



COMILLAS
UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**DISEÑO DE UN COMPONENTE INDUSTRIAL A
PARTIR DE INGENIERÍA INVERSA, MEDIANTE LA
COMBINACIÓN DE OPTIMIZACIÓN
TOPOLÓGICA, DISEÑO GENERATIVO Y
ESTRUCTURAS LATTICE.**

Autor: Alba Buezo Bufalá

Director: Mariano Jiménez Calzado

Codirector: Xavier Soldani

Madrid

Agosto 2025

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
“DISEÑO DE UN COMPONENTE INDUSTRIAL A PARTIR DE INGENIERÍA
INVERSA Y MEDIANTE LA COMBINACIÓN DE OPTIMIZACIÓN
TOPOLÓGICA, DISEÑO GENERATIVO Y ESTRUCTURAS LATTICE”
en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico 2024/25 es de mi autoría, original e inédito y
no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos.
El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que
ha sido
tomada de otros documentos está debidamente referenciada.



Fdo.: Alba Buezo Bufalá

Fecha: 28 / 08 /2025

Autorizada la entrega del proyecto
EL DIRECTOR DEL PROYECTO



Fdo.: Mariano Jiménez Calzado

Fecha: 28 / 08 /2025

EL CODIRECTOR DEL PROYECTO



Fdo.: Xavier Soldani

Fecha: 28 / 08 /2025



COMILLAS
UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**DISEÑO DE UN COMPONENTE INDUSTRIAL A
PARTIR DE INGENIERÍA INVERSA, MEDIANTE LA
COMBINACIÓN DE OPTIMIZACIÓN
TOPOLÓGICA, DISEÑO GENERATIVO Y
ESTRUCTURAS LATTICE.**

Autor: Alba Buezo Bufalá

Director: Mariano Jiménez Calzado

Madrid

Agosto 2025

DISEÑO DE UN COMPONENTE INDUSTRIAL A PARTIR DE INGENIERÍA INVERSA, MEDIANTE LA COMBINACIÓN DE OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA, DISEÑO GENERATIVO Y ESTRUCTURAS LATTICE.

Autor: Buezo Bufalá, Alba.

Director: Jiménez Calzado, Mariano.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO

A partir de una propuesta de un componente industrial, se ha llevado a cabo un proceso de ingeniería inversa mediante escaneo 3D y reconstrucción digital de un componente industrial. A partir de ello, se llevó a cabo un rediseño optimizado aplicando optimización topológica, diseño generativo y estructuras lattice para mejorar resistencia y eficiencia de material. Finalmente, se validó el prototipo mediante fabricación aditiva (impresión 3D), evaluando su geometría y funcionalidad en laboratorio.

Palabras clave: Ingeniería inversa, Optimización topológica, Diseño generativo, Estructuras lattice, Fabricación aditiva.

1. Introducción

El objetivo de este proyecto es optimizar el diseño de un componente industrial combinando herramientas de ingeniería inversa con técnicas avanzadas de diseño generativo y optimización topológica. Se aplicaron estructuras lattice para mejorar el rendimiento mecánico y reducir peso y volumen, evaluando la viabilidad del rediseño mediante análisis comparativo de costos y tecnologías de fabricación aditiva.

2. Ciclo del proyecto

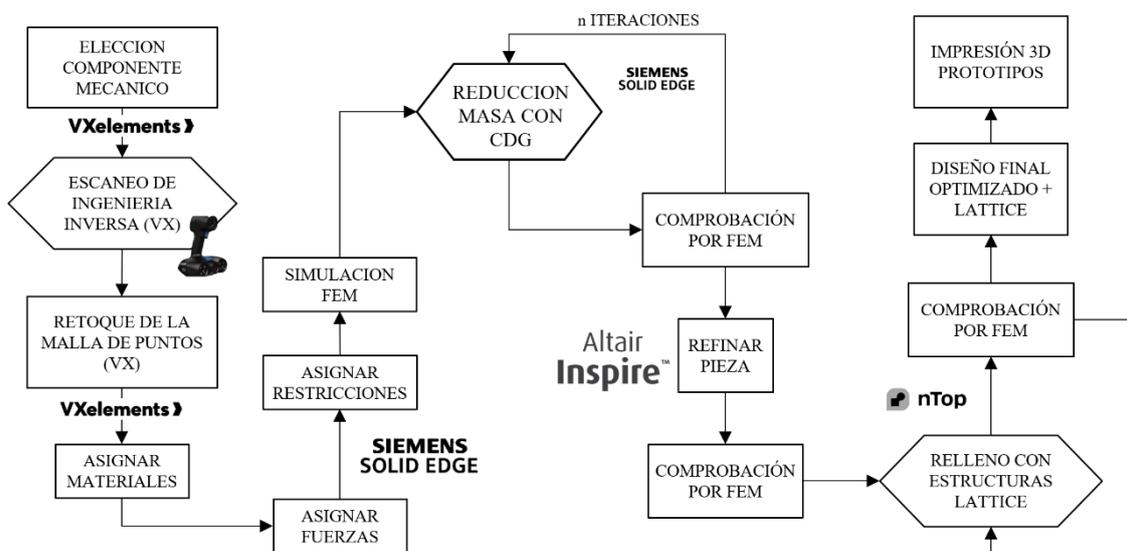


Figura 1 Diagrama de flujo del proyecto

Fuente propia

3. Descripción del proyecto

Para realizar la propuesta de diseño, se utilizará la tija de una motocicleta Yahamara, la cual será sometida a un proceso de ingeniería inversa mediante escaneo 3D con VX Elements, con el fin de obtener una representación digital precisa de la geometría original de la pieza.



Figura 2 Tija de motocicleta Yahamara.

Fuente propia

La malla obtenida será posteriormente refinada en VX Elements para corregir posibles irregularidades y asegurar la calidad del modelo digital, garantizando que todos los detalles relevantes del diseño y las dimensiones críticas se conserven correctamente.

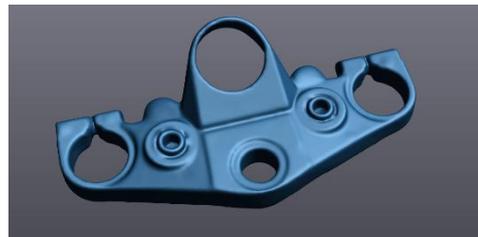
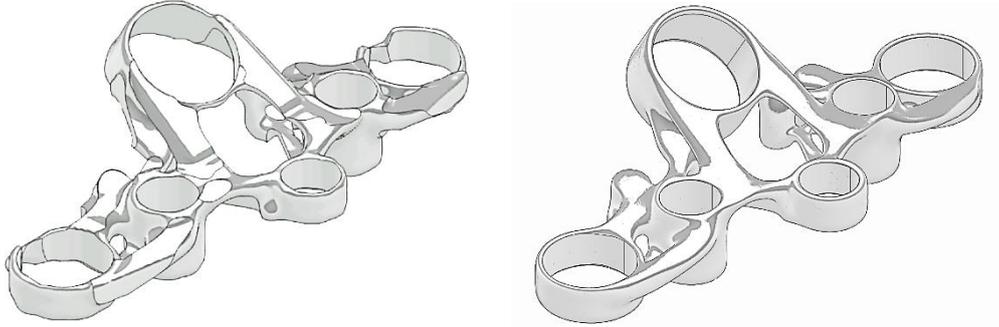


Figura 3 Proceso de ingeniería inversa de la tija: escaneo 3D con VX Elements.

Fuente propia

Una vez completada la digitalización, el modelo se importará a Solid Edge, donde se llevará a cabo un proceso de optimización topológica y diseño generativo. En esta fase, se analizarán distintas configuraciones estructurales y distribuciones de material para reducir masa y volumen de la tija sin comprometer su resistencia ni rigidez. Se considerarán las cargas y esfuerzos típicos a los que estará sometida la pieza, incluyendo el peso de la motocicleta y las fuerzas generadas durante la conducción, aplicando simulaciones FEM para verificar que la tija cumpla con los criterios de seguridad y estabilidad estructural.

Tras la optimización topológica, se empleará Altair Inspire para refinar la geometría de la pieza, mejorando la distribución del material y ajustando detalles críticos para maximizar la eficiencia estructural y garantizar la viabilidad del diseño.



*Figura 4 Tija Optimizada topológicamente (1) y refinada tras la optimización (2)
Fuente propia*

Finalmente, el diseño optimizado será llevado a nTopology (nTop), donde se implementarán estructuras lattice para mejorar aún más el comportamiento mecánico, reducir masa y garantizar un uso más eficiente del material durante la fabricación.

Este enfoque integral permite simular con precisión las condiciones reales de trabajo de la tija, evaluando su rendimiento y asegurando la viabilidad del rediseño antes de la fabricación final



*Figura 5 Tija optimizada topológicamente, refinada y rellena de estructuras lattice.
Fuente propia*

4. **Resultados**

En cuanto a los costes de prototipado en poliamida, la pieza original tenía un valor de 289,77 €. La optimización topológica con refinamiento permitió reducirlo a 136,28 €, mientras que la incorporación de la estructura lattice disminuyó aún más el coste, alcanzando 84,08 €, evidenciando un ahorro económico considerable al combinar ambas estrategias. El análisis volumétrico mostró una tendencia similar: la pieza inicial tenía un volumen de 246,56 cm³, que se redujo a 106,27 cm³ tras la optimización topológica y refinamiento, y a 58,57 cm³ al añadir el relleno lattice. Esta reducción significativa se logró sin comprometer la rigidez ni la resistencia necesarias de la pieza, demostrando la eficacia de las estrategias aplicadas en la mejora del diseño y la eficiencia de fabricación.

En cuanto a los costes de fabricación en metal mediante DMLS, la pieza original tenía un valor de 275,94 €. La optimización topológica con refinamiento permitió reducirlo a 191,77 €, mientras que la incorporación de la estructura lattice disminuyó aún más el coste, alcanzando 163,14 €, confirmando el potencial de ahorro económico derivado de la combinación de estas estrategias de optimización.

5. **Conclusiones**

La implementación de la optimización topológica ha permitido una significativa reducción en el peso de la tija de la motocicleta, manteniendo su resistencia y rigidez, lo que a su vez podría traducirse en un ahorro aproximado de 1/3 en costos de material y producción.

Durante el desarrollo de este proyecto, me he familiarizado con el uso de VX Elements para escaneo y refinado de mallas, así como con Solid Edge, ampliando mis habilidades en modelado, ensamblajes, simulaciones FEM y diseño generativo.

Además, he adquirido experiencia práctica en el uso de Altair Inspire para refinar la geometría tras la optimización topológica y en nTopology para la implementación de estructuras lattice, aprendiendo a integrar criterios de eficiencia estructural y reducción de masa en el diseño final. Este proyecto me ha permitido combinar conocimientos de ingeniería inversa, diseño generativo, análisis estructural y fabricación aditiva, consolidando competencias clave en el desarrollo de componentes industriales optimizados.

DESIGN OF AN INDUSTRIAL COMPONENT USING REVERSE ENGINEERING THROUGH THE COMBINATION OF TOPOLOGY OPTIMIZATION, GENERATIVE DESIGN, AND LATTICE STRUCTURES.

Author: Buezo Bufalá, Alba.

Supervisor: Jiménez Calzado, Mariano.

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

ABSTRACT

Based on a proposed industrial component, a reverse engineering process was carried out through 3D scanning and digital reconstruction of the component. From this, an optimized redesign was performed applying topology optimization, generative design, and lattice structures to improve strength and material efficiency. Finally, the prototype was validated through additive manufacturing.

Keywords: Reverse Engineering, Topology Optimization, Generative Design, Lattice Structures, Additive Manufacturing.

1. Introduction

The objective of this project is to optimize the design of an industrial component by combining reverse engineering tools with advanced generative design and topology optimization techniques. Lattice structures were applied to enhance mechanical performance and reduce weight and volume, assessing the feasibility of the redesign through a comparative analysis of costs and additive manufacturing technologies.

2. Project flow diagram

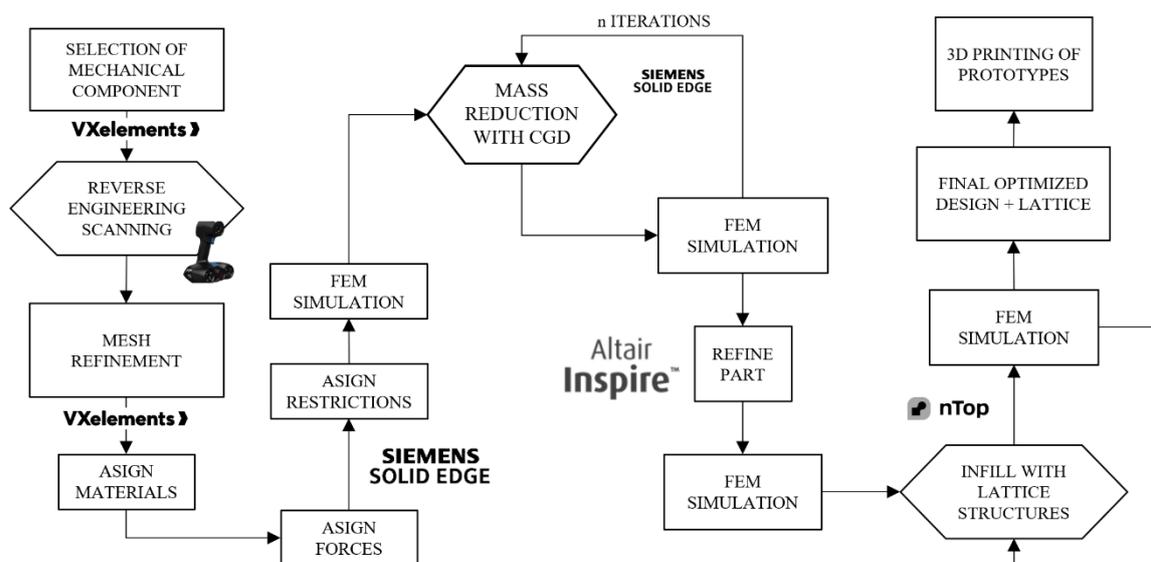


Figura 6 Project flow diagram

Own source

3. Description of the project

To carry out the design proposal, the steering stem of a Yamaha motorcycle will be used. It will undergo a reverse engineering process through 3D scanning with VX Elements in order to obtain an accurate digital representation of the original geometry of the part.



Figura 7 Tija de motocicleta Yamaha.

Own source

The obtained mesh will subsequently be refined in VX Elements to correct possible irregularities and ensure the quality of the digital model, guaranteeing that all relevant design details and critical dimensions are accurately preserved.

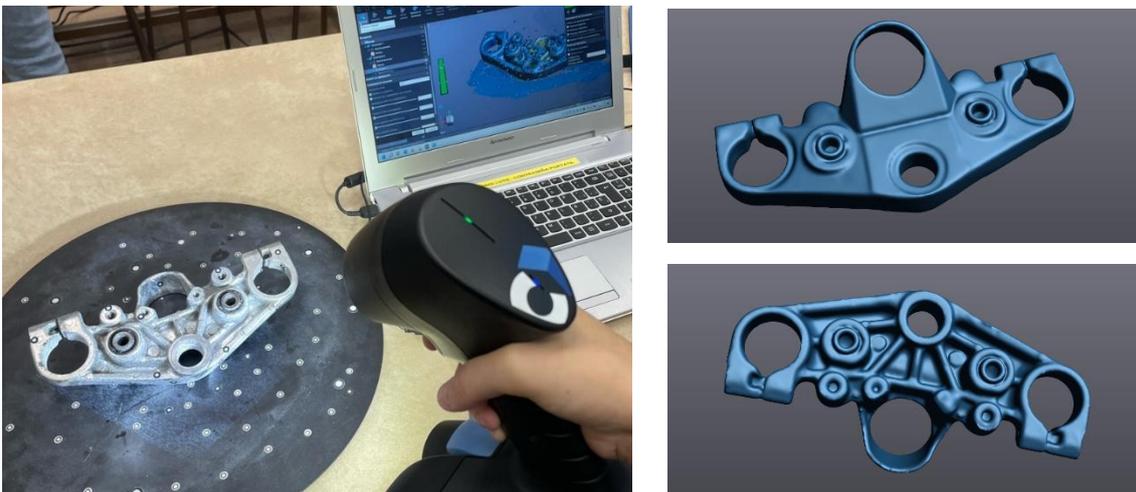


Figura 8 Reverse Engineering Process of the Steering Stem: 3D Scanning with VX Elements

Own source

Once the digitization is complete, the model will be imported into Solid Edge, where a topology optimization and generative design process will be carried out. In this phase, different structural configurations and material distributions will be analyzed to reduce the mass and volume of the steering stem without compromising its strength or stiffness. The typical loads and stresses the part will be subjected to, including the weight of the motorcycle and forces generated during riding, will be considered, applying FEM simulations to ensure that the steering stem meets safety and structural stability criteria.

After topology optimization, Altair Inspire will be used to refine the part geometry, improving material distribution and adjusting critical details to maximize structural efficiency and ensure design feasibility.

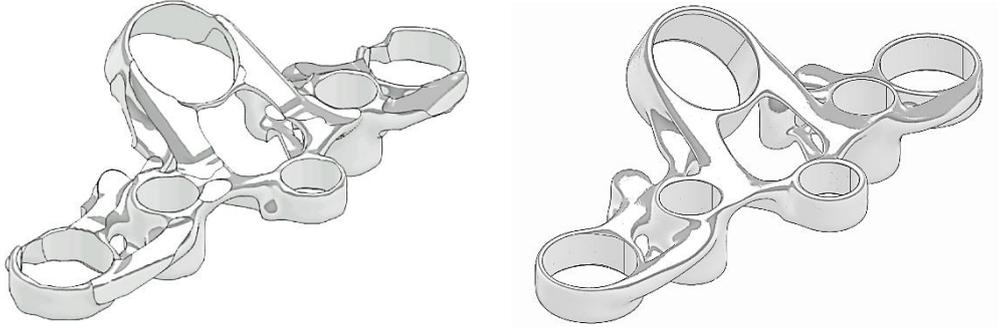


Figura 9 Topology-Optimized Steering Stem (1) and Refined Post-Optimization (2)
Own source

Finally, the optimized design will be imported into nTopology (nTop), where lattice structures will be implemented to further enhance mechanical performance, reduce mass, and ensure more efficient material usage during manufacturing.

This comprehensive approach allows for accurate simulation of the steering stem's real working conditions, evaluating its performance and ensuring the feasibility of the redesign before final manufacturing.



Figura 10 Topology-Optimized, Refined Steering Stem with Lattice Infill

Own source

4. Results

Regarding prototyping costs in polyamide, the original part had a value of €289.77. Topology optimization with refinement reduced it to €136.28, while the incorporation of a lattice structure further decreased the cost to €84.08, highlighting the considerable economic savings achieved by combining both strategies. The volumetric analysis showed a similar trend: the initial part had a volume of 246.56 cm³, which was reduced to 106.27 cm³ after topology optimization and refinement, and to 58.57 cm³ when the lattice infill was added. This significant reduction was achieved without compromising the necessary stiffness or strength of the part, demonstrating the effectiveness of the applied strategies in improving design and manufacturing efficiency.

Regarding manufacturing costs in metal using DMLS, the original part had a value of €275.94. Topology optimization with refinement reduced it to €191.77, while the incorporation of the lattice structure further decreased the cost to €163.14, confirming the economic savings potential derived from combining these optimization strategies.

5. Conclusions

The implementation of topology optimization has enabled a significant reduction in the weight of the motorcycle steering stem while maintaining its strength and stiffness, which could potentially result in an approximate saving of 1/3 in material and production costs.

During the development of this project, I became familiar with the use of VX Elements for scanning and mesh refinement, as well as Solid Edge, expanding my skills in modeling, assemblies, FEM simulations, and generative design.

