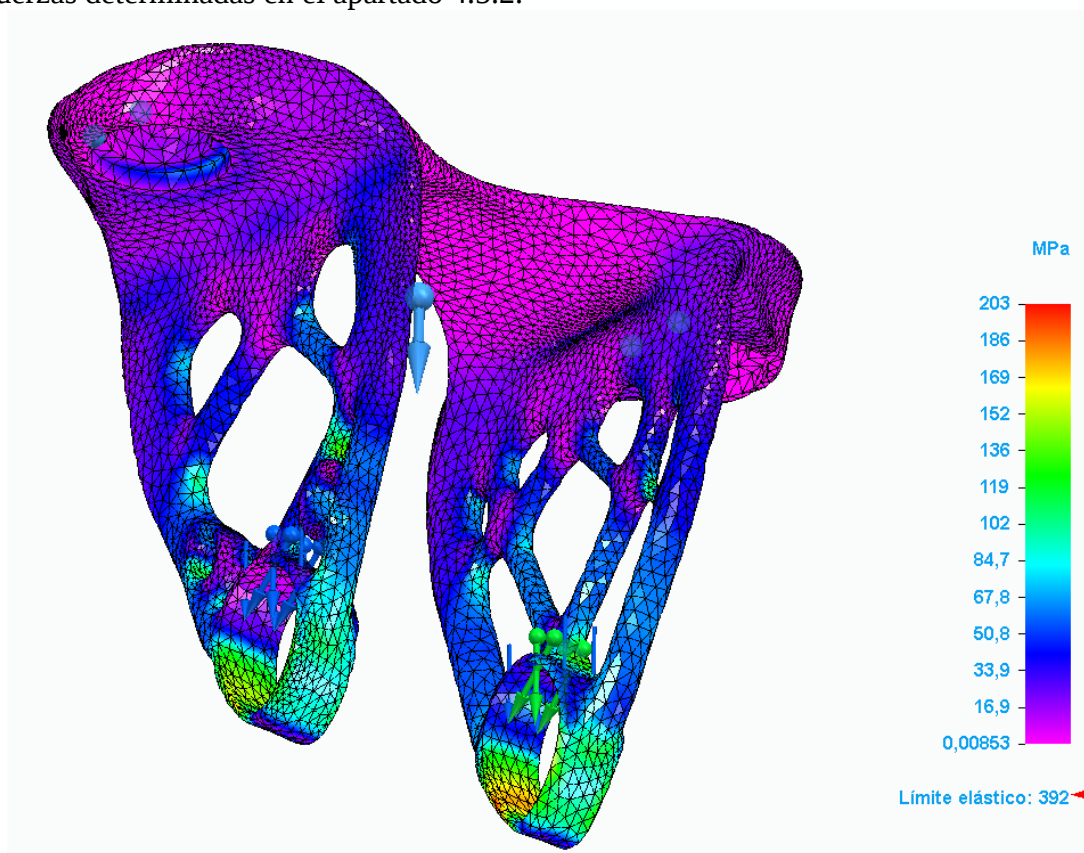


Ilustración 112 Simulación FEM de la pieza optimizada y refinada final

Por lo tanto, podemos ver tras esta última ilustración que la pieza optimizada y refinada final no rompería con el estado de cargas y tras ser refinada.

También es importante comentar que la tensión máxima es menor que la máxima obtenida en la última iteración, esto se debe a que hemos incrementado el tamaño del soporte superior en el refinamiento.

5. FABRICACIÓN DEL PROTOTIPO POR FA

Como ya mencionamos brevemente en el estado de la cuestión de este proyecto, la FA es un nuevo método de producción industrial que consiste en crear objetos a partir de materiales como plástico, metal o cerámica y luego colocárselos capa a capa. Esta técnica permite crear objetos complejos que serían mucho más difíciles de fabricar de manera tradicional.

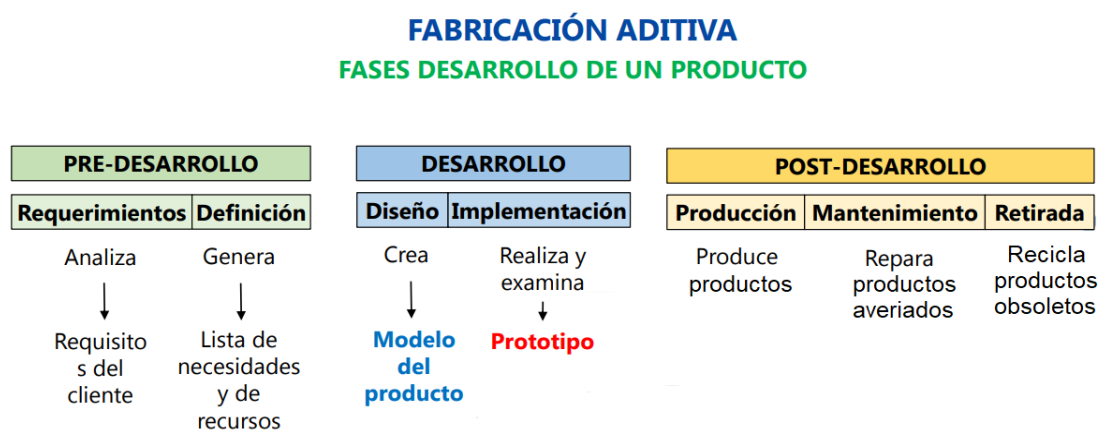


Ilustración 113 Fases de desarrollo de un producto

Fuente: Diapositiva Temario Tecnologías de Fabricación Comillas ICAI

Como podemos ver en el ciclo anterior sobre el desarrollo de un producto, se empieza por un análisis de requisitos y a partir de ahí, se crea diseñando una idea que cumpla con todas las restricciones y necesidades necesarias. Esto último es lo que hemos conseguido con nuestro soporte de polea en este proyecto; y, como vemos siguiendo el ciclo, el siguiente paso es realizar los prototipos, los cuales van a ser dos: soporte de la polea sin optimizar y soporte optimizado y refinado.

Hay tres partes principales del proceso de FA que van a ser analizados:

- Metodología de trabajo FA
- Tecnologías de Impresión
- Costes de Impresión

5.1 METODOLOGÍA DE TRABAJO FA

Como ciclo de metodología de FA tenemos el mostrado en la Ilustración inferior, en el cual, dentro del apartado de software I3D está también compuesto por el laminado de capas, el espesor de la pared, el laminado interior y material de soporte.

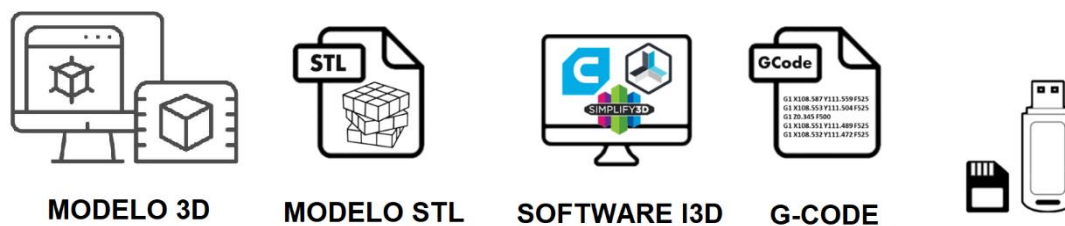


Ilustración 114 Ciclo de I3D

Fuente propia

5.1.1 FORMATO .STL

Una vez ya tenemos nuestra pieza en 3D lista para iniciar el proceso de FA, pasamos al punto en el cual guardamos en formato “.stl”.

Este formato tiene distintas opciones de descarga y, para que obtengamos un fichero que tenga un mallado optimo, hemos de descargarlo con unas ciertas características: tolerancia de cuerda de 0.01 y 3 de tolerancia angular (grados de libertad). Esto se ve claramente descrito en la Ilustración posterior.

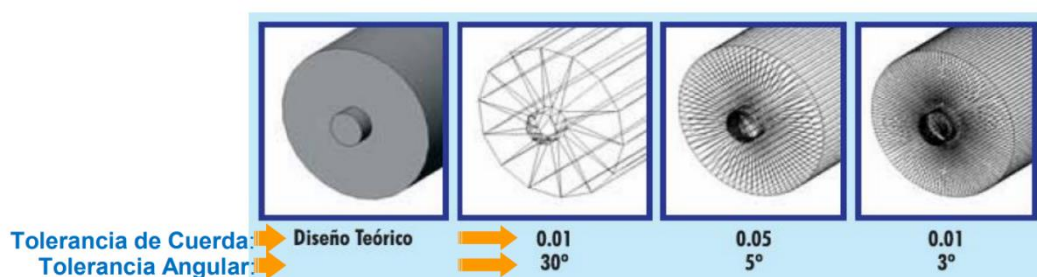


Ilustración 115 Detalle de la tolerancia de cuerda y angular en un fichero .stl

Fuente: Diapositiva Temario Tecnologías de Fabricación Comillas ICAI

5.1.2 SOFTWARE I3D

Como siguiente paso tenemos que analizar las características que pondremos a la impresión de nuestros prototipos una vez entramos en el software a utilizar de FA. En nuestro caso, haremos uso tanto de “Cura” como de “Simplify3D”.

Una de las cosas para tener en cuenta dentro de este software es el **laminado de capas**, el cual, dependiendo del grosor de estas, la pieza final impresa puede ser mas precisa pero al mismo tiempo tener mayor tiempo de impresión.

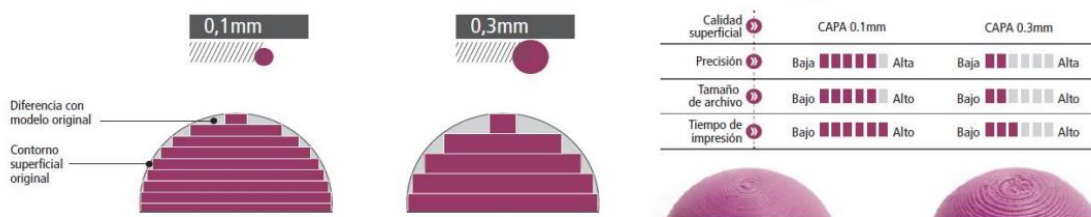


Ilustración 116 Detalle de cómo afecta el tamaño de capa

Fuente: Diapositiva Temario Tecnologías de Fabricación Comillas ICAI

Como siguiente factor a mencionar tenemos **el relleno del interior de la pieza**, del cual existen distintos patrones y porcentajes para elegir para nuestro prototipo (los propuestos en la Ilustración posterior), pero como se trata de una pieza que no va a ejercer ninguna funcionalidad, ya que se trata de un prototipo, no hace falta que el relleno de la pieza sea el 100% sino que más bien sería adecuado un 10%.



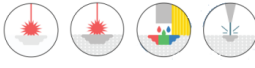
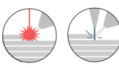
Ilustración 117 Patrones y porcentajes de I3D

Fuente: Diapositiva Temario Tecnologías de Fabricación Comillas ICAI

Por último, se ha de destacar la idea de los **soportes en la FA**, que, dependiendo de la orientación estratégica de la pieza, se puede reducir significativamente los costos de material y mano de obra al eliminarlo más tarde cuando esta ya este impresa. Por esta misma razón, las piezas que sean impresas por laminado serán colocadas con el apoyo superior tocando el suelo de la impresora que se utilice.

5.2 TECNOLOGÍAS DE IMPRESIÓN

Hay muchos tipos de FA, entre los que podemos destacar:

- ☐ **Fotopolimerización en tanque o cuba** (Vat Polymerization) / **SLA – DLP – CDLP** 
- ☐ **Proyección de material** (Material Jetting) / **MJ – NPJ – DOD** 
- ☐ **Proyección de aglutinante** (Binder Jetting) / **BJ** 
- ☐ **Fusión de lecho de polvo** (Powder Bed Fusion) / **SLS – EBM – MJF – SLM – DMLS** 
- ☐ **Extrusión de material** (Material Extrusion) / **FDM** 
- ☐ **Deposición de energía focalizada** (Direct Energy Deposition) / **LENS – EBAM** 

De las cuales, nos vamos a interesar especialmente en analizar los siguientes:

- ☐ **Fusión de lecho de polvo** (Powder Bed Fusion) / **SLS – EBM – MJF – SLM – DMLS** 
- ☐ **Extrusión de material** (Material Extrusion) / **FDM** 

La fusión de lecho de polvo consiste en una tecnología de FA en el cual se usa como material el polvo, en específico, poliamida 11. Este último se fusiona por patrones capa por capa mediante calor selectivo haciendo que las partículas de polvo de ciertas zonas se vayan fusionando, creando así poco a poco la pieza final. Este proceso se lleva a cabo hasta que se deja impresa la pieza completa, el polvo que no ha sido fundido queda alrededor de la pieza y actúa como soporte de esta, por esto último añadido, esta tecnología no usa soportes como es en el caso de la extrusión de material.

Utilizaremos esta tecnología para imprimir el prototipo del *soporte optimizado y refinado*, haciendo uso de la maquina “*HP MJF*”.

La extrusión de material es una tecnología de FA en la que se usan materiales termoplásticos como el PLA o el ABS. Estos materiales son calentados hasta el punto de fusión y son expulsados por la boquilla de extrusión, colocándose capa por capa sobre una plataforma de construcción.