Furthermore, I gained practical experience using Altair Inspire to refine geometry after topology optimization and nTopology for implementing lattice structures, learning to integrate structural efficiency and mass reduction criteria into the final design. This project allowed me to combine knowledge of reverse engineering, generative design, structural analysis, and additive manufacturing, consolidating key competencies in the development of optimized industrial components.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN	22
1.1 OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA, INGENIERÍA INVERSA Y ESTRUCTURAS LATTICE	22
1.2 MOTIVACIÓN DEL PROYECTO	25
1.3 OBJETIVOS DEL PROYECTO	26
1.4 OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE (ODS)	26
1.5 METODOLOGÍA DEL PROYECTO.....	27
2. ESTADO DE LA CUESTIÓN.....	28
2.1 FUNDAMENTOS DE LA INGENIERÍA INVERSA	28
2.2 FUNDAMENTOS DEL DISEÑO GENERATIVO.....	31
2.2.1 MÉTODO DE ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS.....	32
2.3 METODOLOGÍA DE TRABAJO FA	34
5.1.1 FORMATO STL	34
5.1.2 SOFTWARE I3D	35
2.4 TECNOLOGÍAS DE IMPRESIÓN	36
3. DIAGRAMA DE FLUJO.....	38
4. ELECCIÓN DE COMPONENTE MECÁNICO	45
5. INGENIERÍA INVERSA	47
5.1 ESCANEADO DEL COMPONENTE.....	47
5.2 LIMPIEZA GENERAL A CADA NUBE DE PUNTOS.....	50

5.3	CREACIÓN DE ENTIDADES PARA ALINEAMIENTO	54
5.4	ALINEAMIENTO CON EJES CARTESIANOS	63
5.5	REFINAMIENTOS PREVIOS	65
5.5.1	REFINAMIENTO DE AGUJEROS	65
5.5.2	DIVISION DE SUPERFICIES AGUJEROS.....	71
6.	SIMULACION FEM.....	73
6.1	CONDICIONES CONTORNO PARA ESTUDIO FEM.....	73
6.1.1	CARGAS.....	73
6.1.2	RESTRICCIONES DE MOVIMIENTO	76
6.1.3	ELECCIÓN DE MATERIAL	77
6.2	ESTUDIO FEM.....	80
7.	OPTIMIZACION TOPOLOGICA	81
7.1	ITERACIÓN 1.....	82
7.2	ITERACIÓN 2.....	84
7.3	ITERACIÓN 3.....	85
7.4	ITERACIÓN 4.....	86
8.	REFINAMIENTO TRAS LA OT	88
8.1	REFINAMIENTO 1: AGUJEROS.....	88
8.2	REFINAMIENTO 2: SUAVIZADO.....	91
8.3	SIMULACION FEM TRAS REFINAMIENTO.....	93
9.	RELLENO CON LATTICE.....	96
9.1	SOFTWARE NTOP	96
9.2	PROCEDIMIENTO RELLENO CON LATTICE	97
9.2.1	DISTRIBUCION LATTICE 1: CUBIC.....	100

9.2.2 DISTRIBUCION LATTICE 2: GYROID	106
9.2.3 DISTRIBUCION LATTICE 3: SCHWARZ	110
9.2.4 DISTRIBUCION LATTICE 4: LILINOID	112
9.2.5 DISTRIBUCION LATTICE 5: SPLIT-P.....	114
10. SIMULACION FEM ESTRUCTURAS LATTICE	116
11. ANÁLISIS DE RESULTADOS	117
11.1 PRESUPUESTOS ECONÓMICOS	117
11.1.1 COSTES DE PROTOTIPADO.....	117
11.1.2 COSTE DE IMPRESIÓN EN ACERO	129
11.2 ANÁLISIS Y COMPARATIVA.....	131
12. CONCLUSIONES	132
13. BIBLIOGRAFIA.....	134

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Diagrama de flujo del proyecto	4
Figura 2 Tija de motocicleta Yahamara.	5
Figura 3 Proceso de ingeniería inversa de la tija: escaneo 3D con VX Elements	5
Figura 4 Tija Optimizada topológicamente (1) y refinada tras la optimización (2)	6
Figura 5 Tija optimizada topológicamente, refinada y rellena de estructuras lattice.	6
Figura 6 Project flow diagram	8
Figura 7 Tija de motocicleta Yahamara.	9
Figura 8 Reverse Engineering Process of the Steering Stem: 3D Scanning with VX Elements	9
Figura 9 Topology-Optimized Steering Stem (1) and Refined Post-Optimization (2) ..	10
Figura 10 Topology-Optimized, Refined Steering Stem with Lattice Infill.....	10
Figura 11 Detalle del escaneo de una pieza.....	22
Figura 12 Detalle del diagrama de flujo de la Optimización Topológica	23
Figura 13 Ejemplos de Estructuras Lattice.....	24
Figura 14 Escaneres de piezas para ingenieria inversa.....	29
Figura 15 Detalle del programa a utilizar VXelements.....	30
Figura 16 Detalle de la diferencia entre diseño generativo y diseño tradicional.....	31
Figura 17 Estructura real y esquema de cálculo.	32
Figura 18 Detalle de una estructura continua y una discreta.....	33
Figura 19 Nodos y elementos definidos en una pieza en SolidEdge.....	33
Figura 20 Ciclo de I3D	34
Figura 21 Detalle de la tolerancia de cuerda y angular en un fichero .stl	34
Figura 22 Detalle de cómo afecta el tamaño de capa	35
Figura 23 Patrones y porcentajes de I3D.....	35
Figura 24 Fusión de lecho de polvo metálico.....	36
Figura 25 Ejemplo de extrusion de material.....	37
Figura 26 Ejemplo de estereolitografía	37
Figura 27 Diagrama de Flujo 1 propuesto en el libro.....	38
Figura 28 Diagrama de flujo 2 propuesto en el libro.....	39
Figura 29 Diagrama de flujo 3 propuesto en el libro.....	41
Figura 30 Diagrama de flujo propuesto por ICAI.	42
Figura 31 Diagrama de flujo definitivo del proyecto.	44
Figura 32 Tija superior de una Yamaha FZR.	45
Figura 33 Disposición de las pegatinas de posición.	47
Figura 34 Componente mecánico a optimizar junto al spray especial para escaneo.....	48

Figura 35 Detalle del escaneo de la parte inferior de la pieza.	48
Figura 36 Nube de puntos original 1.	49
Figura 37 Nube de puntos original 2.	49
Figura 38 Nube de puntos original 3.	49
Figura 39 Detalle de la herramienta Connect.	50
Figura 40 Detalle de las mallas de puntos 1 y 2 tras usar la herramienta Connect y quitar el suelo.	50
Figura 41 Detalle de la conexión pieza-suelo en la malla de puntos 3.	51
Figura 42 Detalle herramienta de selección Freeform.	51
Figura 43 Detalle de la selección suelo-pieza.	51
Figura 44 Detalle de la malla de puntos 3 tras la eliminación del suelo.	52
Figura 45 Detalle de la herramienta de selección de Isolated patches en la malla de puntos 3.	52
Figura 46 Detalle de la herramienta de Clean Mesh y la información que nos proporciona.	53
Figura 47 Detalle de las tres mallas de puntos refinadas por separado.	53
Figura 48 Detalle de las herramientas de creación de entidades.	54
Figura 49 Punto 1: Parte inferior malla 1.	54
Figura 50 Punto 2: Parte superior malla 1.	54
Figura 51 Punto 5: Parte superior malla 3.	55
Figura 52 Punto 6: Parte inferior malla 3.	55
Figura 53 Cilindro 1: Cilindro lateral izq de la nube de puntos 1.	55
Figura 54 Cilindro 2: Cilindro Lateral derecho de la nube de puntos 1.	56
Figura 55 Cilindros 3 y 4: Cilindros de la nube de puntos 3.	56
Figura 56 Detalle de la herramienta BestFit.	57
Figura 57 Azul es nube fija y rosa nube movil.	57
Figura 58 Fusión de la nube de puntos 1 y 2.	58
Figura 59 Detalle de la herramienta Entity Based Alignment junto a las entidades creadas.	58
Figura 60 Detalle del alineamiento por la entidad puntos.	59
Figura 61 Detalle del alineamiento por la entidad cilindros.	59
Figura 62 Alineamiento final parte inferior.	60
Figura 63 Alineamiento final parte superior.	60
Figura 64 Detalla de la fusión de las tres nubes de puntos.	60
Figura 65 Nube de puntos superior final sin refinar.	61
Figura 66 Nube de puntos final inferior sin refinar.	61
Figura 67 Nube de puntos final inferior tras refinar.	62
Figura 68 Nube de puntos final superior tras refinar.	62
Figura 69 Herramienta de alineamiento manual con plano.	63
Figura 70 Alineamiento con los ejes cartesianos final.	63
Figura 71 Detalle del alineamiento con los ejes cartesianos.	64

Figura 72 Detalle de la enumeración de los agujeros de la tija junto con el calibre a utilizar.	65
Figura 73 Detalle de los vaciados de los rodamientos.	66
Figura 74 Detalle de los ajustes de los agujeros laterales y central de la tija.	67
Figura 75 Detalle del ajuste de agujero central superior de la tija.	67
Figura 76 Agujeros con métrica traseros de la pieza con su enumeración.	68
Figura 77 Detalle de los 4 agujeros con métrica traseros.	69
Figura 78 Detalle de los dos agujeros laterales.	69
Figura 79 Detalle de los agujeros a retocar finales.	70
Figura 80 Realización de las extrusiones en la pieza.	70
Figura 81 Detalle de la creación de los planos.	71
Figura 82 Detalle de las superficies de los agujeros divididas.	72
Figura 83 Detalle de la herramienta Split en SolidEdge.	72
Figura 84 Fuerza normal, reacción sufrida por la motocicleta en la frenada.	74
Figura 85 Detalle de la adición al estudio de la Fuerza normal.	74
Figura 86 Fuerza de rozamiento, reacción sufrida por la motocicleta en la frenada.	75
Figura 87 Detalle de la adición de la Fr en el estudio.	75
Figura 88 Detalle de la adición de la gravedad al estudio.	76
Figura 89 Detalle de las restricciones fijas de la tija.	76
Figura 90 Detalle de las herramientas de restricciones de Solid Edge.	76
Figura 91 Detalle de las restricciones fijas de la tija.	77
Figura 92 Propiedades mecánicas Al5456 H111.	78
Figura 93 Detalle de la adición del material Al5456 H111 a Solid Edge.	79
Figura 94 Simulación FEM de la tija original de tensiones.	80
Figura 95 Simulación FEM de la tija original de desplazamiento.	80
Figura 96 Detalle del estado de cargas y restricciones para el estudio generativo.	81
Figura 97 Detalle de las restricciones de reducción de masa Iteración 1.	82
Figura 98 Vistas laterales de la OT de la pieza en la primera iteración.	82
Figura 99 Vista isométrica de la primera iteración.	83
Figura 100 Simulación FEM a la pieza optimizada 1.	83
Figura 101 Detalle de las restricciones de reducción de masa Iteración 2.	84
Figura 102 OT de la pieza en la segunda iteración.	84
Figura 103 Simulación FEM a la pieza optimizada 2.	84
Figura 104 Detalle de las restricciones de reducción de masa Iteración 3.	85
Figura 105 OT de la pieza en la tercera iteración.	85
Figura 106 Simulación FEM a la pieza optimizada 3.	85
Figura 107 Detalle de las restricciones de reducción de masa Iteración 4.	86
Figura 108 Vistas laterales de la OT de la pieza en la cuarta iteración.	86
Figura 109 Vista isométrica de la cuarta iteración.	86
Figura 110 Simulación FEM a la pieza optimizada 4.	87
Figura 111 Detalle de las extrusiones del refinamiento de los agujeros interiores.	88

Figura 112 Detalle de los bocetos de extrusión del refinamiento de los agujeros inferiores.	88
Figura 113 Detalle de los bocetos de vaciado del refinamiento de los agujeros inferiores.	89
Figura 114 Detalle del resultado final del refinamiento de los agujeros interiores.	89
Figura 115 Detalle de la tija refinada con sus bocetos y operaciones que definen los agujeros de sujeción.....	90
Figura 116 Detalle de la tija optimizada y refinada de agujeros, pero no refinada de suavizado.	91
Figura 117 Detalle de la herramienta a usar de Altair Inspire Fit PolyNURBS.....	91
Figura 118 Detalle de la tija optimizada y refinada tanto de agujeros como de suavizado.	92
Figura 119 Tija optimizada y refinada sin retoque de agujeros.	93
Figura 120 Ajuste agujeros exteriores.	93
Figura 121 Ajuste de agujeros interiores y superior.....	94
Figura 122 Detalle de las restricciones y cargas de la tija optimizada y refinada.	95
Figura 123 Simulación FEM de la tija optimizada y refinada.....	95
Figura 124 Detalle del modelo en forma de cuerpo de malla.....	97
Figura 125 Detalle de la herramienta Implicit body de nTop.....	98
Figura 126 Detalle del modelo en forma de cuerpo implícito.	98
Figura 127 Detalle de la herramienta shell en nTop.....	99
Figura 128 Detalle del modelo en forma de cuerpo implícito hueco.	99
Figura 129 Detalle del árbol de procedimiento de "Shell"	99
Figura 130 Detalle de la herramienta de Periodic Lattice de nTop	100
Figura 131 Detalle de la herramienta de Graph Unit Cell.....	101
Figura 132 Detalle de la herramienta de Rectangular Cell Map	102
Figura 133 Detalle de la primera estructura lattice sin intersección con la tija.....	103
Figura 134 Detalle de la herramienta intersección booleana sin parámetros añadidos.	103
Figura 135 Detalle de la herramienta intersección booleana 1 con parámetros añadidos.	104
Figura 136 Estructura lattice 1 sin borde.....	104
Figura 137 Configuración de la estructura lattice final 1	105
Figura 138 Tija optimizada, refinada y rellenada con Lattice 1.....	105
Figura 139 Detalle de la herramienta de Walled TPMS Unit Cell: Gyroid.	106
Figura 140 Detalle de la herramienta Cylindrical Cell Map de lattice 2.....	107
Figura 141 Detalle de la segunda estructura lattice sin intersección con la tija	107
Figura 142 Detalle de la herramienta intersección booleana 2.....	108
Figura 143 Estructura lattice 2 sin borde.....	108
Figura 144 Tija optimizada, refinada y rellenada con Lattice 2.....	109
Figura 145 Detalle de la herramienta de Walled TPMS Unit Cell: Schwarz.....	110
Figura 146 Detalle del árbol de configuración del modelo lattice 3	110

Figura 147 Estructura lattice 3 sin borde.....	111
Figura 148 Tija optimizada, refinada y rellena con Lattice 3	111
Figura 149 Detalle de la herramienta de Walled TPMS Unit Cell: Lilinoid.....	112
Figura 150 Detalle del árbol de configuración del modelo lattice 4	112
Figura 151 Estructura lattice 4 sin borde.....	113
Figura 152 Tija optimizada, refinada y rellena con Lattice 4.....	113
Figura 153 Detalle de la herramienta de Walled TPMS Unit Cell: SplitP	114
Figura 154 Detalle del árbol de configuración del modelo lattice 5	114
Figura 155 Estructura lattice 5 sin borde.....	115
Figura 156 Tija optimizada, refinada y rellena con Lattice 5	115
Figura 157 Detalle de la simulación de impresión de la tija sin optimizar en CURA..	118
Figura 158 Detalle de la estimación de tiempos de la impresión de la tija sin optimizar en CURA.....	118
Figura 159 Detalle de la simulación de impresión de la tija sin optimizar en HP SmartStream 3d Build Manager	120
Figura 160 Detalle del volumen de la tija sin optimizar sólida.	120
Figura 161 Características y tiempo de impresión de la tija sin optimizar.....	121
Figura 162 Detalle de la simulación de impresión de la tija optimizada sin refinar en HP SmartStream 3d Build Manager	122
Figura 163 Detalle del volumen de la tija optimizada refinada sólida.	122
Figura 164 Características y tiempo de impresión de la tija optimizada refinada solida	123
Figura 165 Detalle de la simulación de impresión de la tija optimizada y refinada en HP SmartStream 3d Build Manager	124
Figura 166 Detalle del volumen de la tija optimizada refinada sólida.	124
Figura 167 Características y tiempo de impresión de la tija optimizada refinada solida	125
Figura 168 Detalle de la simulación de impresión de la tija optimizada refinada y rellenas de lattice 1 y 2 en HP SmartStream 3d Build Manager.....	126
Figura 169 Detalle de los volúmenes de las tijas optimizadas refinadas latitce 1 y 2..	127
Figura 170 Características y tiempo de impresión de las tijas optimizadas refinadas latitce 1 y 2	127

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Medidas de los agujeros del componente.....	65
Tabla 2 Medidas de los agujeros con métrica de la tija.....	68
Tabla 3 Análisis de costes prototipado tija sin optimizar FDM.	119
Tabla 4 Análisis de costes prototipado tija sin optimizar MJF.....	121
Tabla 5 Análisis de costes prototipado tija optimizada sin refinar solida	123
Tabla 6 Análisis de costes prototipado tija optimizada y refinada solida	125
Tabla 7 Análisis de costes prototipado de las tijas optimizadas refinadas latitce 1 y 2	128
Tabla 8 Datos cálculo de costes Impresora 3D DLMS.	129
Tabla 9 Calculo de costes de todas las tijas para impresión de prototipos en metal. ...	130

ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

OT: Optimización Topológica

DG: Diseño Generativo

II: Ingeniería Inversa

EL: Estructuras Lattice

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, INGENIERÍA INVERSA Y ESTRUCTURAS LATTICE

Los términos principales que se van a tratar durante el proyecto son: Ingeniería Inversa, Optimización Topológica, Diseño Generativo, Estructuras Lattice y Fabricación Aditiva.

La ingeniería inversa un proceso mediante el cual se identifican las características de un objeto físico a través de un análisis detallado de su estructura, funciones y funcionamiento. A través de diferentes tecnologías como láseres o cámaras especializadas, de tal forma que se genera una malla en 3D, una representación digital del objeto en 3D. Este proceso ayuda a los fabricantes a comprender el diseño de una pieza para poder replicarla, modificarla o mejorarla. [1]

Este proceso ha evolucionado considerablemente con el avance de tecnologías de digitalización 3D, como el escaneo láser o la fotogrametría. Estos aparatos permiten reconstruir modelos digitales precisos sobre objetos físicos, lo que facilita el análisis, mejora y replicación de piezas.



Figura 11 Detalle del escaneo de una pieza.

La ingeniería inversa empieza por capturar la forma y las características de un objeto, a través de diferentes tecnologías de escaneo. Después, se analiza esa información para crear un modelo digital, que sirve como base para hacer modificaciones, mejoras o rediseños. Este último paso se llevará a cabo del programa VX Elements, donde se podrán hacer modificaciones en la nube de puntos obtenida del escaneo para poder así obtener una malla de cuerpo del componente mucho más precisa.

El diseño generativo consiste en crear modelos que se adapten a su objetivo sin salir de las restricciones y limitaciones de diseño marcadas, siendo estas limitaciones, parámetros o variables como volúmenes, fuerzas, límites espaciales o incluso temperaturas. Gracias al diseño generativo podemos llegar a diseños alternativos óptimos, y, por lo cual, reducir imprevistos y costes, mejorando al mismo tiempo, tiempos de fabricación y desarrollo.

La optimización topológica es un proceso iterativo que consiste hacer un análisis mecánico de un componente o estructura y en reducir lo máximo posible su peso a través de criterios de diseño generativo, es decir, respetando las limitaciones y restricciones necesarias y sin que pierda su funcionalidad mecánica.



Figura 12 Detalle del diagrama de flujo de la Optimización Topológica con criterios de diseño generativo.

Fuente propia

Las Estructuras Lattice son configuraciones tridimensionales o bidimensionales formadas por la repetición de microestructuras a lo largo de un volumen o área, comúnmente compuestas por celdas unitarias que contienen una red de barras y nodos.

Estas están inspiradas en formaciones cristalinas naturales, y permiten crear productos más ligeros sin sacrificar la resistencia necesaria para soportar las cargas requeridas.