Utilizaremos esta tecnología para imprimir el prototipo del *soporte sin optimizar*, haciendo uso de la maquina “*Dynamical Tools DT600+*”

5.3 IMPRESIÓN DE PROTOTIPOS

5.3.1 SOPORTE SIN OPTIMIZAR

Usando la herramienta de software de Cura, comenzaremos con la orientación de esta pieza de tal forma que usemos la menor cantidad de material de soporte posible:

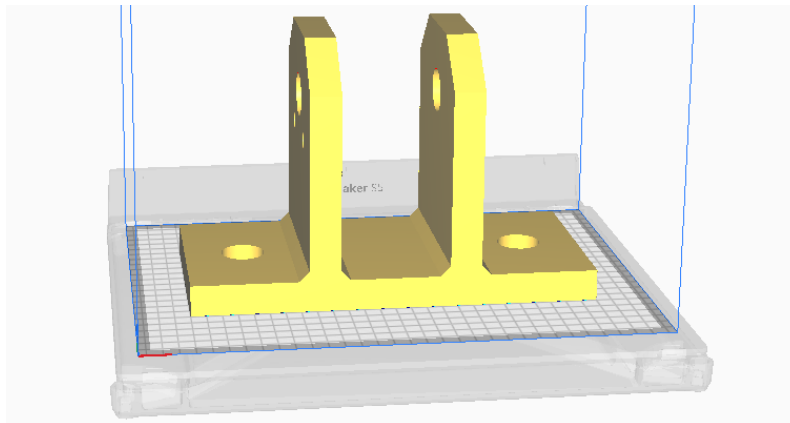


Ilustración 118 Detalle de la orientación de la pieza en Cura

El material que se va a usar para la impresión de esta pieza va a ser el PLA Premium, el cual, se recomienda que la base de impresión esté a 40-50°C aproximadamente y que la temperatura del extrusor tiene esté entre los 190 y 210°C. [26]

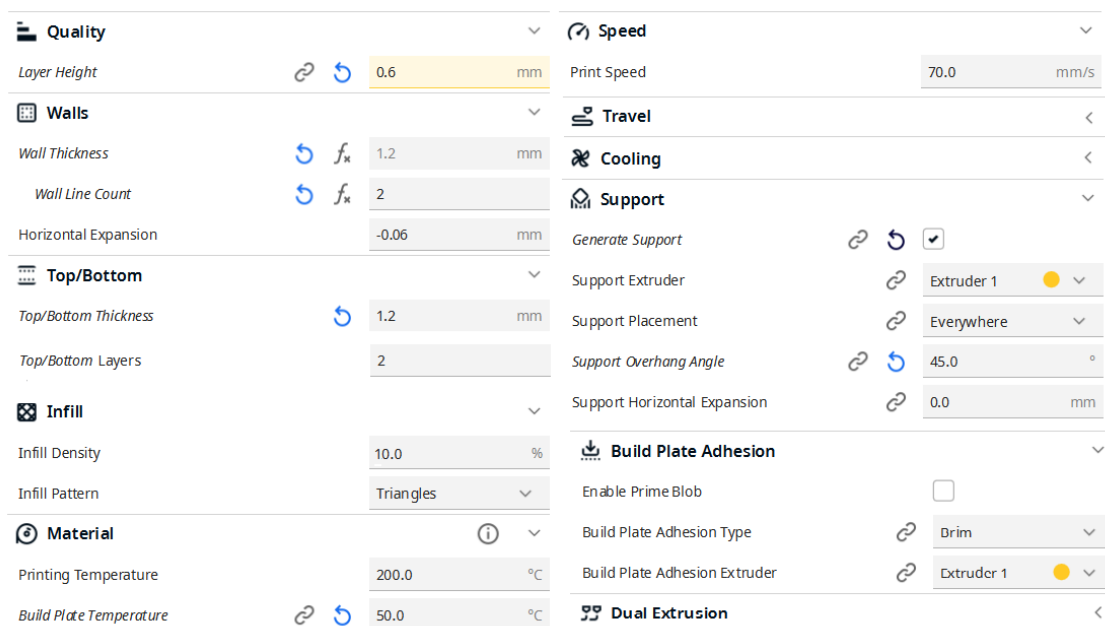


Ilustración 119 Ajustes de impresión de la pieza en Cura

5.3.2 SOPORTE OPTIMIZADO Y REFINADO

Aunque para la impresión de esta pieza se hará uso del programa de *Autodesk Netfabb*, es importante hacer la comparativa de si usásemos PLA y la máquina de extrusión de FDM también para esta pieza, donde podremos observar las razones principales por las cuales no lo imprimimos de esta última forma.

Usando la herramienta de software de Cura, comenzaremos con la orientación de esta pieza de tal forma que usemos la menor cantidad de material de soporte posible:

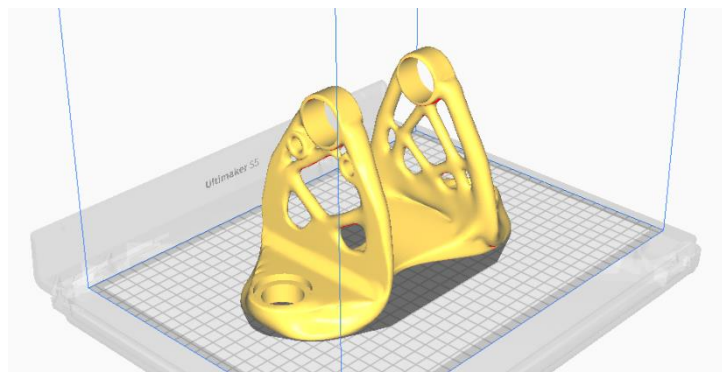


Ilustración 120 Detalle de la orientación de la pieza en Cura

El material que se va a usar para la impresión de esta pieza va a ser la poliamida 11, la cual tiene una temperatura de fusión entorno a los 200°. [26]

Quality		Speed	
Layer Height	0.6 mm	Print Speed	70.0 mm/s
Walls		Travel	
Wall Thickness	1.2 mm	Cooling	
Wall Line Count	2	Support	
Horizontal Expansion	-0.06 mm	Generate Support	☒
Top/Bottom		Support Extruder	Extruder 1
Top/Bottom Thickness	1.2 mm	Support Placement	Everywhere
Top/Bottom Layers	2	Support Overhang Angle	45.0 °
Infill		Support Horizontal Expansion	0.0 mm
Infill Density	10.0 %	Build Plate Adhesion	
Infill Pattern	Triangles	Enable Prime Blob	☐
Material		Build Plate Adhesion Type	Drim
Printing Temperature	200.0 °C	Build Plate Adhesion Extruder	Extruder 1
Build Plate Temperature	50.0 °C	Dual Extrusion	

Ilustración 121 Ajustes de impresión de la pieza en Cura

Con estos ajustes, la pieza optimizada y refinada quedaría con mucha cantidad de soporte que más tarde en el laboratorio con la pieza impresa requeriría muchísima mano de obra e incluso nos arriesgaríamos a que la pieza pueda romperse por cualquiera de los nervios de los soportes laterales.