Su capacidad ajustable, junto con el avance de las tecnologías de fabricación aditiva, las hace cada vez más populares como reemplazo del interior macizo de piezas, optimizando el diseño para reducir peso y mejorar el rendimiento. [2]

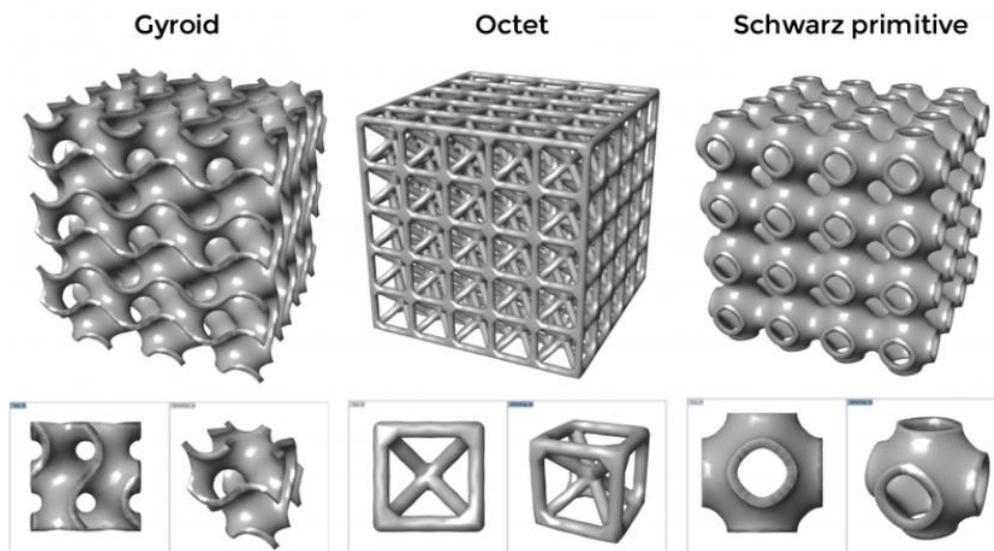


Figura 13 Ejemplos de Estructuras Lattice.

Al incorporar las estructuras Lattice en este proyecto, no solo se disminuye el uso de material y el peso, sino que también se potencian el uso de elementos que ayudan con la disipación de la energía y la resistencia a tensiones, lo que resulta particularmente ventajoso en sectores que demandan componentes rígidos y ligeros.

1.2 MOTIVACIÓN DEL PROYECTO

En este proyecto de fin de máster, a diferencia del proyecto de fin de grado, amplía su motivación principal con 2 conceptos más. Esta motivación sigue alineada con la creciente popularidad de la optimización topológica y sus beneficios para las industrias. No obstante, en este trabajo también se ampliará el alcance al integrar conceptos de ingeniería inversa y estructuras Lattice, con el fin de lograr una mejora óptima del componente.

El objetivo principal sigue siendo optimizar un componente industrial, buscando mantener las mismas funciones principales mientras se logran ventajas como la reducción de costos y el uso eficiente de materiales, maximizando el aprovechamiento del material disponible.

Por un nuevo lado, la ingeniería inversa permitirá analizar y comprender a fondo el diseño existente. Además, uno de los beneficios principales es que no es necesario tener los planos o medidas exactas del componente, lo que incrementa considerablemente la diversidad de proyectos potenciales.

Por otra parte, la incorporación de las estructuras Lattice añade un aspecto innovador al proyecto, dado que posibilitan una disminución notable del peso sin comprometer la resistencia y funcionalidad del componente. Estas estructuras, que se distinguen por la disposición de celdas repetitivas, facilitan la distribución óptima de las cargas, resultando en un uso mucho más eficaz del material.

Por lo tanto, este proyecto busca maximizar las mejoras de diseño al combinar la optimización topológica, la ingeniería inversa y las estructuras Lattice, consiguiendo un elemento que no solo sea más asequible y eficaz en la utilización de materiales, sino también innovador y flexible ante las exigencias de las industrias contemporáneas.

1.3 OBJETIVOS DEL PROYECTO

En este apartado se van a plantear los objetivos clave para mejorar el diseño y rendimiento del componente mecánico que se va a analizar.

- Conocimiento de la metodología de los criterios de diseño generativo en profundidad entendiendo cómo funciona su proceso hasta llegar a la pieza optimizada final.
- Desarrollar habilidades sobre el escaneado del componente para obtener una representación digital precisa y aprender a rellenar la estructura con estructuras Lattice para mejorar aún más la optimización del diseño.
- Familiarizarme con los nuevos programas a utilizar, VX Elements y nTop.
- Conocimiento de la fabricación aditiva 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 establecieron metas globales para erradicar la pobreza, proteger el medio ambiente y promover el bienestar de todos, como parte de una nueva agenda de desarrollo sostenible. Dos de estos objetivos se alinean directamente con los propósitos de este proyecto de fin de máster:

➤ **Objetivo 12: PRODUCCIÓN Y CONSUMO RESPONSABLES**

“Garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles”

La aplicación de criterios de diseño generativo optimiza una pieza de manera que el producto final mantiene la misma funcionalidad pero con un peso reducido. Esto se logra utilizando menos material, lo que permite minimizar el consumo de recursos y promueve una producción más eficiente y responsable con respecto al uso de materias primas.

➤ **Objetivo 9: INDUSTRIA, INNOVACIÓN E INFRAESTRUCTURAS**

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

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 llevar a cabo este proyecto es necesario llevar a cabo una metodología concreta que asegure que se obtenga de ello el mejor aprendizaje posible.

- Se llevara a cabo un análisis exhaustivo del componente industrial a optimizar utilizando herramientas de **ingeniería inversa**: tanto escáneres como el GO20 como programas especializados en retocar y modificar la nube de puntos obtenida de el escáner como VX Elements. [3]
- Se realizará un análisis exhaustivo de los principios del diseño generativo para desarrollar tanto la introducción como la elaboración del **estado del arte**. Esto permitirá obtener un conocimiento profundo de las herramientas y técnicas empleadas, lo que facilitará la definición de un procedimiento adecuado para su aplicación en la estructura de soporte de una polea con cable.
- Tras la elaboración de la parte teórica, y del escaneado del componente, se llevara a cabo la **optimización del soporte** a través de las herramientas proporcionadas por el programa de Solid Edge y elaborar así las mejores optimizaciones, a través de las iteraciones necesarias.
- A continuación, a través del programa nTop se llevará a cabo un análisis y posteriormente una modificación sobre la pieza optimizada, rellenándola de la **estructura Lattice** más conveniente para la distribución de cargas de la pieza.
- Se procederá, a **fabricar el soporte** utilizando la técnica de fabricación aditiva. 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 el componente industrial analizado.

2. ESTADO DE LA CUESTIÓN

Como se ha introducido brevemente en el capítulo anterior, la optimización de componentes industriales mediante técnicas como la optimización topológica, la ingeniería inversa y las estructuras Lattice va a ser el objetivo principal de este proyecto.

Estas técnicas combinadas nos facilitarán disminuir el peso de los componentes sin afectar su resistencia, ofreciéndonos soluciones novedosas para potenciar el rendimiento y la funcionalidad de los diseños. Al incorporar estas tres tecnologías, se puede mejorar la utilización de materiales, disminuir gastos y aumentar la eficiencia de los componentes industriales de manera significativamente superior en comparación con su utilización individual.

Este apartado revisa las ideas clave y los desarrollos más relevantes en estas áreas, destacando los beneficios y las oportunidades que la optimización topológica, la ingeniería inversa y las estructuras Lattice pueden ofrecer al sector industrial.

2.1 FUNDAMENTOS DE LA INGENIERÍA INVERSA

La ingeniería inversa consiste en capturar y modificar una geometría tridimensional de un objeto físico. Este procedimiento se realiza a través de una digitalización 3D, que emplea instrumentos como escáneres láser y reconstrucción de superficies, en la que se crea un modelo tridimensional a través de programas CAD para su manejo en diseño, fabricación y análisis.

En el ámbito académico, la ingeniería inversa está en constante evolución, mientras que en la industria ha crecido gracias a los avances en las tecnologías para capturar y procesar información en 3D. Esta técnica está cambiando el desarrollo de productos en áreas como el diseño de moldes, productos mecánicos, control de calidad, medicina y conservación del arte.

En un ambiente industrial competitivo, la ingeniería inversa es esencial, pues contribuye a disminuir gastos y plazos en la investigación, desarrollo e innovación de nuevos productos. Esta monografía examina la manera en que la ingeniería inversa optimiza los procesos de fabricación y producción industrial, ofreciendo ejemplos de su uso en diversas industrias. [4]



Figura 14 Escaneres de piezas para ingeniería inversa.

Fuente: dynamic-3d.com

La ingeniería inversa fue inicialmente utilizada en la industria automotriz y aeroespacial para estudiar y reproducir componentes complejos, la ingeniería inversa se ha extendido a sectores como la medicina, la manufactura y la robótica, donde es esencial entender la forma, estructura y funciones de piezas preexistentes para su optimización.

Dentro de las soluciones de software para escaneo 3D e ingeniería inversa, VXelements se presenta como la plataforma principal desarrollada por Creaform, que sirve de entorno común para todas sus herramientas.

Este software funciona como base de trabajo, de manera similar a como lo hace SOLIDWORKS con sus diferentes módulos y complementos. A partir de esta plataforma se ejecutan distintos programas especializados: VXScan, VXModel y VXInspect, entre otros.[5]



Figura 15 Detalle del programa a utilizar VXelements

Fuente: dynamic-3d.com

VXScan constituye la funcionalidad esencial disponible con cada escáner Creafom, permitiendo la captura de datos y la generación de una malla en vivo directamente durante el escaneo, lo que evita pasos intermedios como el procesamiento de nubes de puntos y facilita la alineación y unión de múltiples escaneos.

Por su parte, VXModel está orientado a la ingeniería inversa, ofreciendo herramientas para reparar, suavizar o combinar mallas, así como para extraer geometrías precisas (planos, cilindros, conos, etc.) a partir de la malla escaneada y exportarlas en formatos compatibles con programas CAD como SOLIDWORKS o STEP. [5]

Finalmente, VXInspect se especializa en la inspección dimensional y metrológica, posibilitando la comparación directa entre la pieza digitalizada y un modelo CAD de referencia o incluso entre dos mallas, permitiendo realizar un control de calidad basado en GD&T de manera ágil y precisa.

2.2 FUNDAMENTOS DEL DISEÑO GENERATIVO

El diseño generativo implica la creación de modelos flexibles limitados por restricciones de diseño establecidas por ciertos parámetros establecidos en un programa digital. Estas variables o parámetros, tales como volúmenes, fuerzas, límites espaciales o incluso temperaturas, pueden ser gestionados a través de algoritmos y lograr resultados sorprendentes de diseños innovadores y adaptables. Las formas geométricas más habituales fueron abandonadas para crear una geometría inteligente, generando estructuras orgánicas y curvilíneas que nos evocan la forma de la naturaleza. [6]

El diseño generativo, fundamentado en el modelado paramétrico y algorítmico, reinterpreta la función del diseñador, que se enfoca en determinar los parámetros de diseño y elegir la alternativa más adecuada entre diversas versiones producidas automáticamente. En contraposición al método convencional, donde el diseñador generaba y analizaba opciones de manera manual, el diseño generativo emplea una metodología que inicia con los objetivos de diseño para que los algoritmos generen soluciones de manera automatizada.

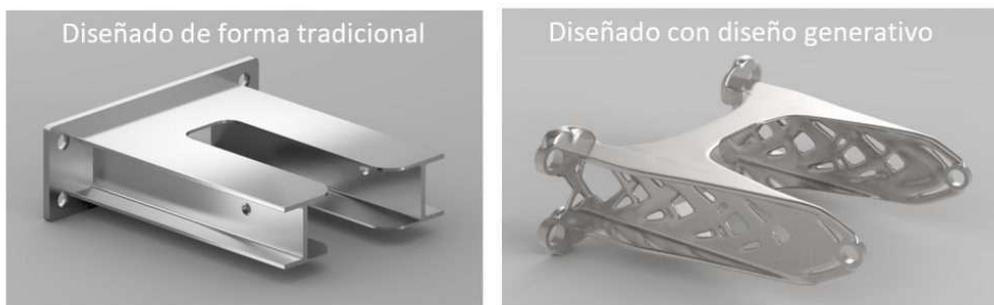


Figura 16 Detalle de la diferencia entre diseño generativo y diseño tradicional.

Fuente: *prismacim.com*

Pese a que sus primeros usos se hallan en la industria textil y posteriormente en la arquitectura y la automoción, el auténtico crecimiento del diseño generativo se produce con el surgimiento de la inteligencia artificial.

Esta opción facilita la adquisición de modelos que quizás el diseñador no habría anticipado, minimizando gastos y plazos de desarrollo, y favoreciendo la sostenibilidad a través del ahorro de materiales y energía. [6]

2.2.1 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. [7]

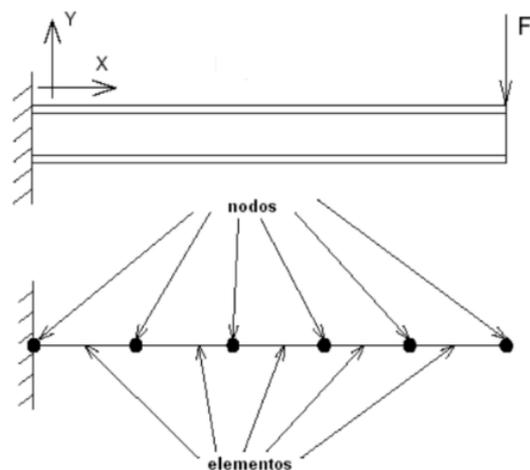
De esta manera, podemos analizar y estudiar cómo se comporta cada componente individualmente y luego combinar esta información para comprender el comportamiento global del sistema complejo.

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.

Figura 17 Estructura real y esquema de cálculo.

Fuente: (L. L. Ortero Pereiro, 2006) [7]



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.

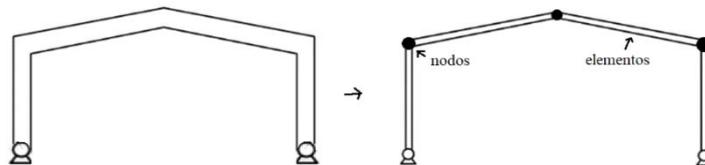


Figura 18 Detalle de una estructura continua y una discreta.

Fuente 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.

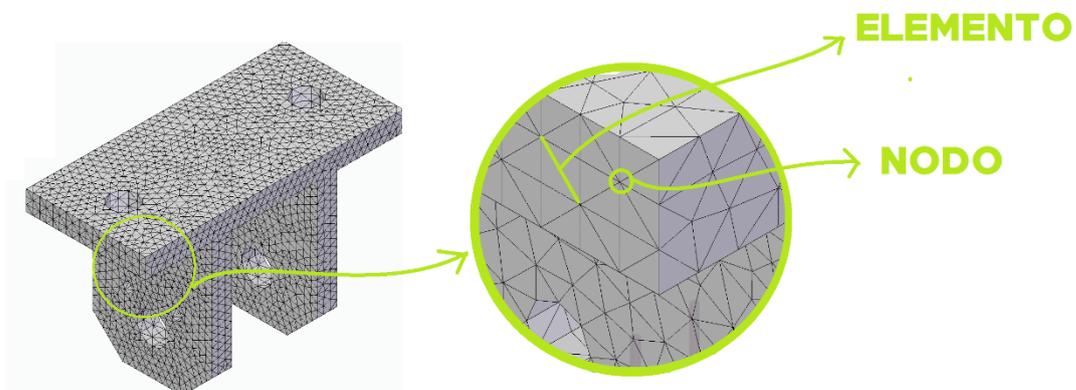


Figura 19 Nodos y elementos definidos en una pieza en SolidEdge

Fuente propia

2.3 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.



Figura 20 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 óptimo, 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.

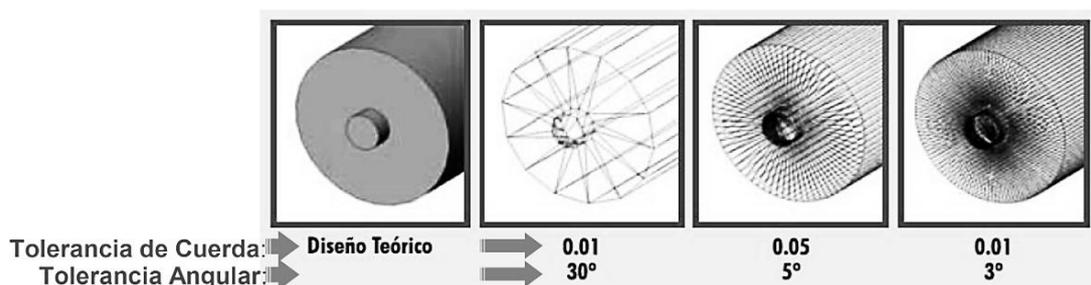


Figura 21 Detalle de la tolerancia de cuerda y angular en un fichero .stl

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 más precisa pero al mismo tiempo tener mayor tiempo de impresión.

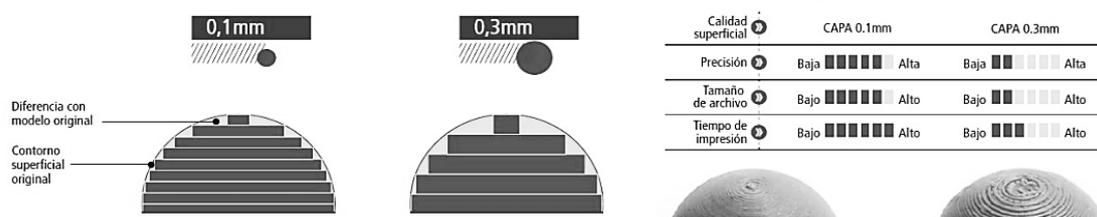


Figura 22 Detalle de cómo afecta el tamaño de capa
Fuente: Diapositiva Temario Tecnologías de Fabricación Comillas ICAI

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%.

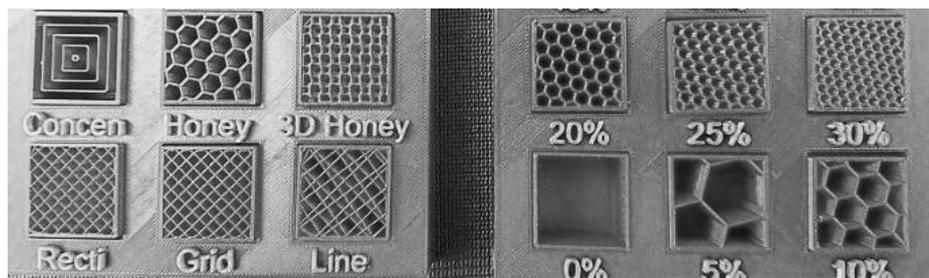
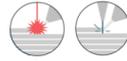


Figura 23 Patrones y porcentajes de I3D
Fuente: Diapositiva Temario Tecnologías de Fabricación Comillas ICAI

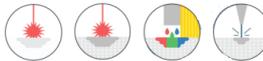
Por último, se ha de destacar la idea de los **soportes en la FA**, que, dependiendo de la orientación estratégica de la pieza, se puede reducir significativamente los costos de material y mano de obra al eliminarlo más tarde cuando esta ya este impresa. Por esta misma razón, las piezas que sean impresas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

2.4 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 de la tija *optimizada refinada y rellena de lattice*, haciendo uso de la máquina “HP MJF”.

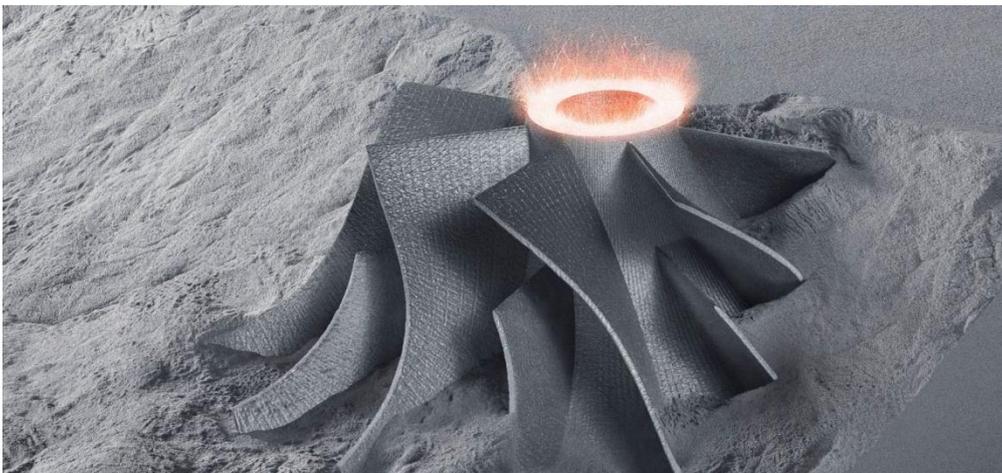


Figura 24 Fusión de lecho de polvo metálico.