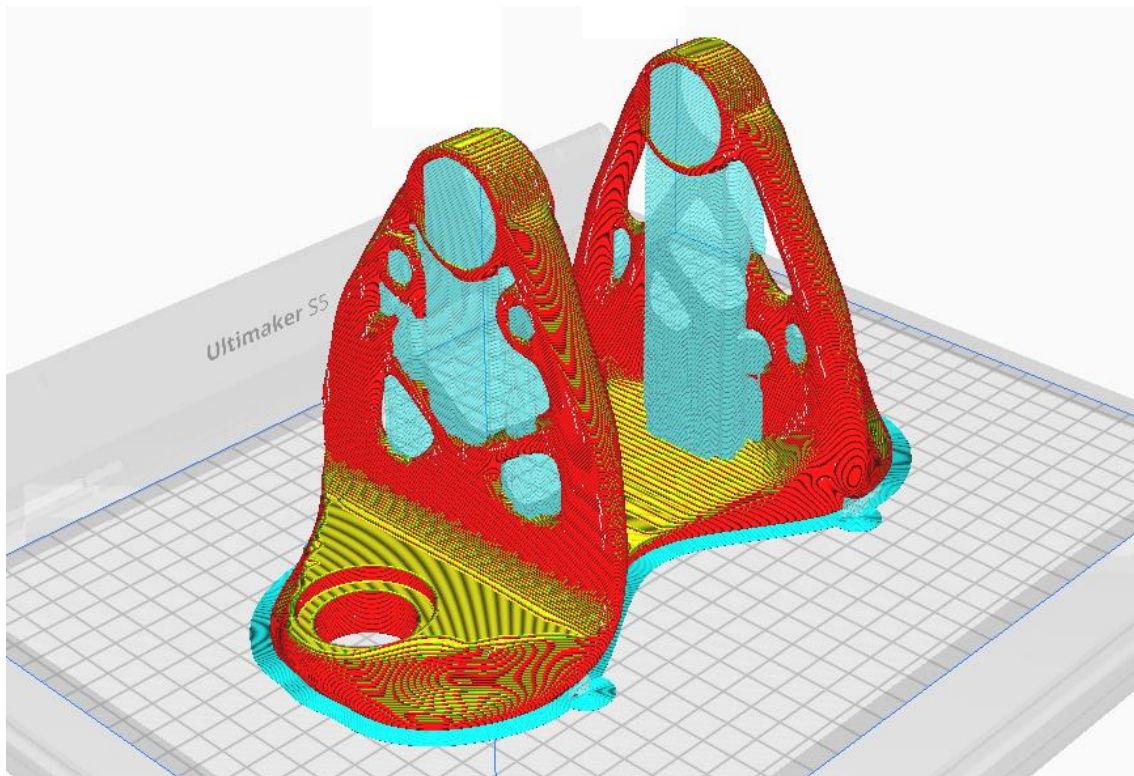


Ilustración 122 Detalle de la cantidad de soporte que requeriría la pieza

Por lo tanto, como bien se ha mencionado antes, la pieza será impresa a partir de fusión de lecho de polvo, haciendo uso del software de Autodesk Netfabb.

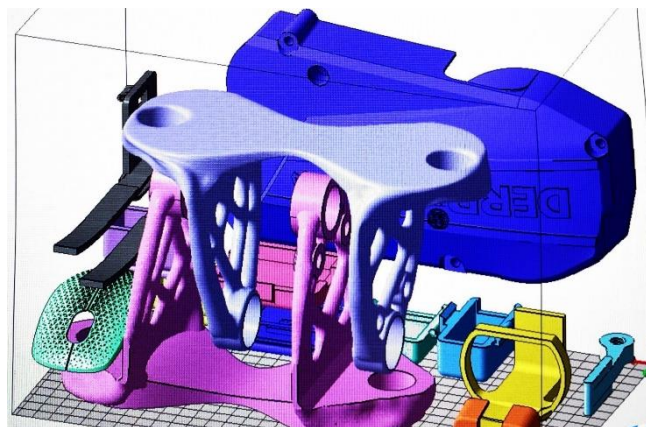


Ilustración 123 Detalle de la pieza dentro de la zona de impresión en Netfabb

En las ilustraciones posteriores podemos ver las impresiones de las piezas:

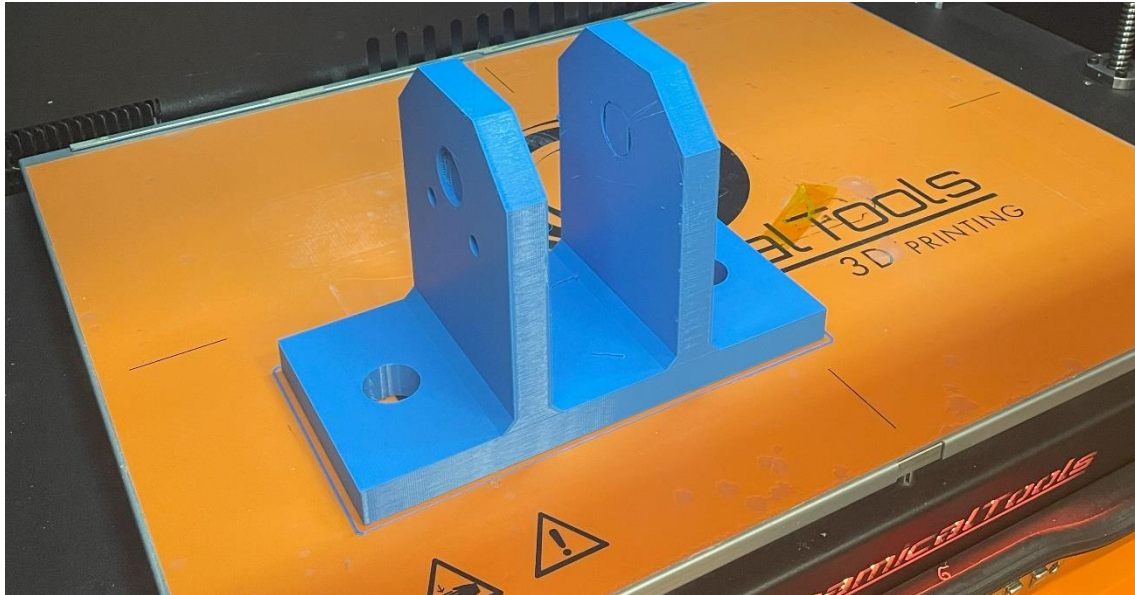


Ilustración 124 Soporte sin optimizar impreso



Ilustración 125 Soportes optimizados recién salidos de la impresora HP MJP



Ilustración 127 Soporte optimizado refinado tras ser limpiado

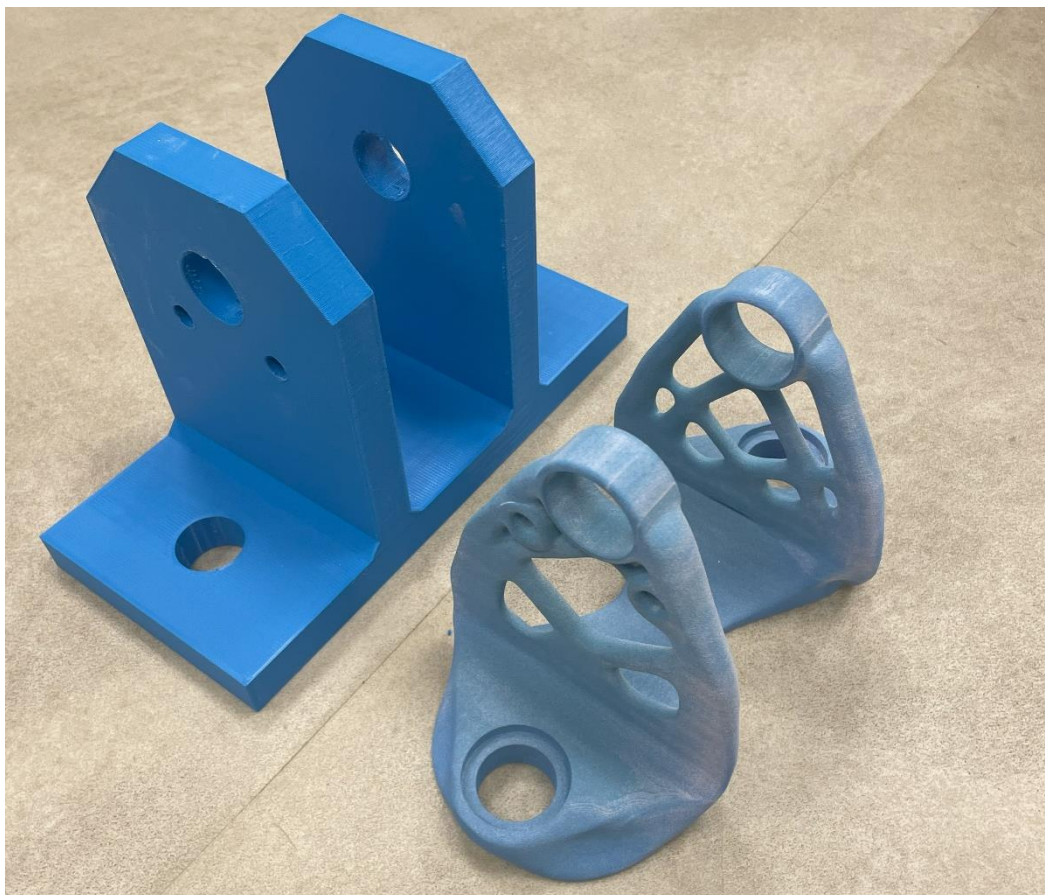


Ilustración 126 Comparativa entre ambos soportes

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

6.1 PRESUPUESTOS ECONÓMICOS

Para comenzar realizaremos los costes de prototipado, que son dos: soporte sin optimizar utilizando PLA con la máquina DT y soporte optimizado refinado con POLVO con la maquina HP MJP.

6.1.1 COSTES DE PROTOTIPADO

Es esencial utilizar herramientas de análisis precisas que nos permitan identificar costos reales, incluidos los costos ocultos que pueden surgir durante la fabricación, como almacenamiento, deterioro, manejo de pedidos, logística y el valor de los productos almacenados, para tomar decisiones informadas sobre la producción. Al calcular el beneficio que obtendremos y tomar decisiones adecuadas sobre qué piezas producir, debemos tener en cuenta estos costos ocultos.

La tecnología de impresión 3D (I3D) tiene un costo inicial de preparación más bajo y permite un mayor tiempo para generar ingresos a través de la fabricación. A pesar de que la inversión inicial puede ser elevada, la inversión se recupera rápidamente. Las curvas de costos generales para la impresión 3D y la fabricación convencional se muestran en la Ilustración posterior.

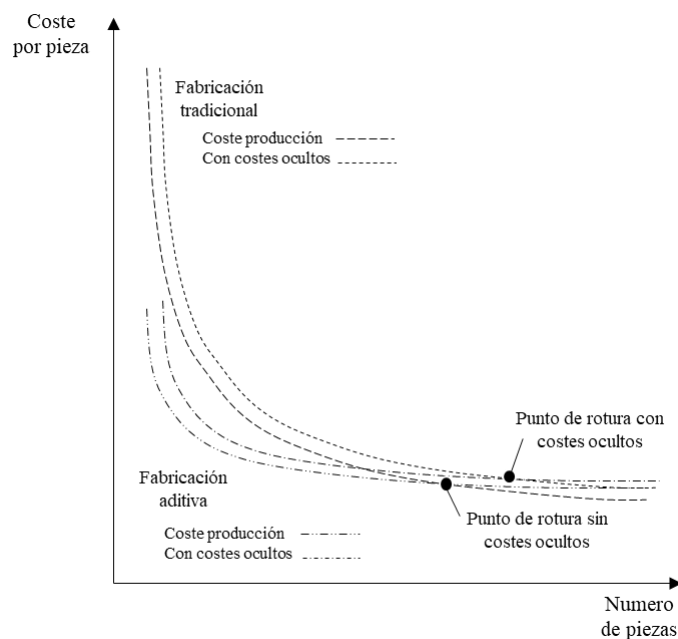


Ilustración 128 Comparativa entre tipos de fabricaciones

6.1.1.1 SOPORTE SIN OPTIMIZAR

ANÁLISIS DE COSTES PARA PROTOTIPADO DE PIEZAS EN IMPRESORA 3D -FDM		
DATOS AMORTIZACIÓN MÁQUINA		
Precio máquina (€)	50,000	
Coste mantenimiento anual (€)	2,500	
Años de amortización	4	
Amortización (h/año) - 223 días-año / 12 horas-día	2000	
Precio Hora máquina-amortización (€/h)	7.19	
Precio Hora venta-público (€/h)	7.19	
DATOS COSTE MATERIAL		
Coste material modelo: (€/kg)	23.08	
Coste material soporte: (€/kg)	23.08	
DATOS COSTE TÉCNICO ANALISTA		
Coste técnico analista del modelo - inc. desmoldeo (€/h)	30	
CONCEPTOS PRESUPUESTADOS	Opción Solido	Costes parciales
Material modelo (g)	392.63	9.06 €/ud
Soporte modelo (g)	0.00	0.00 €/ud
Tiempo modelo (h)	14.30	102.78 €/ud
Tiempo técnico-analista (h)	0.25	7.50 €
Cantidad de piezas	1.00	
Coste unitario (€) en ICAI + IVA	119.34 €/Ud	
Coste total (€) en ICAI + IVA	119.34 €	

6.1.1.2 SOPORTE OPTIMIZADO Y REFINADO

ANÁLISIS DE COSTES PARA PROTOTIPADO DE PIEZAS EN IMPRESORA 3D -HP 580 MJP		
DATOS AMORTIZACIÓN MÁQUINA		
Precio máquina (€)	80,000	
Coste mantenimiento anual (€)	2,000	
Años de amortización	5	
Días impresión/año	48	
Impresiones/día	1	
Precio impresión (€)	375.00	
Precio Impresión venta-público (€)	375.00	
DATOS COSTE MATERIAL		
Coste material: (€/kg)	100.00	
Coste material: (€/cc)	0.11	
Volumen Total (cc)	15634.75	
Densidad de Empaquetado	7.00%	
DATOS COSTE TÉCNICO ANALISTA		
Coste técnico analista del modelo - inc. limpieza (€/h)	20	
CONCEPTOS PRESUPUESTADOS	Opción Solido	Costes parciales
Material modelo (cc)	349.02	36.74 €/ud
Impresión	-	119.59 €/ud
Tiempo técnico-analista (h)	0.20	4.00 €/ud
Tiempo Limpieza (h)	0.20	4.00 €/ud
Cantidad de piezas	1.00	
Coste unitario (€) en ICAI + IVA	164.33 €/Ud	
Coste total (€) en ICAI + IVA	164.33 €	

6.1.2 COSTE DE IMPRESIÓN EN ACERO

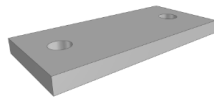
En el apartado anterior podemos ver como los costes que hemos calculado son de piezas que se han llevado a impresión. Sin embargo, en este apartado, solo se calculará el presupuesto de realizar la pieza final del proyecto con Acero F1150.