Fuente: trumpf.com

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+*”

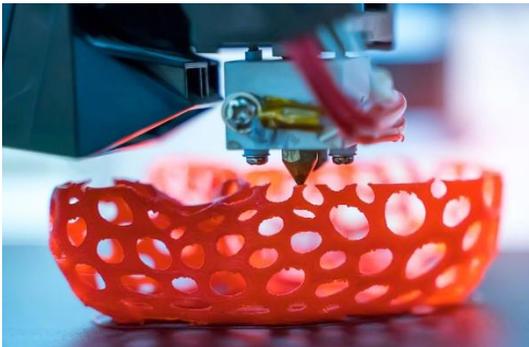


Figura 25 Ejemplo de extrusion de material.

Fuente: megalux.es

La estereolitografía (SLA) es una tecnología de FA en la que se emplean resinas fotosensibles como material de partida. El proceso consiste en la solidificación capa por capa de la resina líquida mediante la acción de una fuente de luz (láser o proyector), que va definiendo la geometría de la pieza a medida que avanza la impresión. A diferencia de la fusión de lecho de polvo, en este caso la pieza se construye suspendida desde la parte superior del tanque, quedando como si colgara de la plataforma de impresión.

El material no solidificado permanece en estado líquido alrededor de la pieza, pero en este caso no actúa como soporte, por lo que es necesario añadir estructuras de soporte auxiliares para evitar deformaciones o desplazamientos durante la fabricación.[8]

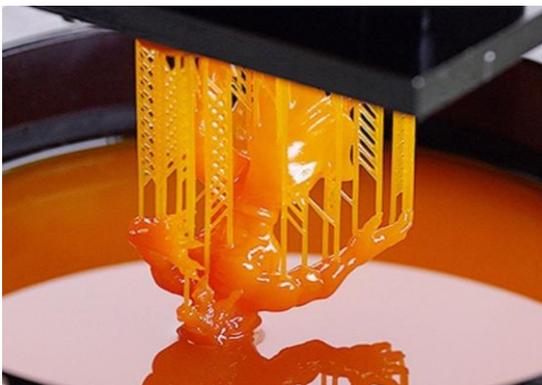


Figura 26 Ejemplo de estereolitografía

Fuente: 3Dnatives.com

3. DIAGRAMA DE FLUJO

Este capítulo tiene como objetivo diseñar un diagrama de flujo que optimice cada etapa del proceso de optimización del componente mecánico. Partiendo de un análisis comparativo de metodologías y diagramas de flujo ya existentes en el documento “*G-DfAM: a methodological proposal of generative design for additive manufacturing in the automotive industry*”, se va a proponer un diagrama de flujo que combine las mejores técnicas para cada fase de este: desde las especificaciones iniciales, pasando por las técnicas de optimización, hasta la aplicación de guías específicas de manufactura aditiva y el refinamiento final del diseño.

Con esta metodología, se espera crear un diagrama de flujo final sólido y flexible que se pueda adaptar a diferentes aplicaciones y necesidades en el diseño de piezas mediante herramientas avanzadas de diseño y fabricación.

A continuación se muestra el primer diagrama de flujo propuesto en el libro que estamos analizando: [9]

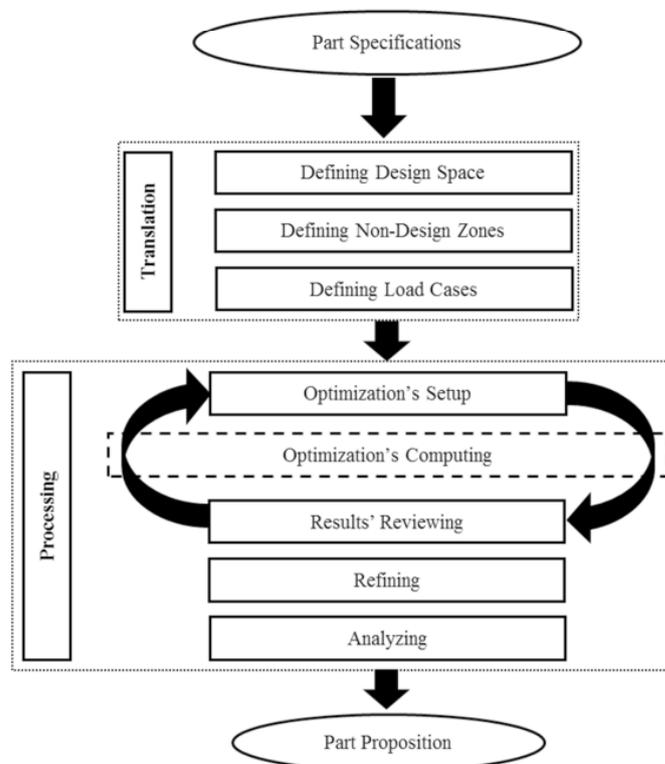


Figura 27 Diagrama de Flujo 1 propuesto en el libro.

Fuente: [9]

Por otro lado, en el libro también se muestra mas propuestas de diagramas de flujo, como segundo diagrama tenemos el mostrado en la Figura 28:

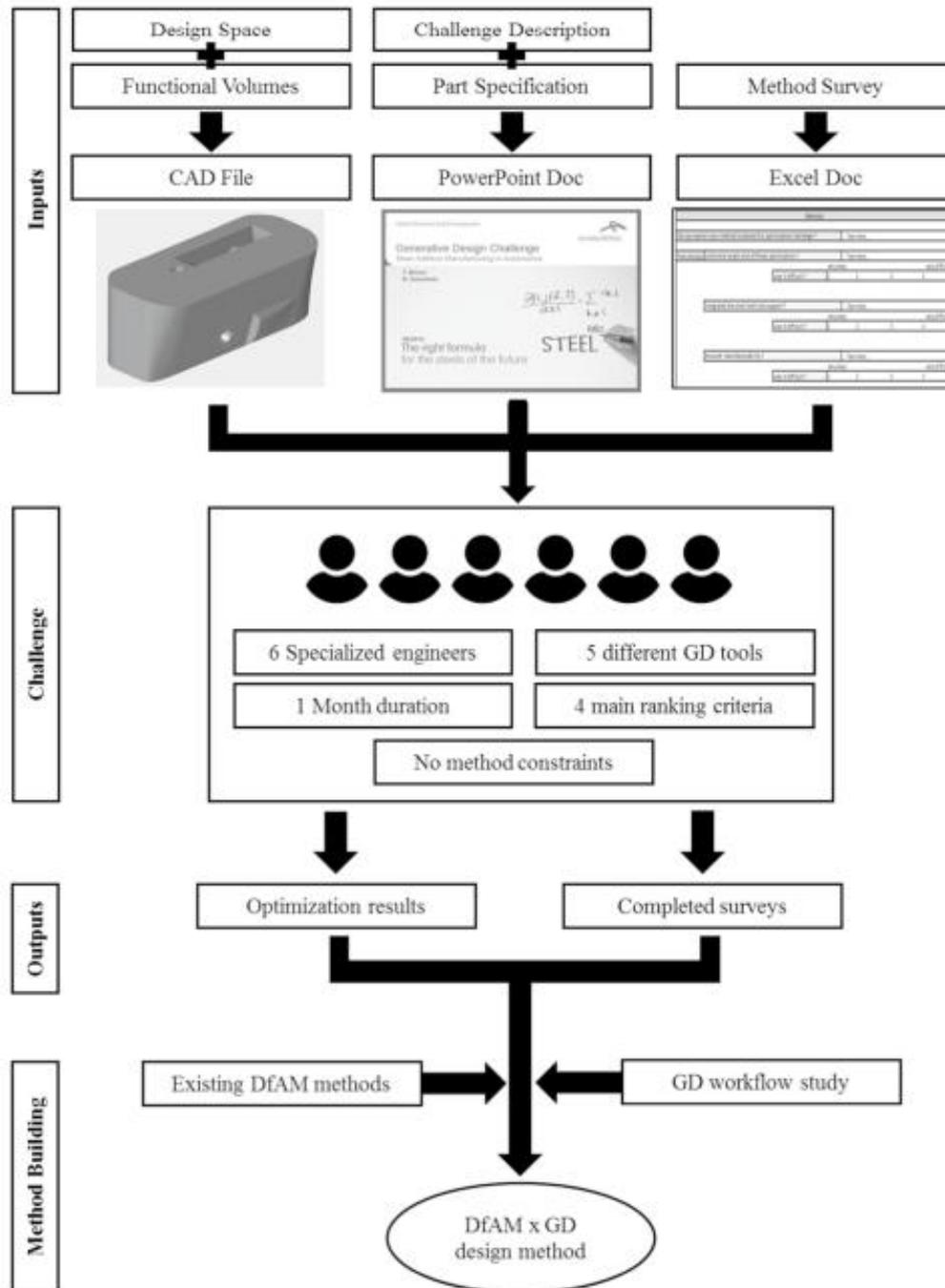


Figura 28 Diagrama de flujo 2 propuesto en el libro.

Fuente: [9]

Ambos diagramas representan procesos de optimización de diseño, pero tienen diferencias significativas en su enfoque y estructura.

El diagrama ilustra el proceso de optimización de una pieza, comenzando con las especificaciones iniciales que definen los requisitos básicos. En la fase de Traducción, se establece el espacio de diseño, se identifican las zonas no modificables y se definen los casos de carga que afectarán el comportamiento de la pieza. Con esta información, se pasa a la Configuración de la Optimización, donde se realiza el cálculo inicial para encontrar una solución óptima.

Los resultados obtenidos en esta fase se envían al Procesamiento, donde se revisan, refinan y ajustan para asegurarse de que cumplan con los requisitos del diseño. Este proceso es iterativo, lo que significa que los resultados refinados se devuelven a la Configuración de la Optimización para recalcular y mejorar aún más el diseño. Después de varias iteraciones de ajuste y recalcular, se obtiene una propuesta final que refleja el diseño optimizado, listo para su implementación o fabricación. Este enfoque asegura que el diseño final esté completamente ajustado a las especificaciones y restricciones establecidas al principio.

El segundo diagrama, por otro lado, describe un proceso más colaborativo y detallado, orientado a abordar un desafío de diseño generativo (DG) para desarrollar un método de diseño específico que combine principios de diseño para fabricación aditiva (DfAM) con técnicas de diseño generativo.

Este diagrama integra entradas específicas, como archivos CAD, especificaciones detalladas y encuestas de métodos, y cuenta con un equipo de ingenieros especializados que usan diversas herramientas de GD.

En conclusión, mientras que el primer diagrama es un proceso estándar y cíclico de optimización de diseño, el segundo es un proceso estructurado y multidisciplinario que involucra a un equipo y herramientas específicas para desarrollar un enfoque metodológico innovador.

Y, por último, tenemos un tercer diagrama de flujo propuesto en el libro, en donde en la parte lateral se muestra en detalle cada parte de este diagrama. Este diagrama es el mostrado en la Figura 29:

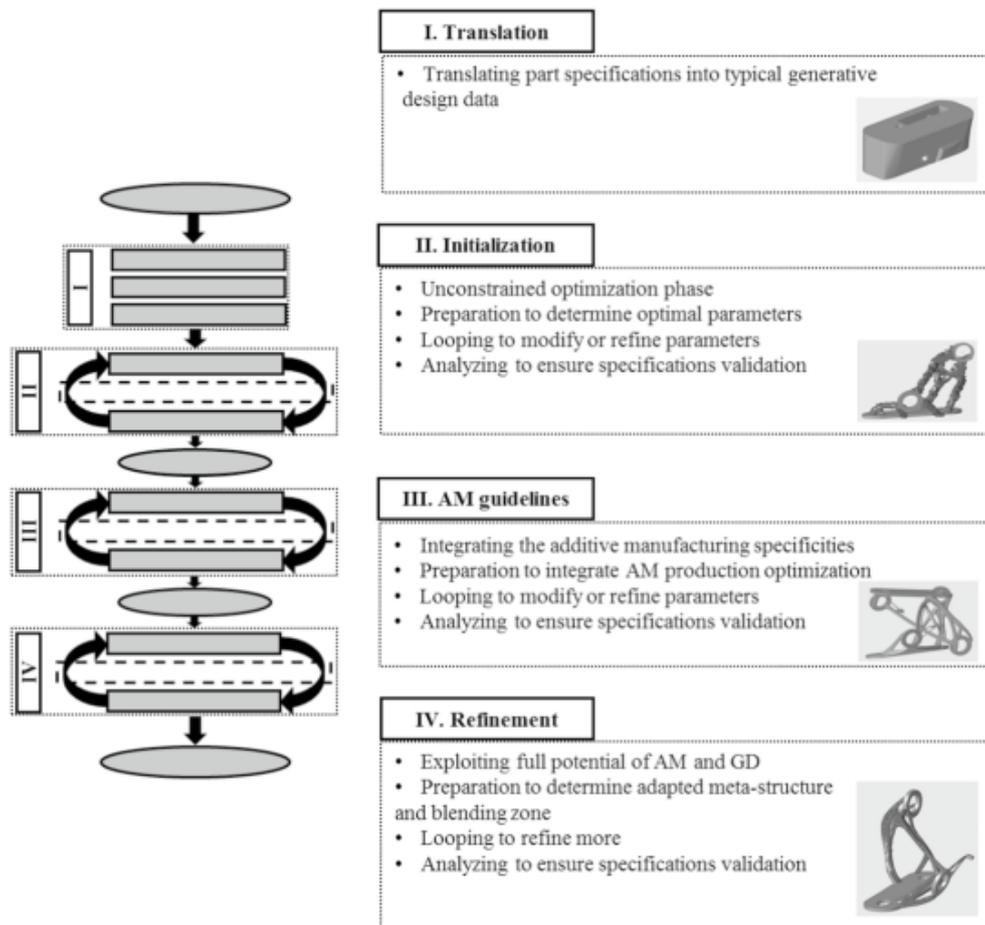


Figura 29 Diagrama de flujo 3 propuesto en el libro.

Fuente: [9]

Este tercer diagrama es una versión más detallada y estructurada del primer diagrama, con un enfoque adicional en la manufactura aditiva. A diferencia del segundo diagrama, que se centra en un desafío colaborativo y el uso de múltiples herramientas, este se focaliza en un flujo específico de refinamiento del diseño generativo y manufactura aditiva, mostrando un proceso continuo y especializado para cumplir con las especificaciones de diseño.

Tras analizar 3 diferentes diagramas de flujo propuestos en el libro y observando y analizando este cuarto diagrama de flujo propuesto por la Universidad Pontificia de Comillas ICAI (Figura 30), podemos combinar todas las ideas vistas y realizar un diagrama de flujo optimo que indique todas las fases de este proyecto y programas y restricciones a tener en cuenta.

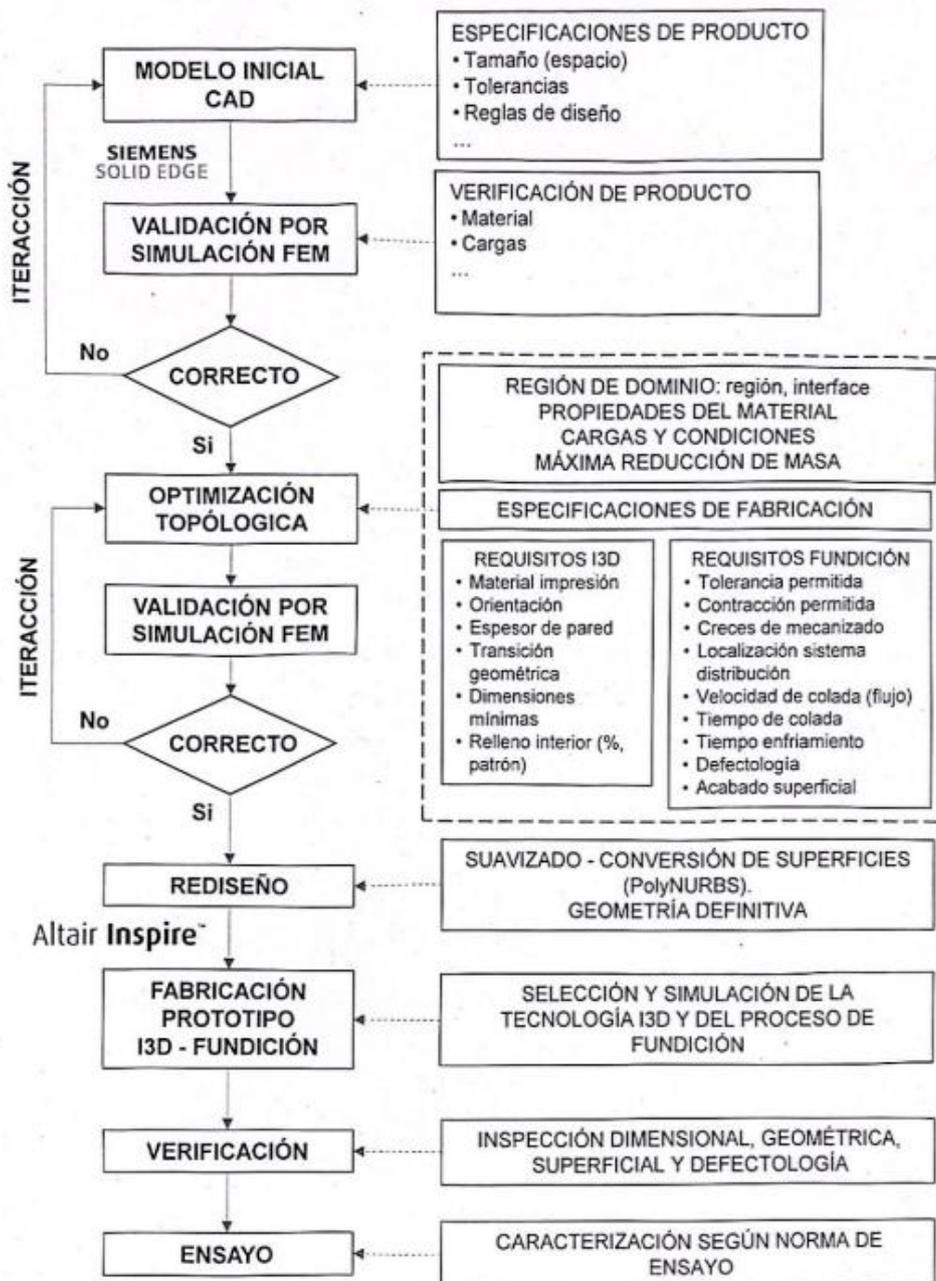
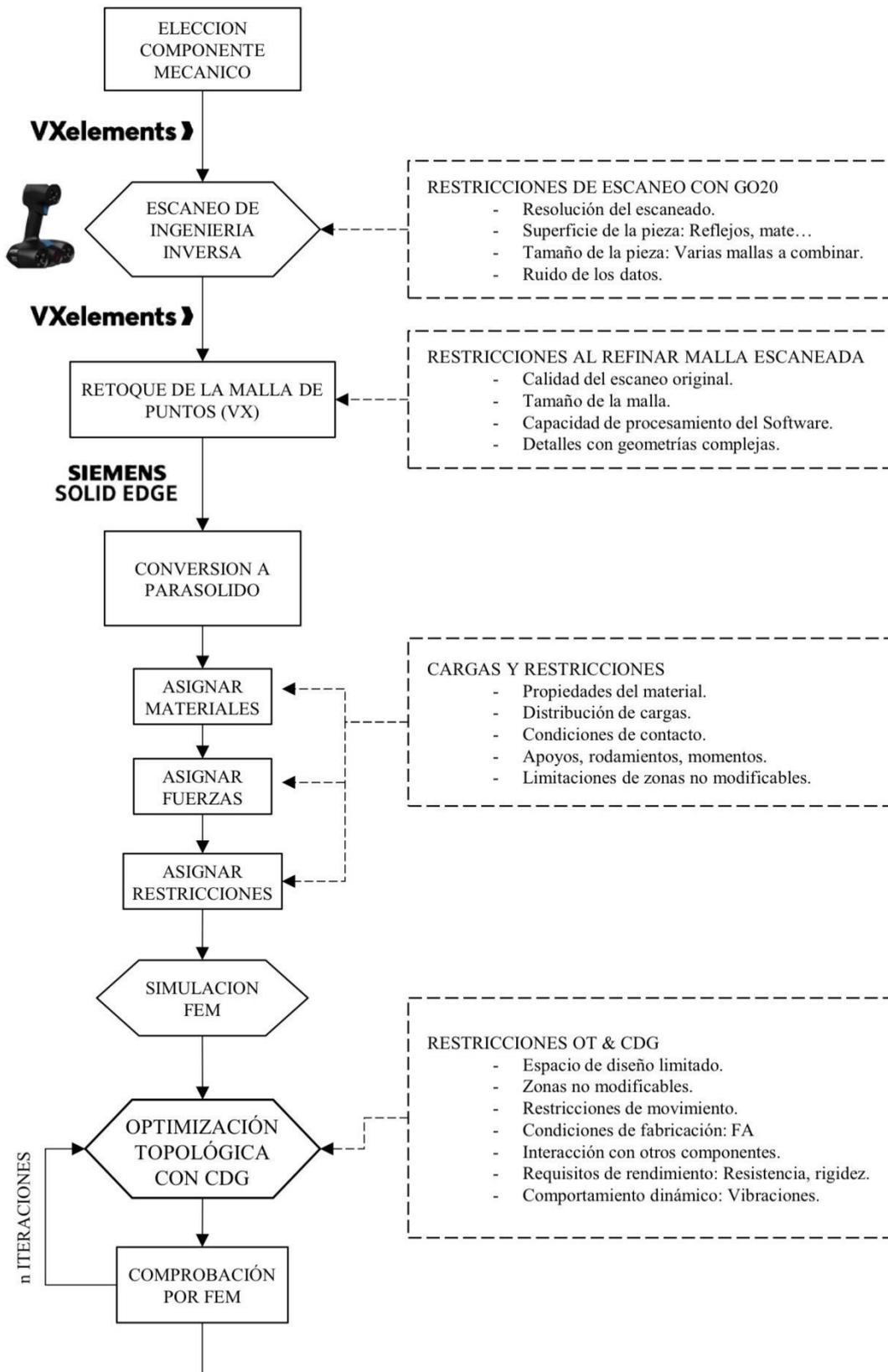


Figura 30 Diagrama de flujo propuesto por ICAI.