Para llevar a cabo este presupuesto se va a hacer uso de distintas empresas que ofrecen servicios de FA en línea para saber cuánto costaría fabricar algo. Estos precios son solo una estimación porque los costos reales pueden variar según la forma en que se trabaje internamente y otros gastos ocultos.

6.1.2.1 SOPORTE SIN OPTIMIMZAR

Para esta pieza original, pediremos un presupuesto de cada parte (soporte derecho, soporte izquierdo y soporte superior) por mecanizado (CNC) y le añadiríamos el coste de las soldaduras.

Mediante el uso de la empresa en línea de <https://www.hubs.com/> realizamos el presupuesto del mecanizado de cada pieza por separado.



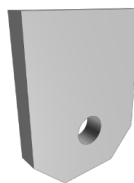
[View DFM analysis](#)

SOPORTE TECHO.stp

Price per part	€172.23
Quantity	1
Total	€172.23

Technology	CNC machining
Material	Mild steel 1045 1.0503 C45 EN8
Finish	As machined (Ra 3.2µm / Ra 126µin)
Color	No color
Part markings	No
General tolerance	ISO 2768 Medium
Tightest linear tolerance	Within general tolerance
Fits	No
Has threads	No
Internal corners	2 mm radii
Technical drawing	—
Tool life	20000
Custom requirements	—

Dimensions 260 × 120 × 20 mm



[View DFM analysis](#)

SOPORTE DERECHO.stp

Price per part	€138.77
Quantity	1
Total	€138.77

Technology	CNC machining
Material	Mild steel 1045 1.0503 C45 EN8
Finish	As machined (Ra 3.2µm / Ra 126µin)
Color	No color
Part markings	No
General tolerance	ISO 2768 Medium
Tightest linear tolerance	Within general tolerance
Fits	No
Has threads	No
Internal corners	2 mm radii
Technical drawing	—
Tool life	20000
Custom requirements	—

Dimensions 120 × 20 × 150 mm



[View DFM analysis](#)

SOPORTE IZQUIERDO.stp

Price per part	€150.89
Quantity	1
Total	€150.89

Technology	CNC machining
Material	Mild steel 1045 1.0503 C45 EN8
Finish	As machined (Ra 3.2µm / Ra 126µin)
Color	No color
Part markings	No
General tolerance	ISO 2768 Medium
Tightest linear tolerance	Within general tolerance
Fits	No
Has threads	No
Internal corners	2 mm radii
Technical drawing	—
Tool life	20000
Custom requirements	—

Dimensions 120 × 20 × 150 mm

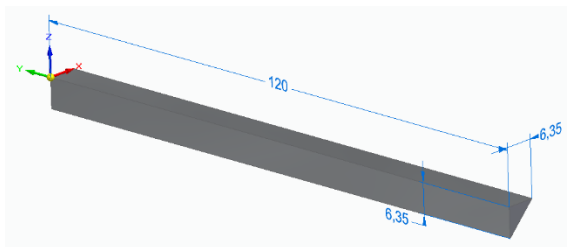
Y a esto hay que sumarle el coste de los cordones de soldadura. Los precios actuales de fabricación industrial son los siguientes:

- Preparación de borde: 40 €/h
- Horas de cordón: 40 €/h
- Material depositado: 40 €/kg

En primer lugar hay que tener en cuenta la preparación de los bordes de las zonas en las que se aplican los cordones siendo su precio de 40 €/h y si aproximadamente se tarda en preparar 30 minutos por borde, se tardarían como mínimo 2 horas en preparar todas las zonas de los cordones de la pieza, a un precio de 80€.

En segundo lugar, los cordones de por sí, sería colocarlos otros 40 €/h, por lo tanto saldría a otros 80€.

Y, por último, como material de cordón de soldadura, también en torno a 40 €/kg, si analizamos la masa de los cordones, obtenemos el precio final.



$$Vol = \frac{6.35 * 6.35}{2} * 120 = 2419.35 mm^3$$

$$Masa = \rho * Vol = \frac{7.85g}{cm^3} * 241,935 cm^3 = 1.899 kg$$

$$Masa * \frac{Precio}{kg} = 1.899 kg * \frac{40€}{kg} = 75.96€$$

Por lo tanto, todo el conjunto del soporte sin optimizar saldría a una cantidad de:

PRESUPUESTO FABRICACIÓN SOPORTE – MHCN + SOLDADURA		
ELEMENTO	TECNOLOGÍA	PRECIO
SOPORTE DERECHO	MHCN	138.77 €
SOPORTE IZQUIERDO	MHCN	150.89 €
SOPORTE SUPERIOR	MHCN	172.23 €
SOLDADURA	MIG/MAG	235.96 €
TOTAL		697.85 €

6.1.2.2 SOPORTE OPTIMIZADO Y REFINADO

ANALISIS DE COSTES PARA PROTOTIPADO DE PIEZAS EN I3D DMLS		
DATOS AMORTIZACIÓN MÁQUINA		
Precio máquina (€)	250,000	
Coste mantenimiento anual (€)	12,500	
Años de amortización	4	
Días impresión/año	100	
Hras de uso/día	12	
Precio impresión (€)	62.50	
Precio Impresión venta-público (€)	62.50	
DATOS COSTE MATERIAL		
Coste material: (€/kg)	62.00	
Coste material: (€/cc)	0.07	
Volumen Total (cc)	15634.75	
Densidad de Empaquetado	7.00%	
DATOS COSTE TÉCNICO ANALISTA		
Coste técnico analista del modelo - inc. limpieza (€/h)	40	
CONCEPTOS PRESUPUESTADOS	Opción Solido	Costes parciales
Material modelo (cc)	349.02	22.78 €/ud
Impresión (horas)	2.79	174.51 €/ud
Tiempo técnico-analista (h)	0.20	8.00 €/ud
Tiempo Limpieza (h)	3.00	120.00 €/ud
Cantidad de piezas	1.00	
Coste unitario (€) en ICAI + IVA	325.29 €/Ud	
Coste total (€) en ICAI + IVA	325.29 €	

6.2 ANÁLISIS Y COMPARATIVA

Los resultados obtenidos antes y después de la optimización se compararon para evaluar el rendimiento y la eficiencia de la optimización topológica de la pieza. Antes de la optimización, el componente inicial tenía un costo de producción de 697.85 €. No obstante, al implementar la optimización topológica, se logró una reducción significativa de los costos, alcanzando un valor de 325.29 €. Esto demuestra una mejora significativa en la eficiencia económica del diseño y representa una diferencia de precio de 372.56 €.