Fuente: ICAI

Siendo el diagrama el siguiente:



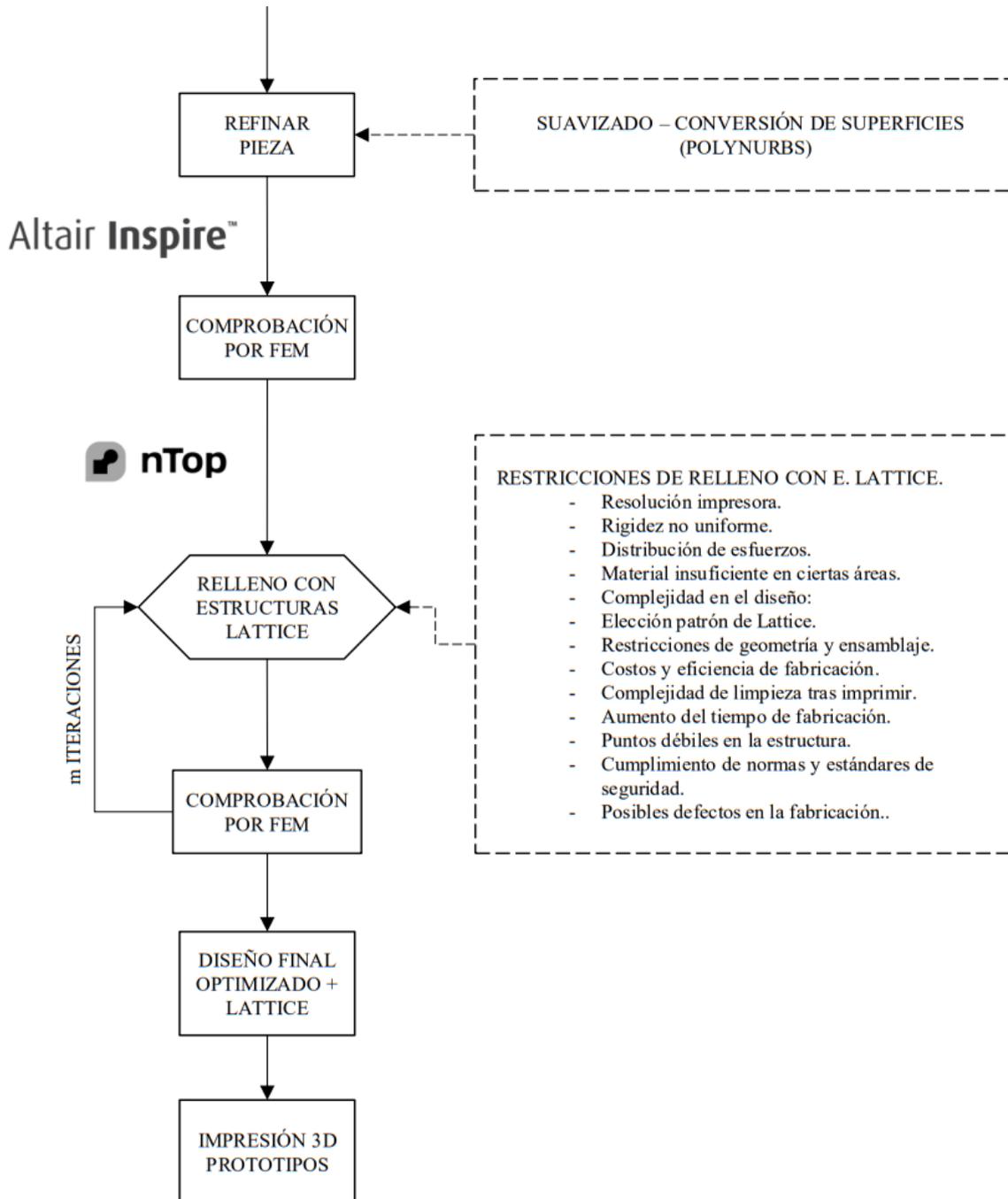


Figura 31 Diagrama de flujo definitivo del proyecto.

Fuente propia

4. ELECCIÓN DE COMPONENTE MECÁNICO

Para llevar a cabo este proyecto final de máster, se ha escogido la tija superior de una motocicleta Yamaha FZR como componente mecánico a optimizar.

La tija de una motocicleta es un componente clave que conecta las horquillas (la parte delantera de la suspensión de la moto) con el chasis de la moto. Además de esta función de sujeción, la tija también actúa como el punto de rotación de la dirección, permitiendo que la rueda delantera gire al girar el manillar.



*Figura 32 Tija superior de una Yamaha FZR.
Fuente propia*

Las tijas deben tener la capacidad de resistir tanto cargas estáticas como cargas dinámicas considerables, particularmente durante las operaciones de giro. Específicamente, deben resistir las fuerzas producidas al inclinar la moto en las curvas.

El diseño de las tijas consta de tres agujeros fijos que se relacionan con la triangulación entre las dos botellas de suspensión y la pipeta de orientación. Estos tres puntos de fijación son esenciales, puesto que deben mantenerse estables y sus diámetros no pueden variar, dado que están establecidos por las horquillas y los rodamientos de dirección. Cualquier modificación en estos aspectos podría poner en riesgo la compatibilidad con otros elementos y perjudicar el rendimiento de la moto.

Además, es crucial la rigidez estructural de las tijas para garantizar una estabilidad elevada de la moto a velocidades elevadas y durante las curvas. La rigidez en este elemento no solo contribuye a preservar la estabilidad del conjunto, sino que también evita cualquier tipo de flexión no deseada que pueda producirse.

Las tijas son elementos esenciales en el sistema de suspensión y dirección de una motocicleta, pues vinculan la horquilla frontal con el armazón, facilitando el movimiento y la estabilidad del conjunto frontal. Están formados por una tija superior y una inferior, vinculadas a la columna de dirección a través de rodamientos que permiten un movimiento preciso y suave del manillar.

Su diseño y los materiales utilizados en su fabricación tienen un impacto directo en el comportamiento de la motocicleta, puesto que deben resistir las fuerzas producidas durante el manejo y asegurar una dirección exacta. Estas partes pueden ser producidas en aluminio o aleaciones de gran resistencia para disminuir el peso sin afectar la rigidez de la estructura.

Las tijas se encargan de sujetar las barras de la horquilla al armazón, absorbiendo las fuerzas generadas por la moto y la frenada. Su diseño tiene un impacto directo en la resistencia y flexibilidad del conjunto, factores esenciales para la estabilidad y el rendimiento de la motocicleta bajo distintas circunstancias.

Según su estructura, pueden ser más firmes para asegurar una conducción estable a velocidades elevadas o admitir un cierto nivel de flexión lateral para potenciar la maniobrabilidad. Un diseño demasiado estricto puede transmitir vibraciones excesivas al piloto, disminuyendo la sensación de control y confort, mientras que un control de la flexibilidad facilita una adaptación más efectiva al terreno y a las fuerzas laterales en curvas.[10]

5. INGENIERÍA INVERSA

5.1 ESCANEEO DEL COMPONENTE

Para empezar con el escaneo, es importante preparar bien la mesa de trabajo, organizando tanto el escáner como las plataformas giratorias y las pegatinas que vamos a utilizar. Este proceso de preparación asegura que el escaneo de la pieza a analizar sea lo más preciso posible.

El primer paso es colocar las pegatinas en la pieza y, tras colocarlas, la colocamos en la plataforma giratoria. Estas pegatinas son esenciales porque ayudan al software de escaneo a reconocer diferentes puntos en la pieza, lo que facilita que el escaneo capture la forma completa y los detalles sin perder precisión. Las pegatinas le permiten al escáner "orientarse" y seguir la estructura de la pieza mientras rota o cambia de posición, logrando así un modelo más completo y exacto.



Figura 33 Disposición de las pegatinas de posición.

Fuente propia

También es importante aplicar un spray en la superficie de la pieza para reducir los brillos. Este spray elimina los reflejos que pueden causar problemas al láser del escáner, asegurando que la luz del escáner se registre de forma clara y sin interferencias de brillo.



Figura 34 Componente mecánico a optimizar junto al spray especial para escaneo.

Fuente propia

Con esta preparación, el escáner podrá trabajar de manera más efectiva, capturando un modelo digital detallado y fiel a la pieza original.

Para obtener un modelo completo y preciso de la pieza, hemos realizado tres escaneos distintos: dos para capturar la cara superior de la pieza y uno para la cara inferior.

Una vez obtenidas estas tres nubes de puntos, procedemos a trabajar con el software **VXmodel** (después de usar **VXscan** para la captura inicial). En **VXmodel**, combinamos las tres nubes de puntos generadas a partir de los escaneos para crear una malla unificada de la pieza.

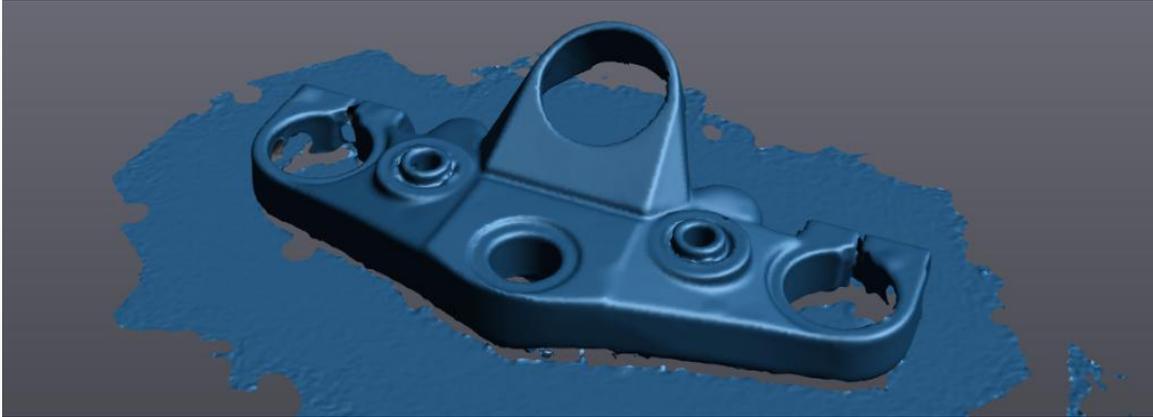


Figura 35 Detalle del escaneo de la parte inferior de la pieza.

Fuente propia

El objetivo es obtener una malla lo más optimizada posible, que conserve fielmente las características de la pieza y facilite su modificación en **Solid Edge**.

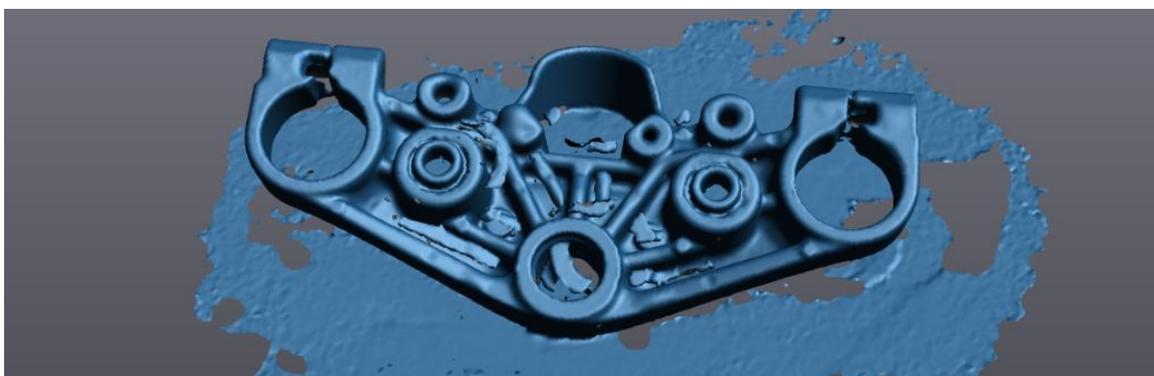
Las nubes de puntos obtenidas son las respectivas Figura 36, Figura 37 y Figura 38.



*Figura 36 Nube de puntos original 1.
Fuente propia*



*Figura 37 Nube de puntos original 2.
Fuente propia*



*Figura 38 Nube de puntos original 3.
Fuente propia*

5.2 LIMPIEZA GENERAL A CADA NUBE DE PUNTOS

A continuación, procederemos a limpiar cada uno de los escaneos de forma individual. Primero, eliminaremos el suelo que aparece en las nubes de puntos, ya que no forma parte de la pieza que estamos modelando. Luego, eliminaremos cualquier elemento suelto o ruido que haya quedado en los escaneos, como reflejos o residuos.

Una vez que hayamos quitado estos elementos, revisaremos cada escaneo para asegurarnos de que solo permanezcan los datos relevantes de la pieza. Este proceso es clave para garantizar que la malla final sea precisa y libre de interferencias.

A través de la herramienta de selección de *Connect*, seleccionamos el cuerpo del suelo y lo eliminamos, dejando solo las parte correspondientes a la parte superior de la pieza.

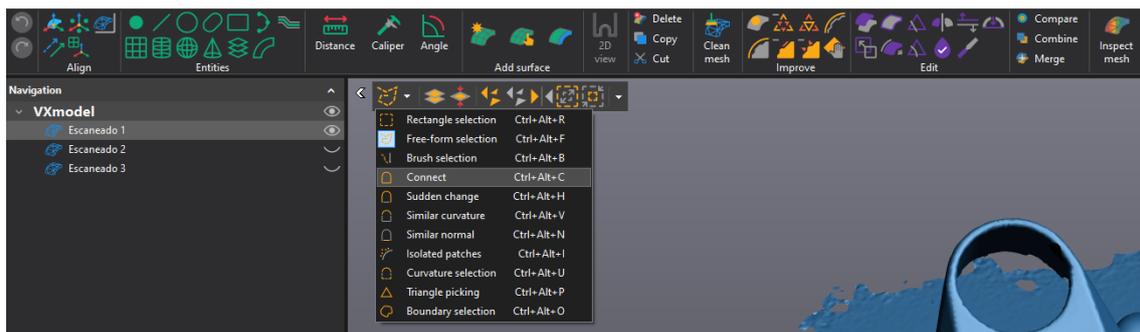


Figura 39 Detalle de la herramienta *Connect*.

Fuente propia

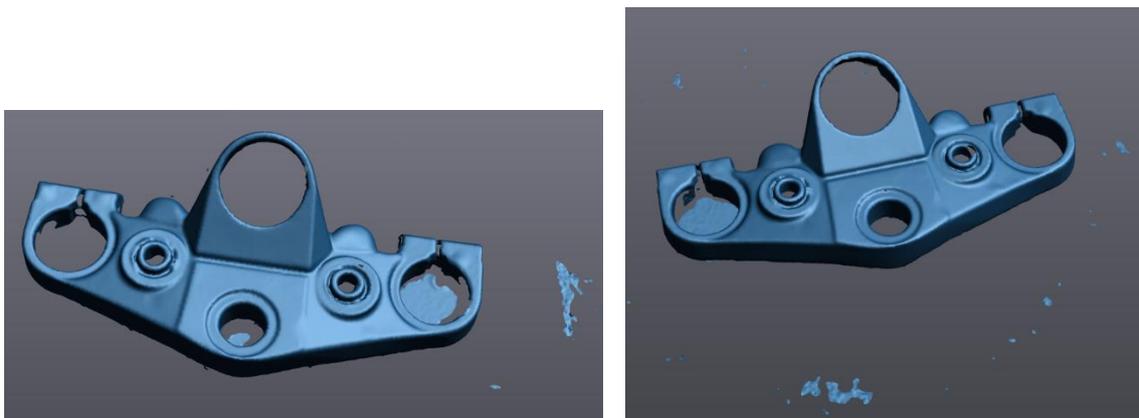


Figura 40 Detalle de las mallas de puntos 1 y 2 tras usar la herramienta *Connect* y quitar el suelo.

Fuente propia

Para la tercera nube de puntos, dado que el suelo está conectado a la pieza, utilizaremos una herramienta de selección diferente. Esta herramienta nos permitirá seleccionar solo el suelo y eliminarlo sin afectar la pieza.

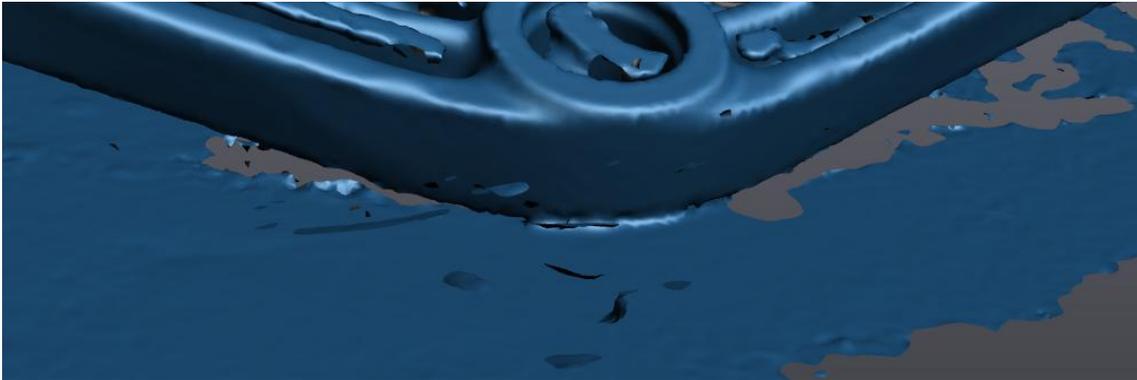


Figura 41 Detalle de la conexión pieza-suelo en la malla de puntos 3.

Usaremos la herramienta de *Freeform Selection* para seleccionar la conexión suelo-pieza, como se muestra en la **Error! Reference source not found.** De esta manera, al suprimir lo seleccionado, el suelo se separará de la pieza, lo que facilitará su eliminación de forma mucho más sencilla.