Por otro lado también podemos analizar otros factores de rendimiento además de la reducción de costos. Antes de la optimización, el componente original tenía un volumen de 1265,688024 cm³. Después de usar la optimización topológica, el volumen se redujo a 349,007647 cm³ sin perder la resistencia y la rigidez necesarias. Esto indica una disminución del 72.42% en el volumen de la estructura. En la figura inferior podemos observar en detalle la comparativa entre las dos piezas.



Ilustración 129 Comparativa entre ambas piezas

Estos resultados demuestran claramente que la optimización topológica es un método exitoso para mejorar el rendimiento económico y estructural de la pieza. La optimización topológica beneficia el diseño de la pieza al reducir el peso y los costos de fabricación sin sacrificar la resistencia y la rigidez.

7. CONCLUSIONES

Nos hemos centrado en la optimización de la topología de una pieza para mejorar su rendimiento y eficiencia a lo largo de este proyecto. La siguiente lista contiene las principales conclusiones que sacamos de este.

- La aplicación de la OT ha permitido reducir significativamente los costos de fabricación, con una diferencia de precio de 372.56 €.
- La aplicación de la OT ha permitido disminuir el peso total de la estructura sin sacrificar su resistencia y rigidez.
- La aplicación de la OT ha demostrado su capacidad para aumentar la eficiencia de una pieza.
- La OT ha sido capaz de redistribuir el material de manera más eficiente, eliminando material innecesario y concentrando la masa donde es más necesario.

He adquirido un amplio conocimiento y habilidades en el uso de Solid Edge durante el desarrollo de este proyecto, lo que me ha permitido familiarizarse con este programa de diseño. Los siguientes son algunos de los conocimientos y éxitos adquiridos:

- Dominio de herramientas y características que ofrece Solid Edge a lo largo del proyecto. Entre otras habilidades, he aprendido a utilizar comandos de modelado, crear ensamblajes, crear dibujos técnicos y realizar simulaciones.
- Diseño avanzado: He aprendido a aplicar restricciones y relaciones geométricas, crear modelos 3D complejos y realizar modificaciones paramétricas de manera efectiva.
- Simulaciones y diseño generativo: He aprendido a aplicar cargas, definir materiales, hacer análisis de esfuerzos y evaluar la resistencia y el rendimiento de los diseños durante todo el proyecto, así como llevar a cabo el proceso de un estudio de diseño generativo para poder optimizar la pieza del proyecto

Por otro lado, también cabe destacar el aprendizaje sobre los fundamentos de la FA, como los diversos procesos de fabricación, los materiales utilizados y las consideraciones de diseño, así como el aprendizaje de uso de la maquinaria necesaria de impresión de las piezas.

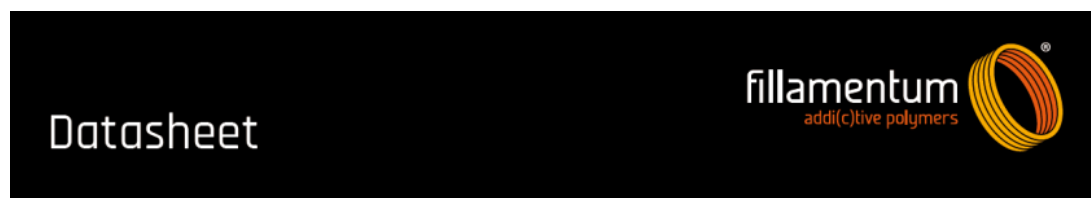
8. REFERENCIAS

- [1] C. K. Mozumder, «TOPOMETRY OPTIMIZATION OF SHEET METAL STRUCTURES FOR CRASHWORTHINESS DESIGN USING HYBRID CELLULAR AUTOMATA». [En línea]. Disponible en:
https://www.researchgate.net/publication/253811480_Topometry_Optimization_of_Sheet_Metal_Structures_for_Crashworthiness_Design_Using_Hybrid_Cellular_Automata
- [2] «CATEC. Optimización topológica.» [En línea]. Disponible en:
<http://www.catec.aero/es/materiales-y-procesos/1%C3%ADnea-de-investigaci%C3%B3n/optimizaci%C3%B3n-topol%C3%B3gica#:~:text=La%20optimizaci%C3%B3n%20topol%C3%B3gica%20es%20una,funcionalidades%20mec%C3%A1nicas%20del%20componente%20objetivo.>
- [3] «Green Finder Bike». https://www.greenfinder.de/e-bikes/model/?tx_gfproducts_gfproductsef%5Bproduct%5D=10630&cHash=029793906fba4cd1a29f90e51bfc8abb
- [4] «EITAINGENIEROS. Optimización.» [En línea]. Disponible en:
<https://eitaingenieros.com/optimizacion/>
- [5] M. Zahera, *LA FABRICACIÓN ADITIVA, TECNOLOGÍA AVANZADA PARA EL DISEÑO Y DESARROLLO DE PRODUCTOS*. Valencia: AEIPRO, 2012. [En línea]. Disponible en:
http://dspace.aepro.com/xmlui/bitstream/handle/123456789/1283/CIIP12_2088_2098.pdf
- [6] «Rodamientos y engranajes en 3D». <https://www.youtube.com/watch?v=jNnbUqPe-N4>
- [7] «BLOQUETECH. Diseño generativo.» [En línea]. Disponible en:
<https://www.bloquotech.com/el-diseno-generativo/>
- [8] «AUTODESK. Diseño generativo.» [En línea]. Disponible en:
<https://redshift.autodesk.es/disenogenerativo/>
- [9] «Onformative en Campus Party de Berlín 2012». https://vimeo.com/48858267?embedded=true&source=vimeo_logo&owner=4009708
- [10] R. Velázquez Pérez y P. Molina-Siles, «ESTUDIO DE LA APLICACIÓN DEL DISEÑO GENERATIVO AL DISEÑO CONCEPTUAL ARQUITECTÓNICO». 2015. [En línea]. Disponible en:
<https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/54972/VELASCO%20-%20EGA-F0066%20Estudio%20de%20la%20aplicaci%C3%B3n%20del%20dise%C3%B1o%20generativo%20al%20dise%C3%B1o%20conceptual%20arquitect....pdf?sequence=3>
- [11] U. Roncoroni, *Manual de diseño generativo*, 1a ed. Lima: Universidad de Lima. Fondo Editorial, 2015.
- [12] L. García Menéndez, «Diseño generativo: el estado del arte», *Técnica Industrial*, vol. 327, n.º 327, pp. 44-49, nov. 2020, doi: 10.23800/10417.