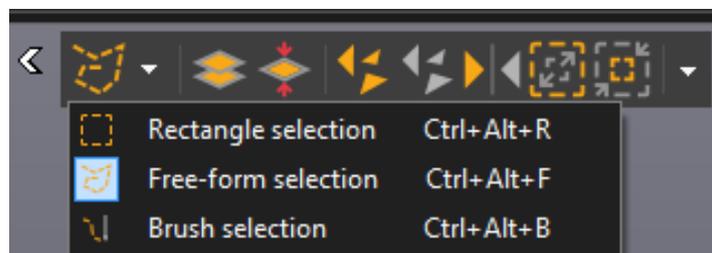


Figura 42 Detalle herramienta de selección *Freeform*.
Fuente propia

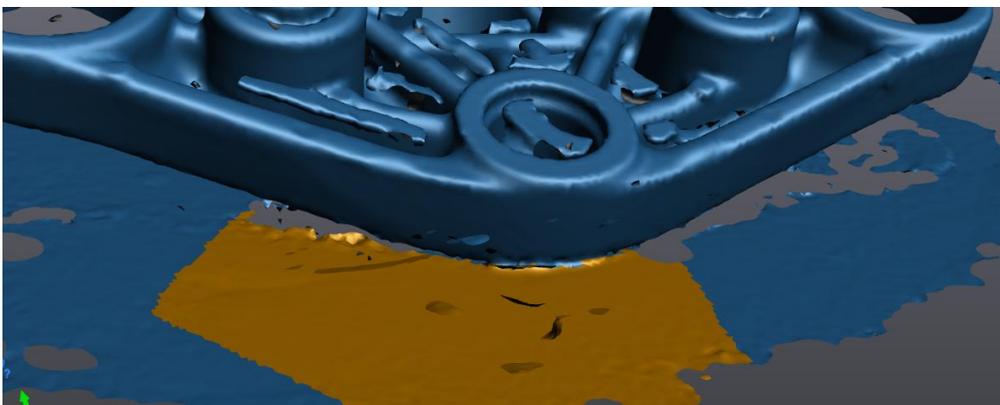


Figura 43 Detalle de la selección suelo-pieza.
Fuente propia

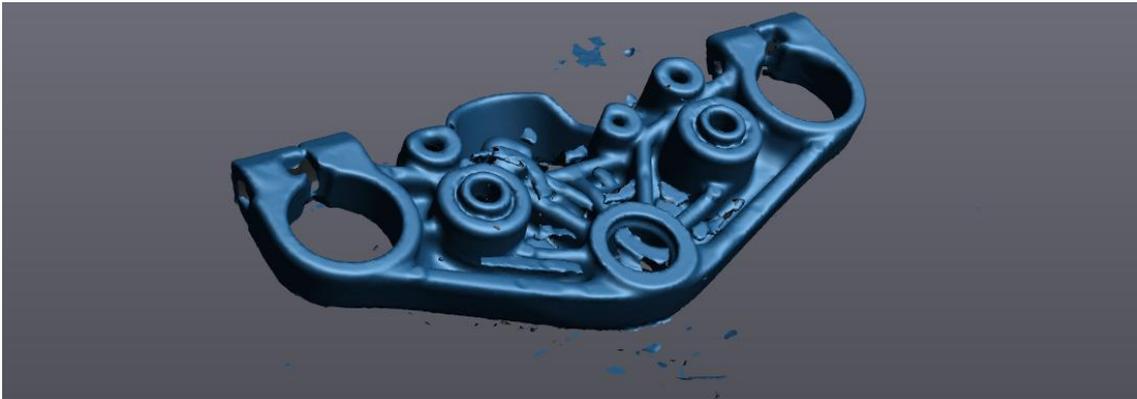


Figura 44 Detalle de la malla de puntos 3 tras la eliminación del suelo.

Fuente propia

A continuación, una vez las tres nubes de puntos ya no tienen el suelo, procederemos al siguiente paso de limpieza y refinado de las mallas. Utilizaremos la herramienta de *Isolated Patches* para eliminar todos los puntos aislados o "flotantes" en el aire, que no forman parte de la pieza. Esta herramienta nos permitirá seleccionar y suprimir de manera eficiente esos puntos no deseados.



Figura 45 Detalle de la herramienta de selección de *Isolated patches* en la malla de puntos 3.

Fuente propia

Tras realizar el paso de limpieza con *Isolated Patches*, utilizamos el último paso de limpieza general para las mallas: *Clean Mesh*. Esta herramienta realiza un análisis en profundidad de toda la nube de puntos, identificando imperfecciones que no son visibles a simple vista en la pieza.

El software corrige automáticamente estas imperfecciones, reduciendo el ruido y mejorando la calidad de la malla de manera eficiente. Esto asegura que la malla final esté lo más limpia y precisa posible antes de continuar con el siguiente proceso.

Otra herramienta de limpieza es la siguiente:

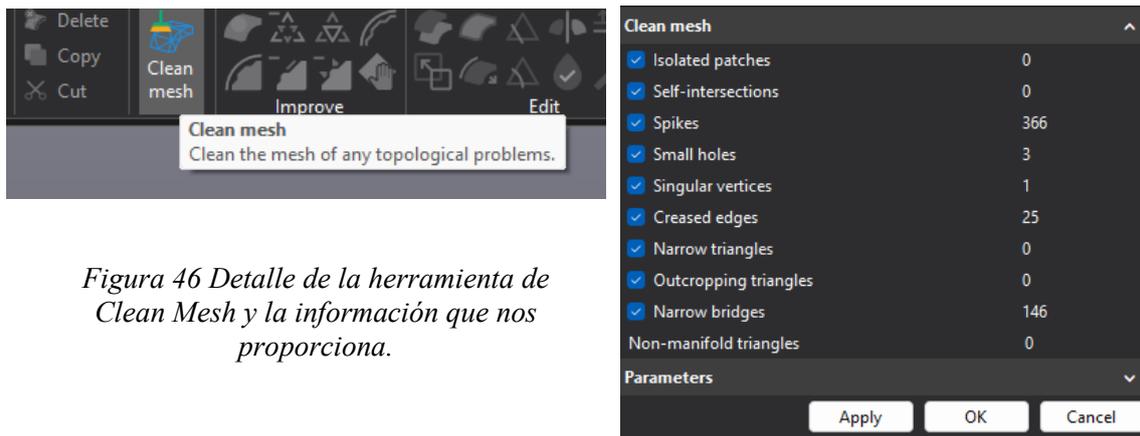


Figura 46 Detalle de la herramienta de Clean Mesh y la información que nos proporciona.

Fuente propia

Tras realizar la limpieza general, obtenemos las tres mallas de puntos ya refinadas de forma separada. Ahora, el siguiente paso es unificar y combinar estas mallas para crear una malla final óptima. Este proceso de fusión nos permitirá integrar las tres nubes de puntos en una sola, asegurando que la pieza esté representada de la forma más precisa posible antes de continuar con su modelado y ajustes.

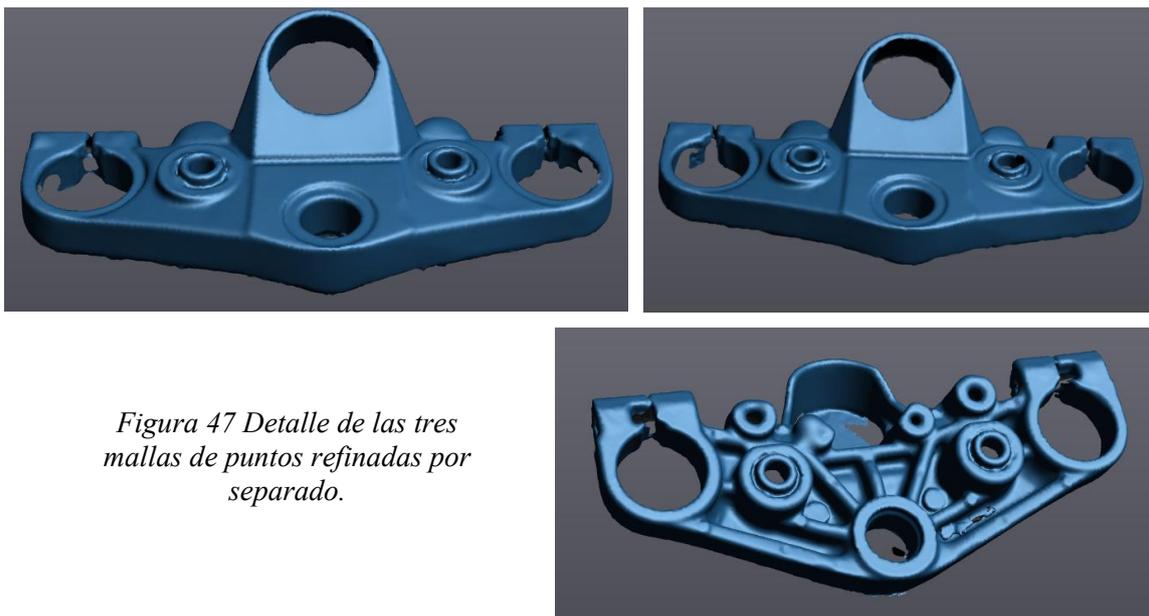


Figura 47 Detalle de las tres mallas de puntos refinadas por separado.

Fuente propia

5.3 CREACIÓN DE ENTIDADES PARA ALINEAMIENTO

Aunque aún queden algunos ajustes por realizar, después de la limpieza general, el siguiente paso será combinar los tres escaneos utilizando *entidades*. Estas entidades nos permitirán establecer puntos de referencia para alinear las tres nubes de puntos entre sí y fusionarlas correctamente. Este proceso es esencial para garantizar que las nubes de puntos se integren de forma precisa y se alineen de manera adecuada, lo que facilitará la creación del modelo final.

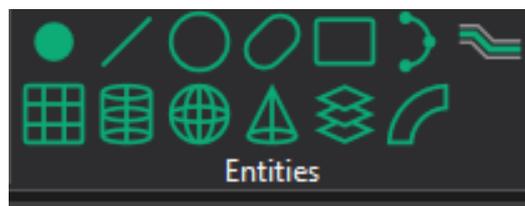


Figura 48 Detalle de las herramientas de creación de entidades.
Fuente propia

Las dos primeras entidades comunes que vamos a crear serán dos puntos: uno en la parte superior y otro en la parte inferior de la pieza, ubicados en la zona media de ambas partes. Estos puntos se establecerán en las tres nubes de puntos para asegurar que todas ellas se alineen correctamente en esas áreas específicas.

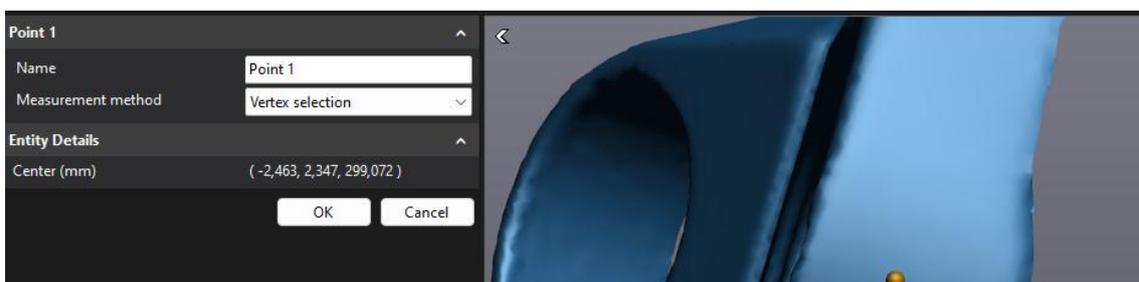


Figura 49 Punto 1: Parte inferior malla 1.
Fuente propia

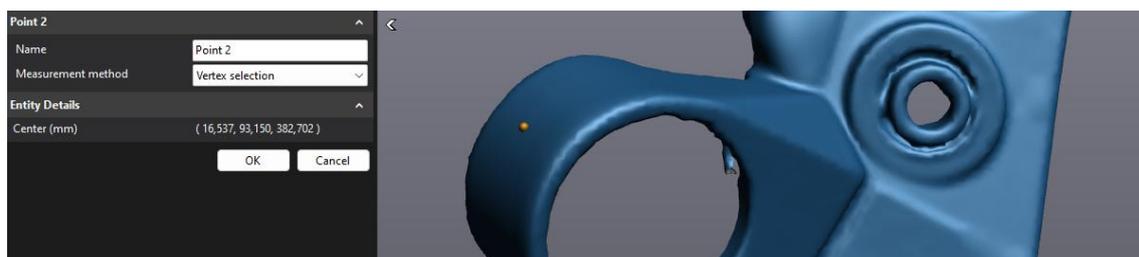


Figura 50 Punto 2: Parte superior malla 1.
Fuente propia

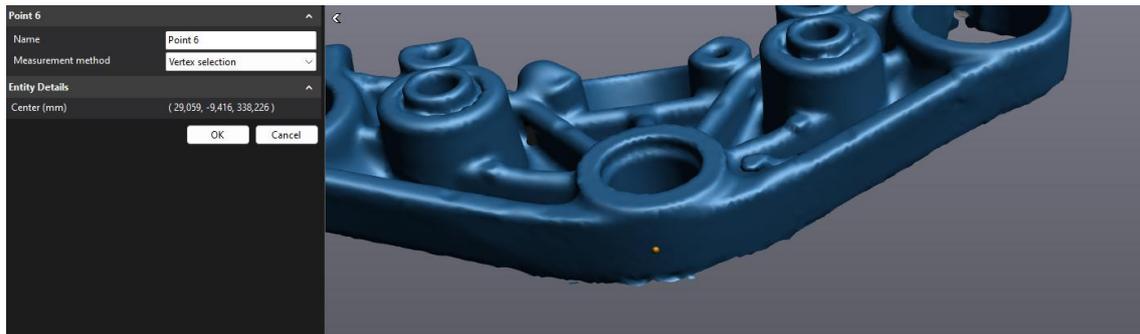


Figura 52 Punto 6: Parte inferior malla 3.

Fuente propia

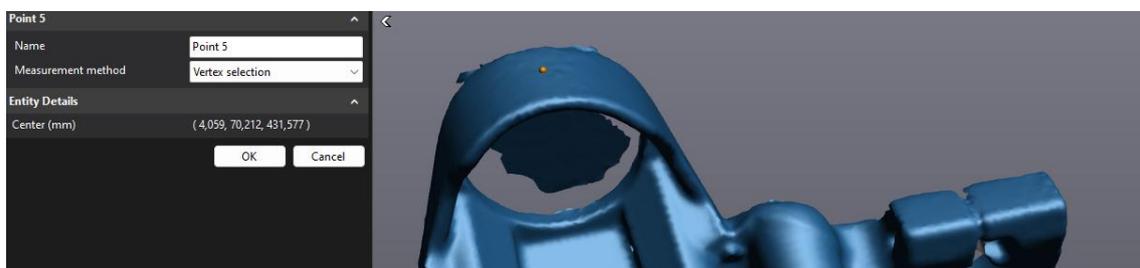


Figura 51 Punto 5: Parte superior malla 3.

Fuente propia

También crearemos las entidades correspondientes a los *cilindros* en los agujeros laterales de la pieza. Estos cilindros servirán como entidades de referencia adicionales para facilitar el alineamiento de las nubes de puntos. Al identificar estos elementos, podremos alinear las mallas de forma más sencilla y precisa en el siguiente paso del proceso.

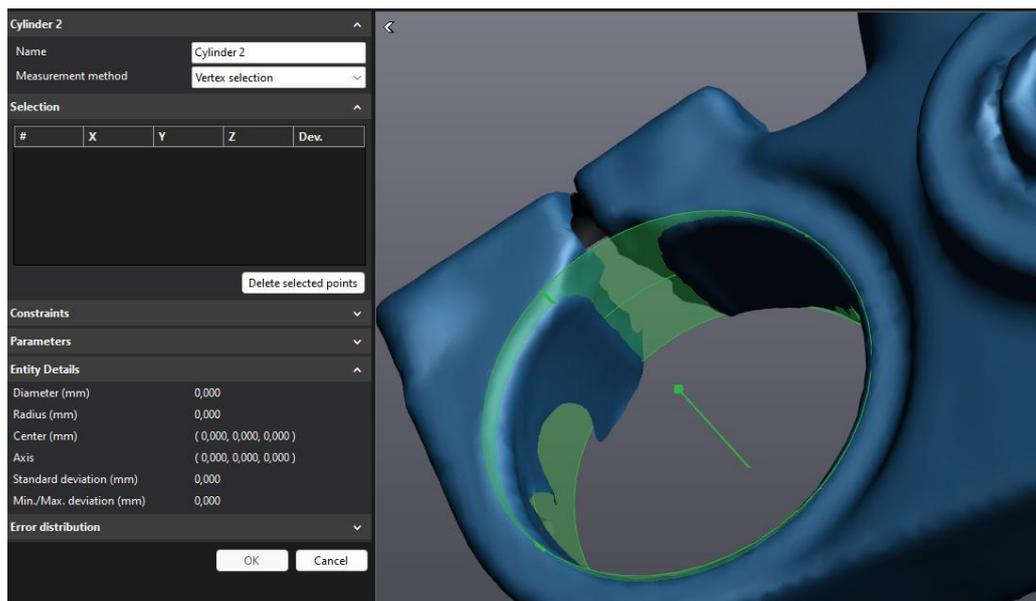


Figura 53 Cilindro 1: Cilindro lateral izq de la nube de puntos 1.

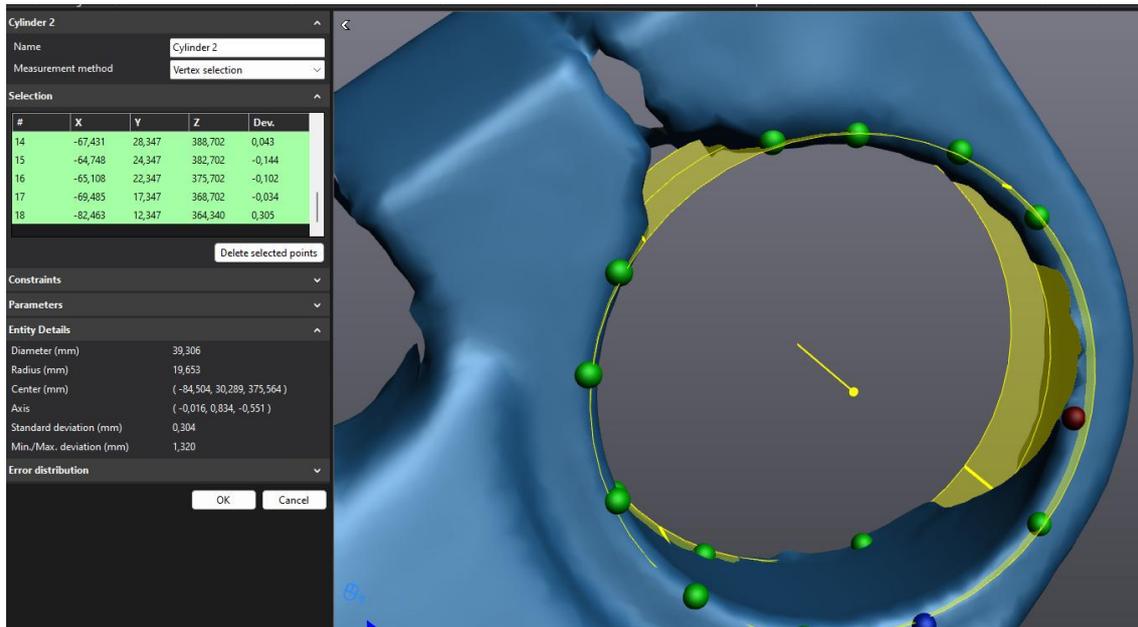


Figura 54 Cilindro 2: Cilindro Lateral derecho de la nube de puntos 1.

Fuente propia

Una vez que hemos creado las entidades en las tres nubes de puntos, procederemos a alinearlas. Para las dos nubes que se corresponden a la superficie superior (Escaneado 1 y Escaneado 2), utilizaremos la herramienta *best fit*, ya que estas nubes de puntos son muy similares entre sí.

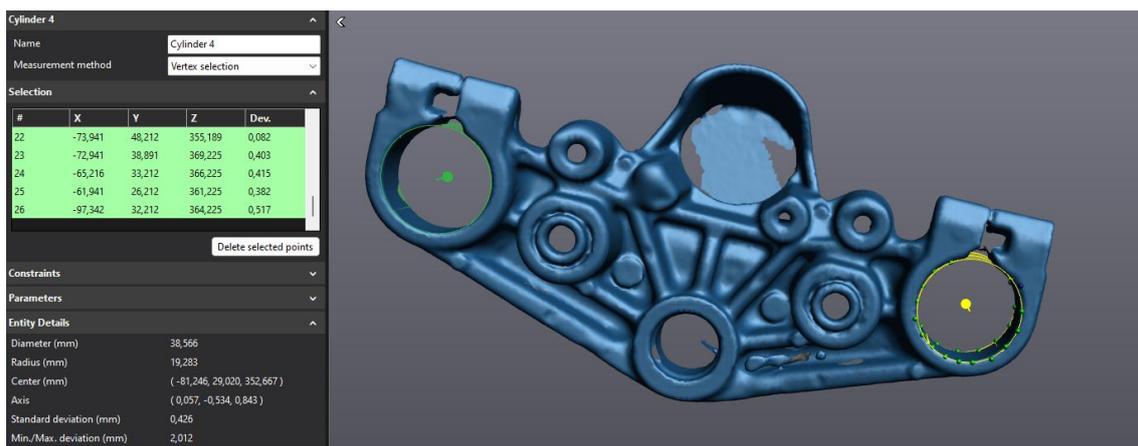


Figura 55 Cilindros 3 y 4: Cilindros de la nube de puntos 3.

Fuente propia

Esta herramienta es la más eficaz para lograr una alineación precisa, ya que ajusta automáticamente los dos escaneados para que coincidan lo mejor posible.

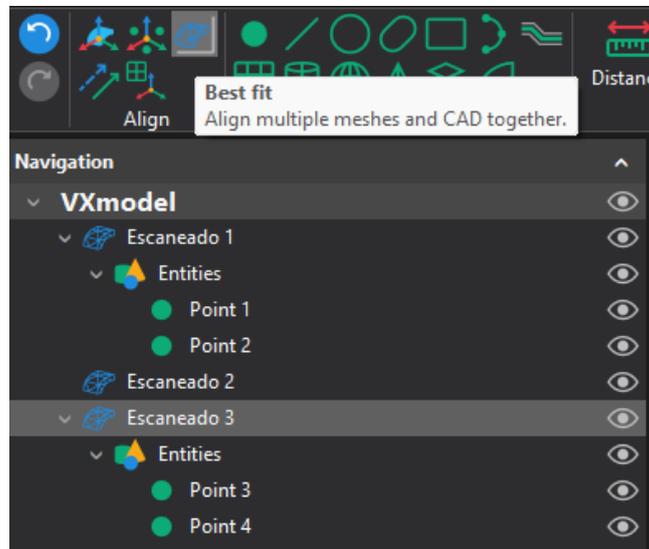


Figura 56 Detalle de la herramienta BestFit.

Fuente propia

La nube fija será la primera nube de puntos y la nube móvil será la segunda. Al ser muy similares entre sí, el software realizará automáticamente la combinación de estas dos mallas.

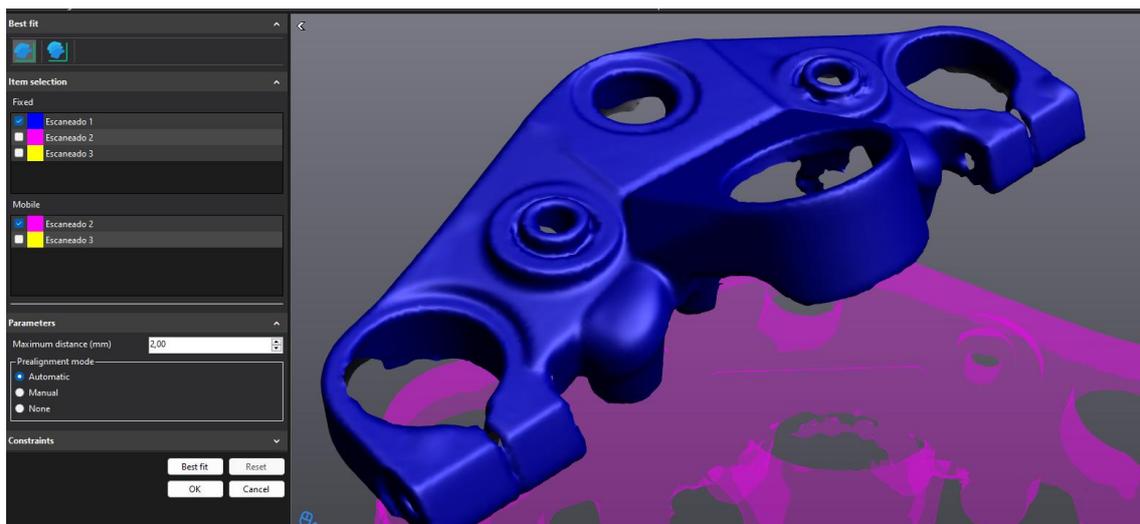


Figura 57 Azul es nube fija y rosa nube movil.

Fuente propia

Siendo la Figura 58 el resultado de la combinación automática de las dos mallas superiores.

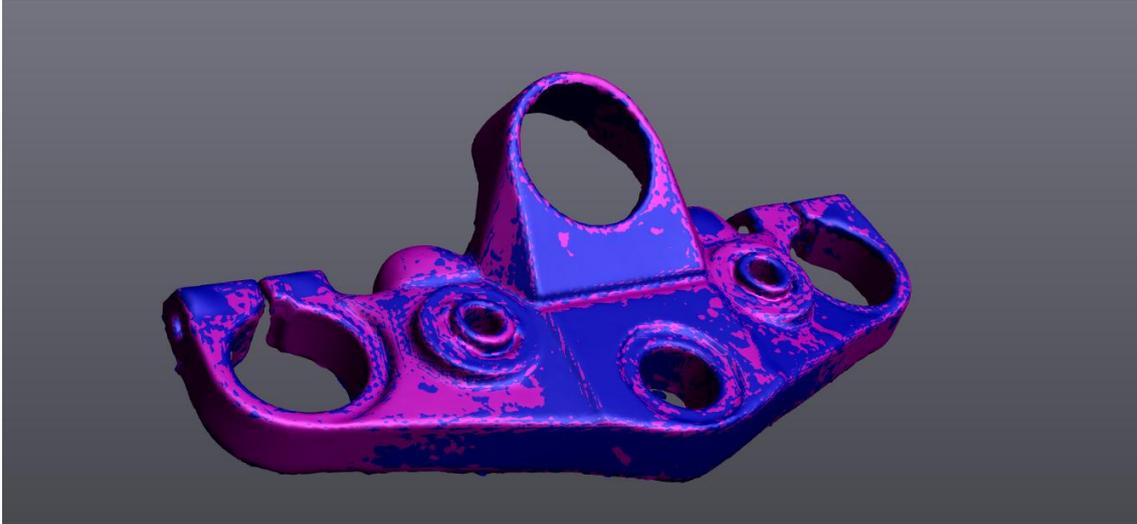


Figura 58 Fusión de la nube de puntos 1 y 2.

Fuente propia

Sin embargo, para la tercera nube de puntos, que corresponde a la parte inferior de la pieza, la alineación automática es más complicada. Esto se debe a que el programa tiene dificultades para identificar las partes comunes de la parte inferior y superior de la pieza en los distintitos escaneados. Por esta razón, será necesario aplicar el método de alineación a través de entidades.

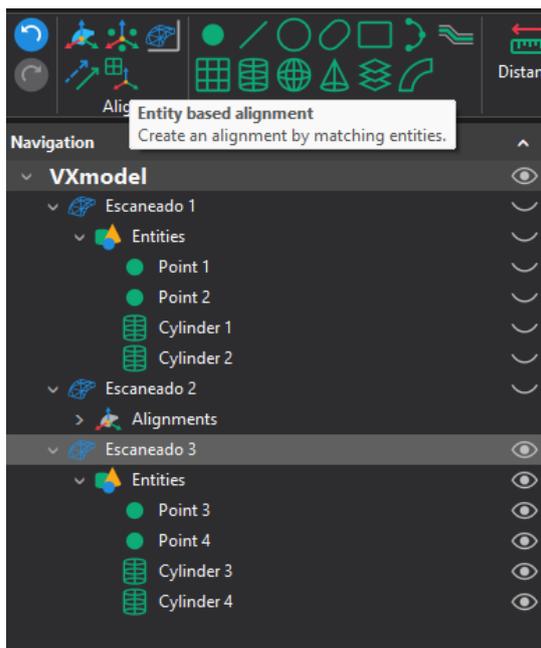


Figura 59 Detalle de la herramienta Entity Based Alignment junto a las entidades creadas.

Fuente propia

Por lo tanto, usando la alineación de los dos puntos según se muestra en la Figura 60, y la alineación de los cilindros según lo mostrado en la Figura 61:

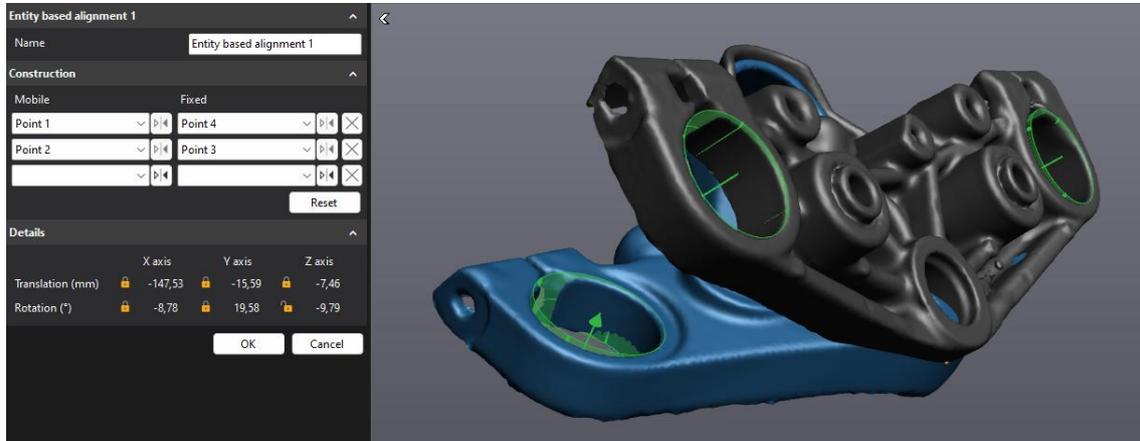


Figura 60 Detalle del alineamiento por la entidad puntos.

Fuente propia

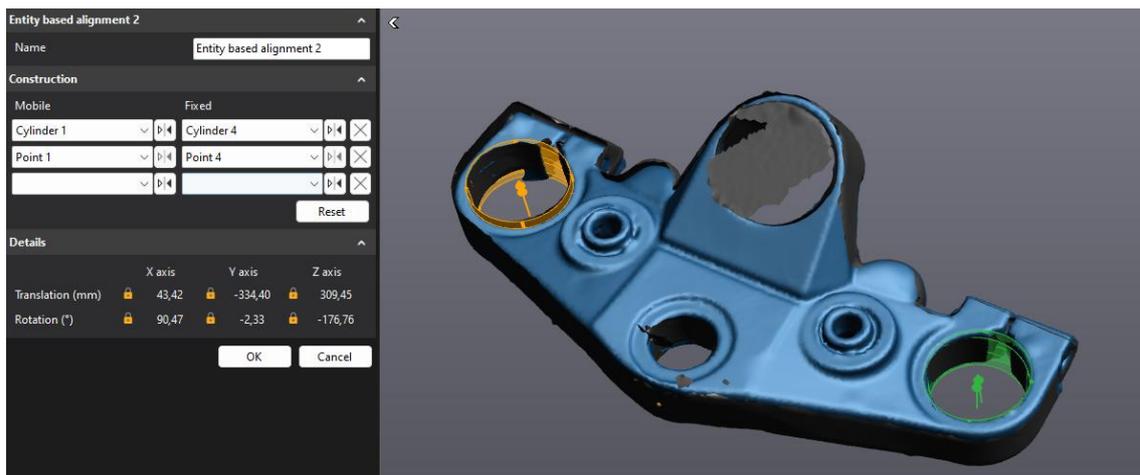


Figura 61 Detalle del alineamiento por la entidad cilindros.

Fuente propia

Tras alinear las tres nubes de puntos, procedemos a eliminar cualquier resto de suciedad o ruido presente en la nube de puntos obtenida, a través de herramientas ya mencionadas y explicadas en este capítulo, obteniendo el alineamiento de las tres nubes mostrado en la **Error! Reference source not found. y Error! Reference source not found. .**

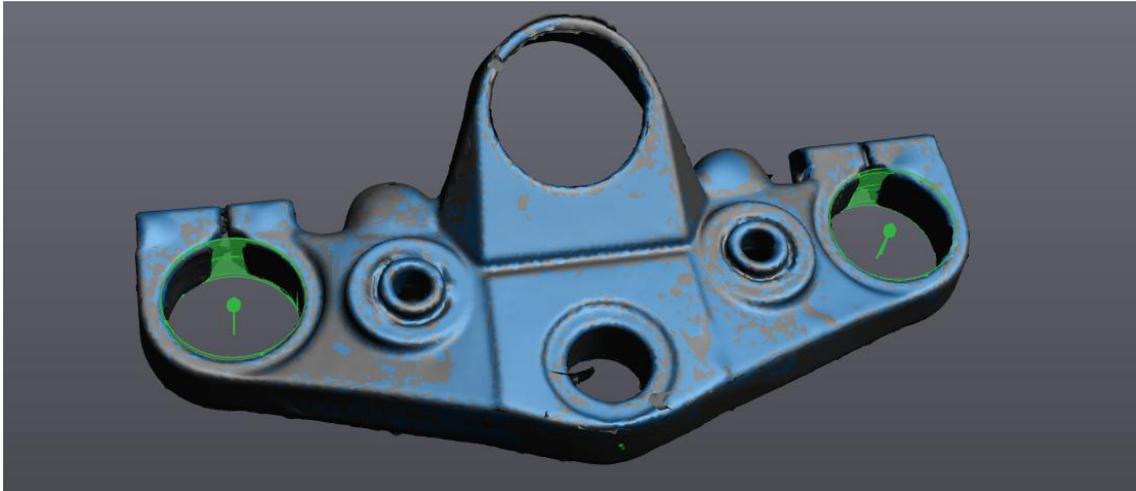


Figura 63 Alineamiento final parte superior.

Fuente propia

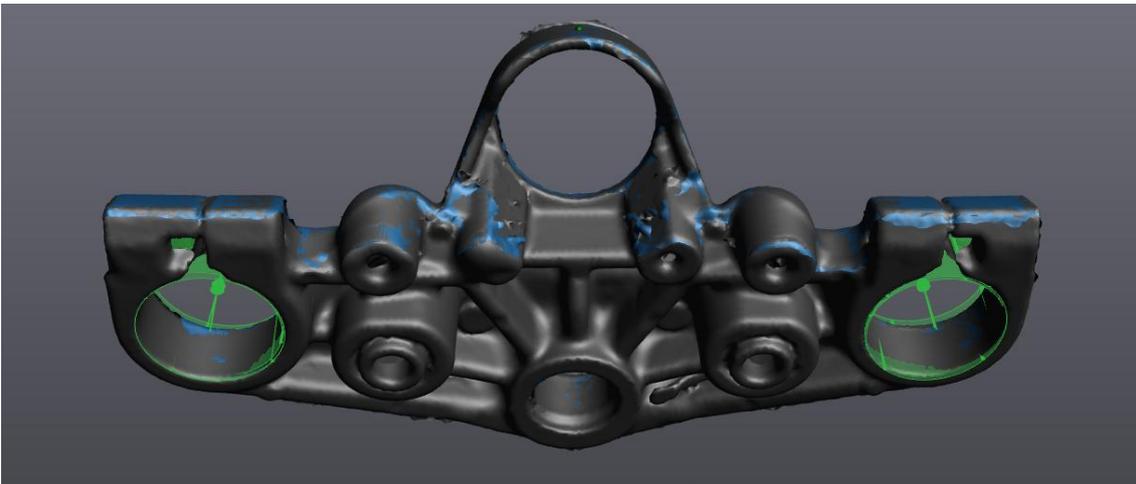


Figura 62 Alineamiento final parte inferior.

Fuente propia

A continuación, procedemos a *fusionar* las tres nubes de puntos, ya alineadas entre sí.

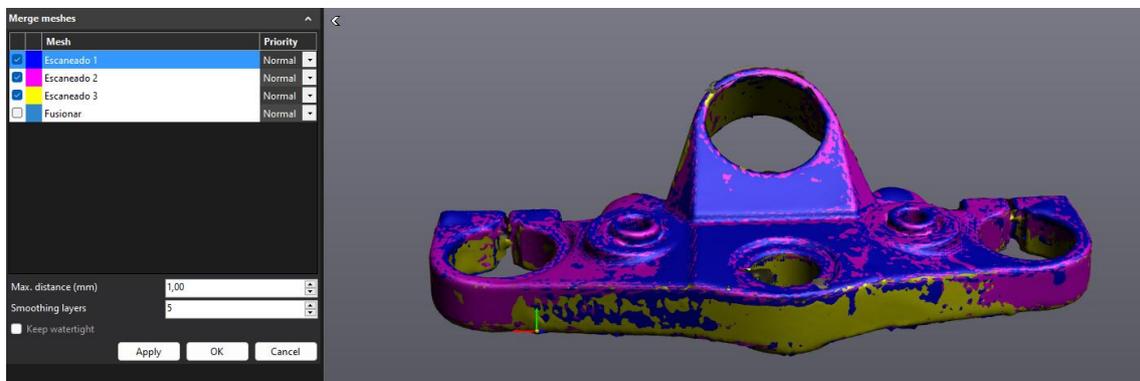
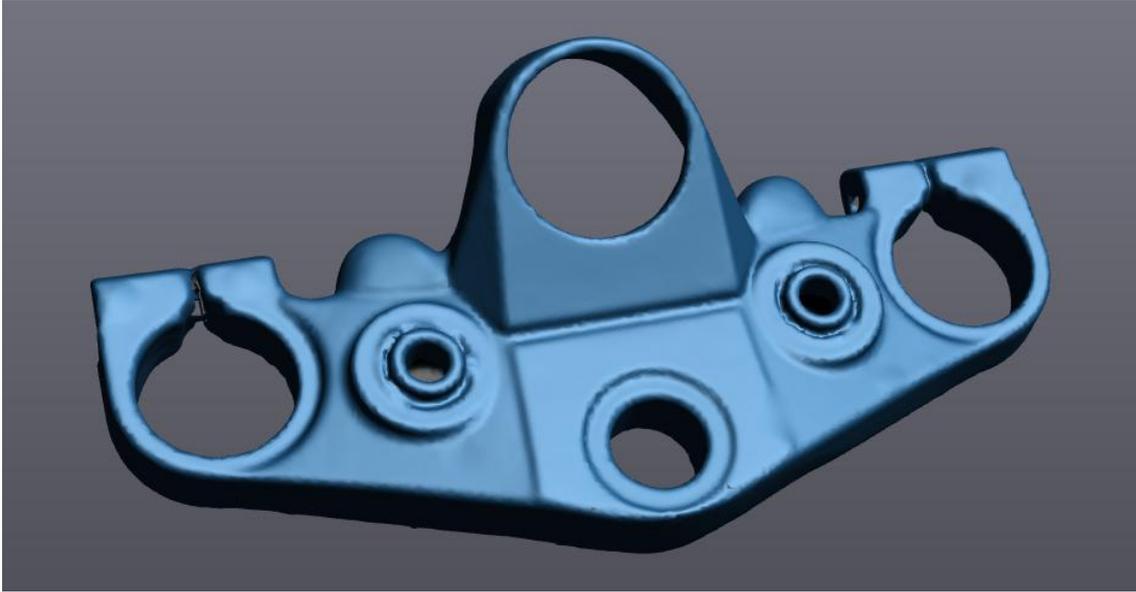


Figura 64 Detalla de la fusión de las tres nubes de puntos.

Fuente propia

Obteniendo el resultado mostrado en la Figura 65 y Figura 66:

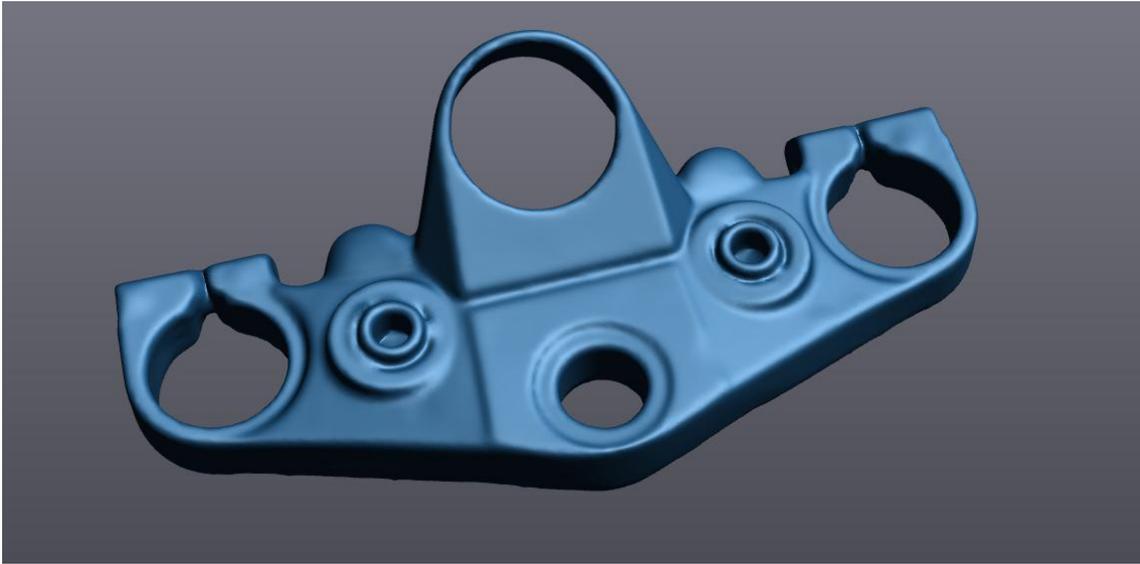


*Figura 65 Nube de puntos superior final sin refinar.
Fuente propia*



*Figura 66 Nube de puntos final inferior sin refinar.
Fuente propia*

A través de técnicas de limpieza como el relleno de agujeros, el suavizado de superficie y el uso de herramientas de selección para separar el ruido de la pieza, refinamos nuestra nube de puntos combinada.



*Figura 68 Nube de puntos final superior tras refinar.
Fuente propia*



*Figura 67 Nube de puntos final inferior tras refinar.
Fuente propia*

A continuación, como bien se puede observar, esta pieza se ha optimizado de forma tradicional por la parte inferior, pero como el proyecto consta de hacer una optimización topológica con criterios de diseño generativo, vamos a rellenar toda la parte inferior de forma sólida para que podamos obtener una buena solución topológica.

5.4 ALINEAMIENTO CON EJES CARTESIANOS

En este apartado vamos a realizar un alineamiento de los ejes con la pieza, para tenerla centrada en el centro de coordenadas y orientada respecto a los ejes cartesianos.

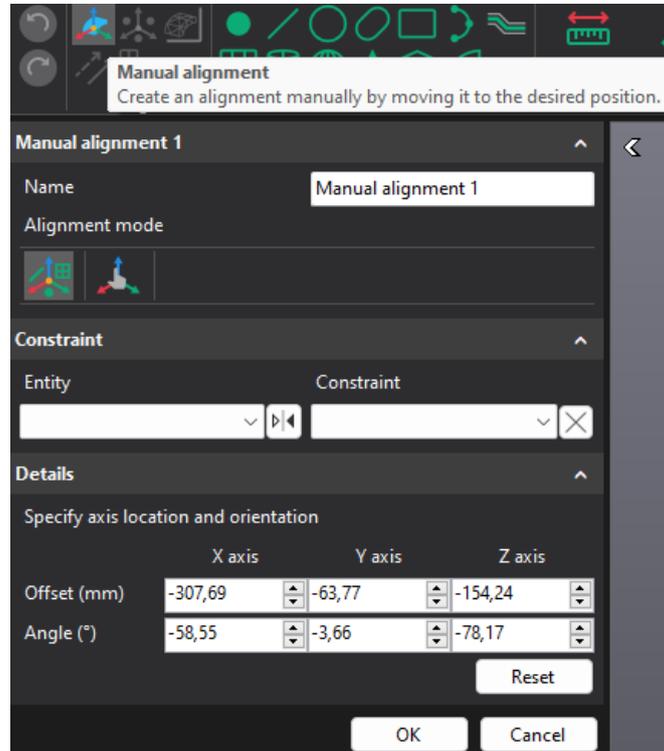


Figura 69 Herramienta de alineamiento manual con plano.

Fuente propia

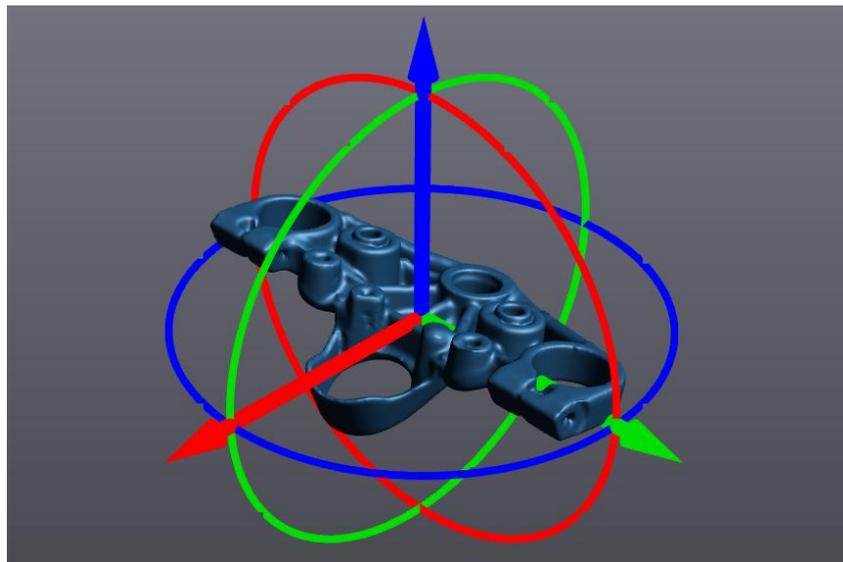


Figura 70 Alineamiento con los ejes cartesianos final.

Fuente propia

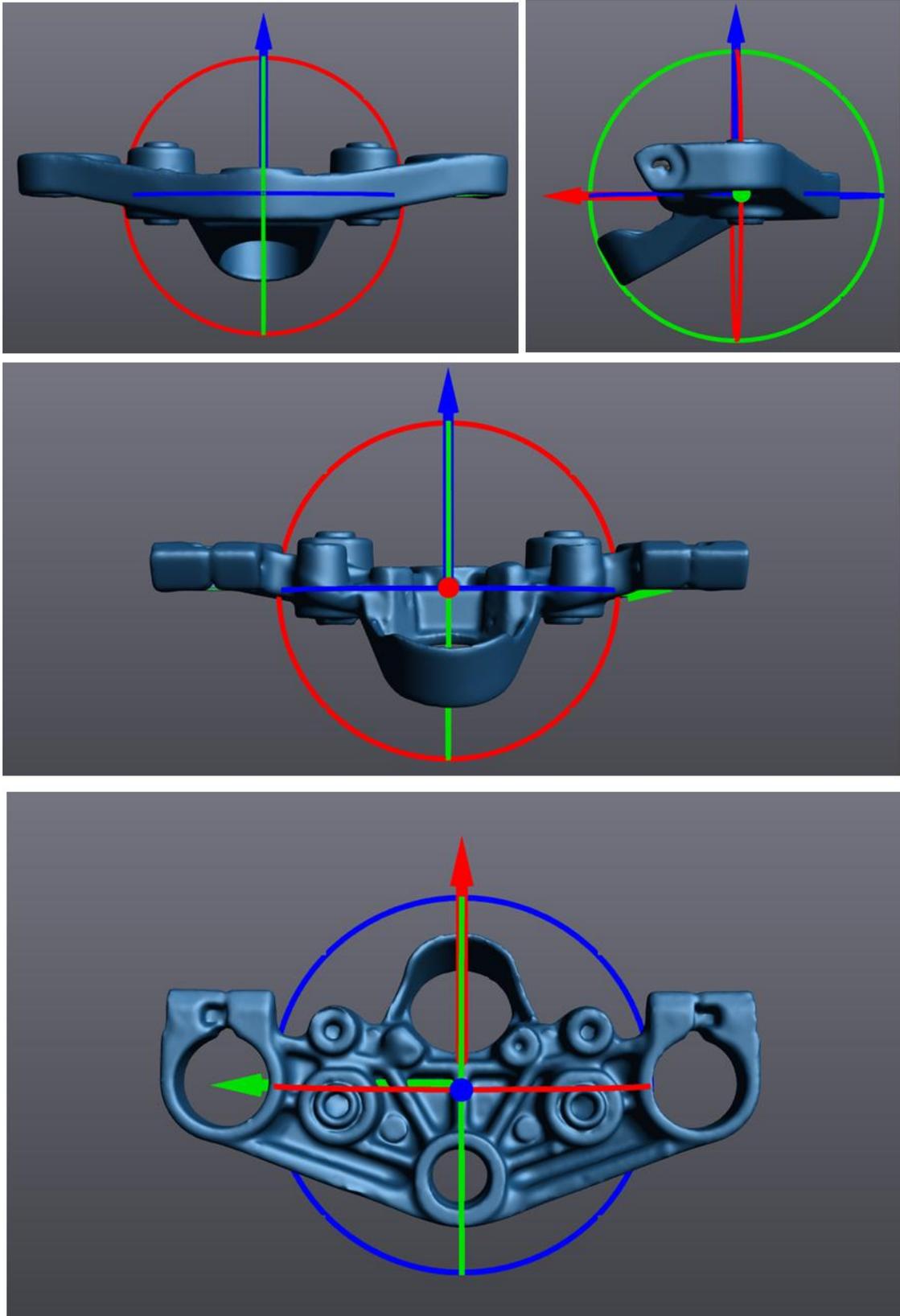


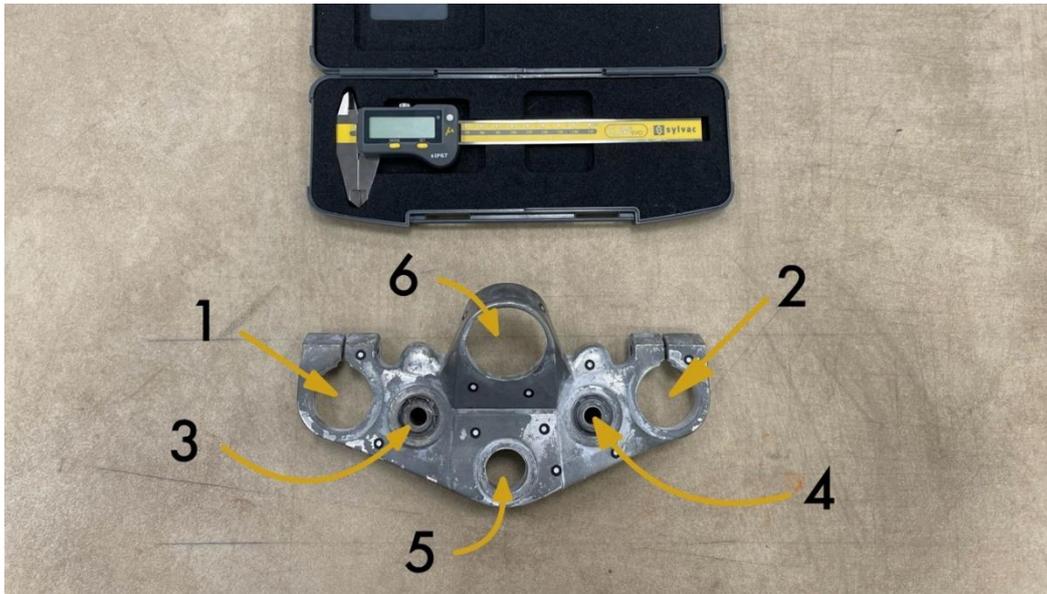
Figura 71 Detalle del alineamiento con los ejes cartesianos.

Fuente propia

5.5 REFINAMIENTOS PREVIOS

5.5.1 REFINAMIENTO DE AGUJEROS

En este apartado vamos a medir los agujeros de la tija a partir de un calibre para poder obtener las medidas exactas.



*Figura 72 Detalle de la enumeración de los agujeros de la tija junto con el calibre a utilizar.
Fuente propia*

Tras realizar las mediciones necesarias obtenemos las medidas correspondientes de los agujeros nombrados en la Figura 72.

Nº DE AGUJERO	MEDIDA DIÁMETRO
1	38,5 mm
2	38,5 mm
3	25 mm
4	25 mm
5	24 mm
6	46 mm

Tabla 1 Medidas de los agujeros del componente.

Fuente propia

A continuación, una vez tenemos las medidas exactas de los agujeros de la tija, procedemos a darle este exacto valor a los agujeros de la nube de puntos en SolidEdge, y para ello hace falta exportar la malla en formato .stl asegurándonos que esta malla está totalmente cerrada para que al importarlo en el nuevo programa este la identifique como pieza solida en lugar de un cuerpo de superficie.

En el caso de los agujeros 3 y 4 hemos tomado la medida de los agujeros en donde van introducidos los rodamientos, por lo tanto aunque estos se hayan escaneado solo hay que tener en cuenta lo que es parte de la pieza por ello realizamos un vaciado de 25 mm en cada lado correspondiente, tal y como se muestra en la Figura 73.

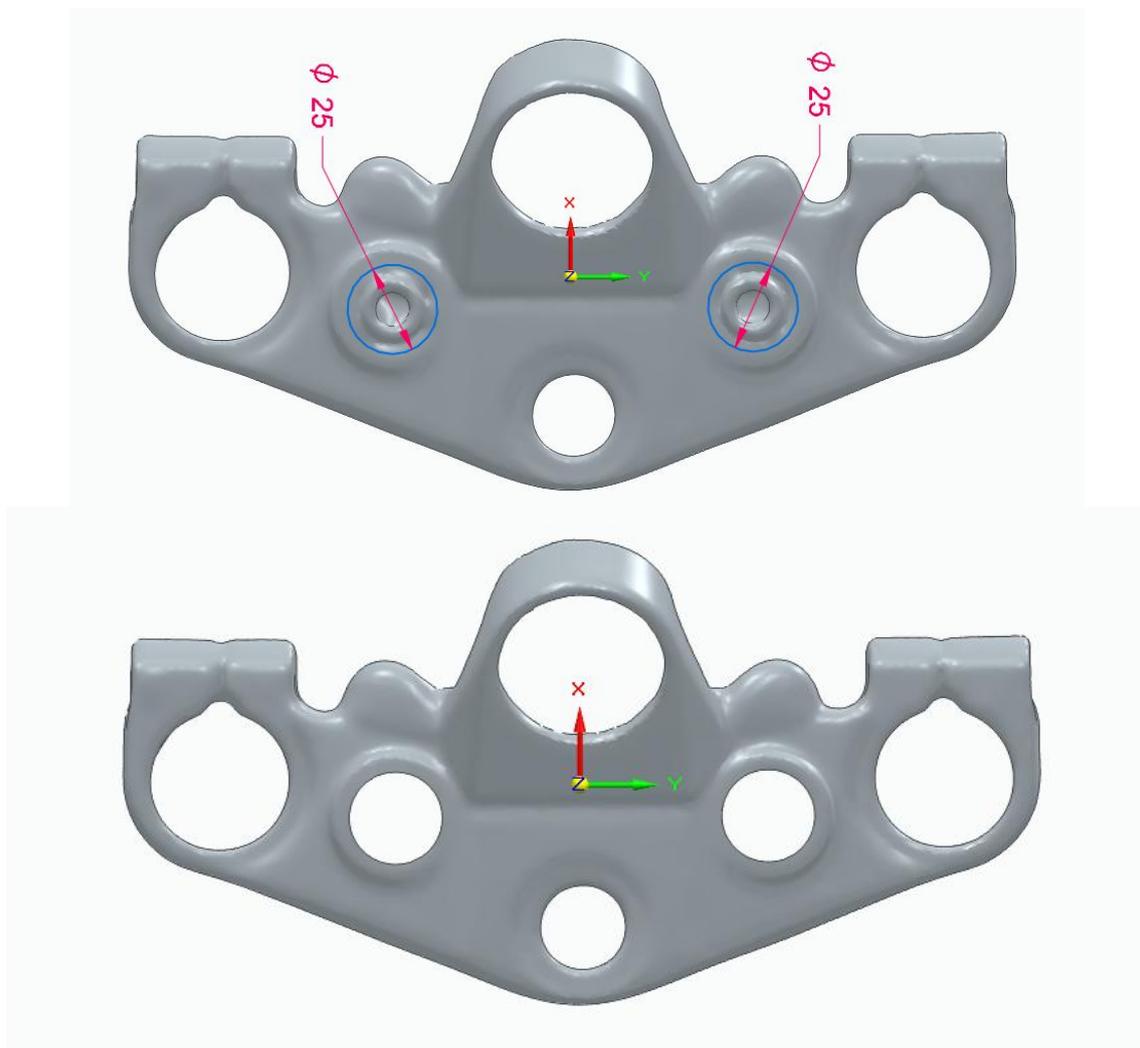


Figura 73 Detalle de los vaciados de los rodamientos.

Fuente propia

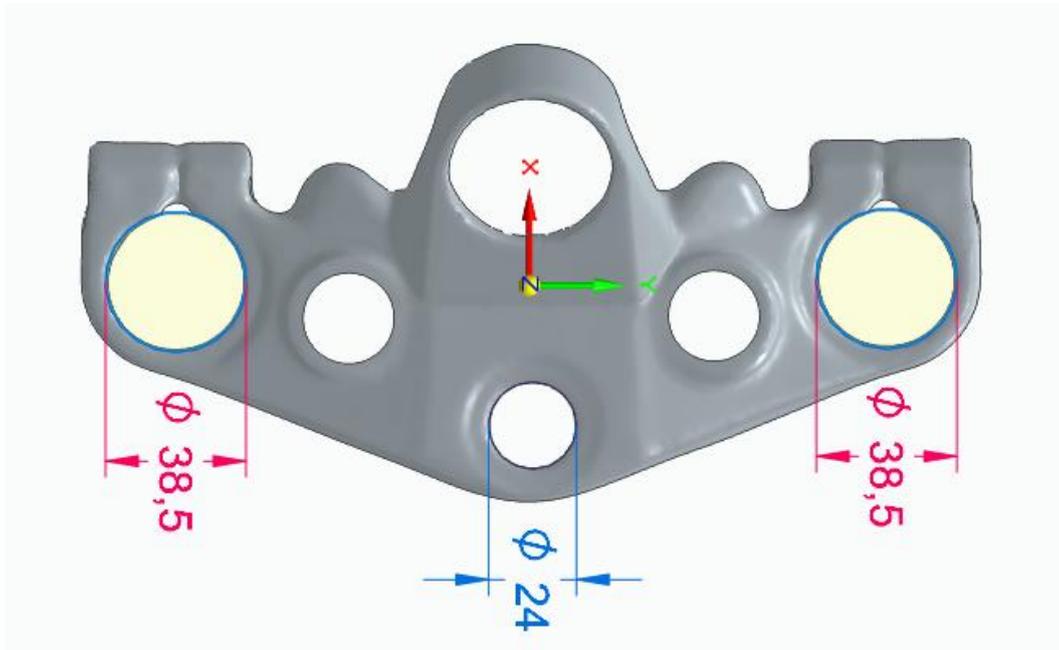


Figura 74 Detalle de los ajustes de los agujeros laterales y central de la tija.

Fuente propia

Por otro lado, observamos que en la parte inferior de la tija hay cuatro agujeros con métricas específicas. Estos orificios sirven para alojar los tornillos que fijan la tija a otra estructura de la moto. Debido a su importancia en el ensamblaje, es fundamental tomar las medidas precisas de estos agujeros y reproducirlos con exactitud en el diseño.