-
- [13] N. J. Villarroel Herrera, «OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA ESTRUCTURAL COMO MÉTODO PARA MEJORAR EL BRAZO FRONTAL INFERIOR DE SUSPENSIÓN DE UN VEHÍCULO CHEVROLET.» [En línea]. Disponible en: https://repositorio.uisek.edu.ec/bitstream/123456789/2754/4/Presentacion_Ing.%20Nelson%20Villarroel.pdf
- [14] «Boeing 777 ALAS». [En línea]. Disponible en: <https://www.xataka.com/vehiculos/disenan-un-ala-mas-ligera-para-un-boeing-777-imitando-las-de-las-aves>
- [15] «KLIO Optimización topológica». [En línea]. Disponible en: <https://www.3dnatives.com/es/klio-design-coche-3d-290620172/#!>
- [16] «KLIO 2». [En línea]. Disponible en: <https://www.kliodesign.com/open-structure-mobility-concept-en>
- [17] «Pistones de Porsche». [En línea]. Disponible en: <https://media.porsche.com/mediakit/porsche-innovationen/en/porsche-innovationen/3d-printed-pistons>
- [18] O. P. L. L., «“Aprendiendo sobre el Método de los Elementos Finitos.” Ingeniería Mecánica, Vol., núm.3, pp.7-13. Otero Pereiro, L. L., (2006).[Consultado: 19 de Febrero de 2023]. ISSN: . Disponible en : <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=225117945001>».
- [19] J. Tomás. Celigüeta Lizarza, *Método de los elementos finitos para análisis estructural*, 4a ed. San Sebastián: Tecnun, 2011.
- [20] O. GONZÁLEZ WOGGE, C. O. GONZÁLEZ MORÁN, y A. LÓPEZ CHAU, *Introducción al método del elemento finito: Solidworks y Matlab. Ideas en Ciencias de la Ingeniería, [S.l.], v. 1, n. 1., 2020.* [En línea]. Disponible en: <https://ideasencienciasingenieria.uaemex.mx/article/view/14589>
- [21] «Eita ingenieros». <https://eitaingenieros.com/optimizacion/>
- [22] «Mallado intelligy.com». <https://intelligy.com/blog/2022/08/01/domina-el-proceso-de-mallado-con-solidworks-simulation/>
- [23] P. Fritzkowski y H. Kaminski, «Non-linear dynamics of a hanging rope», *Lat. Am. j. solids struct.*, vol. 10, n.º 1, pp. 81-90, ene. 2013, doi: 10.1590/S1679-78252013000100008.
- [24] D. M. ALEJANDRO, «Métodos de mallado y algoritmos adaptativos en dos y tres dimensiones para la resolución de problemas electromagnéticos cerrados mediante el método de los elementos finitos.» UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA.ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE TELECOMUNICACIÓN., febrero de 2000. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.upct.es/bitstream/handle/10317/772/adm.pdf?sequence=1>
- [25] J. M. Auria Apilluelo, P. Ibáñez Carabantes, y P. Ubieta Artur, *Dibujo industrial: conjuntos y despieces*, 1a. ed., 2a. reimp. Madrid: Thomson-Paraninfo, 2004.
- [26] «FILAMENT2PRINT. PLA.» https://filament2print.com/es/pla-premium/746-pla-premium-blanco.html#/217-diametro-175_mm/333-formato-bobina_25_kg

9. ANEXOS

Ficha técnica del PLA:



PLA Extrafill

Description:

Fillamentum PLA Extrafill is a material for the FFF (also known as FDM) 3D printing technology.

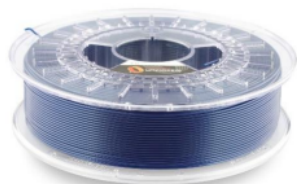
The advantage of this material is that it can be used in 3D printers easily, that it allows a high quality of printing even in tricky details and an excellent lamination of the printed object.

PLA filament is made of natural ingredients and is easily biodegradable by composting. It complies with the requirements for food contact.

The material may be used for production of electrical and electronic equipment. It doesn't contain the restricted substances.

Fillamentum guarantees high precision of filament dimensions within the tolerance of ± 0.05 mm, which is strictly controlled throughout the production.

Printing filaments reported on the marked under the trademark Fillamentum are produced in a wide variety of colours in accordance with the colour charts RAL and Pantone, and also in own unique colour ranges.



Physical properties	Typical Value	Test Method	Test Condition
Material density	1.24 g/cm ³	ASTM D792	
Melt flow index	6 g/10 min	ASTM D1238	210 °C, 2.16 kg
Diameter tolerance	± 0.05 mm		
Weight	750 g of filament (+ 250 g spool)		

Mechanical properties	Typical Value	Test Method	Test Condition
Tensile strength	60 MPa	ASTM D882	at yield
	53 MPa	ASTM D882	at break
Elongation at break	6 %	ASTM D882	
Tensile modulus	3600 MPa	ASTM D882	
Flexural strength	83 MPa	ASTM D790	
Flexural modulus	3800 MPa	ASTM D790	
Izod impact strength	16 J/m	ASTM D256	23 °C, notched

Thermal properties	Typical Value	Test Method	Test Condition
Glass transition temperature	55-60 °C	ASTM D3418	
Heat distortion temperature	55 °C	ASTM E2092	0.45 MPa

Printing properties	Recommended	Notes
Print temperature	190-210 °C	Recommended settings!
Hot pad	50-60 °C	It may differ according to the printer and the object. Try your own settings before printing.
Bed adhesive	Magigoo	

Workability of 3D printing filament is at least 12 months from delivery.

The information was processed with the best knowledge of the manufacturer and it is for information only.

Fillamentum Manufacturing Czech s.r.o.
nam. Miru 1217, 768 24 Hulín
Czech Republic

(+420) 720 060 947
helpdesk@fillamentum.com
www.fillamentum.com

Ficha técnica Poliamida 11:



PA11 Onyx

Superior durability and resistance

High resistance against impacts | Moderate elasticity | Good chemical resistance | Dedicated only for LISA Pro



General information

	Method
Material type	Nylon 11
Granulation	20 - 80 [µm]
Color	Black
Material refreshing ratio ¹	50 [%]
Compatible with	Lisa Pro

Parameters

Tensile Strength	54 [MPa]	PN-EN ISO 37:2007
Flexural Strength	62 [MPa]	PN-EN ISO 178:2011
Elongation at Break	40 [%]	PN-EN ISO 37:2007
Impact resistance at 7,5 [J] (Charpy test / unnotched)	min. 179 [KJ/m ²]	PN-EN ISO 179-1/1eU:2010
Shore hardness in type D scale	74	PN-EN ISO 868:2005
Printout density	0,92 [g/cm ³]	PN-EN ISO 845:2010
Printout water absorption	0,5 [%]	PN-EN ISO 62:2008

Thermal properties

Melting point	201 [°C]	Internal procedure
---------------	----------	--------------------

Applications

Jigs, fixtures, tools elements, covers, housings, enclosures, snap-fit designs, handles, hinges, connectors, impact-proof elements, thermoforming molds.



¹ Material refreshing ratio - percent of Fresh powder which has to be mixed with Used (unsintered) powder - to be reused during next print.

Information provided within this document are average values for reference and comparison only. Parameters presented in this specification are subject to change. Final part properties may vary based on printed part design and print orientation.

Plano de conjunto del libro "Dibujo industrial: conjuntos y despieces" de 2004:

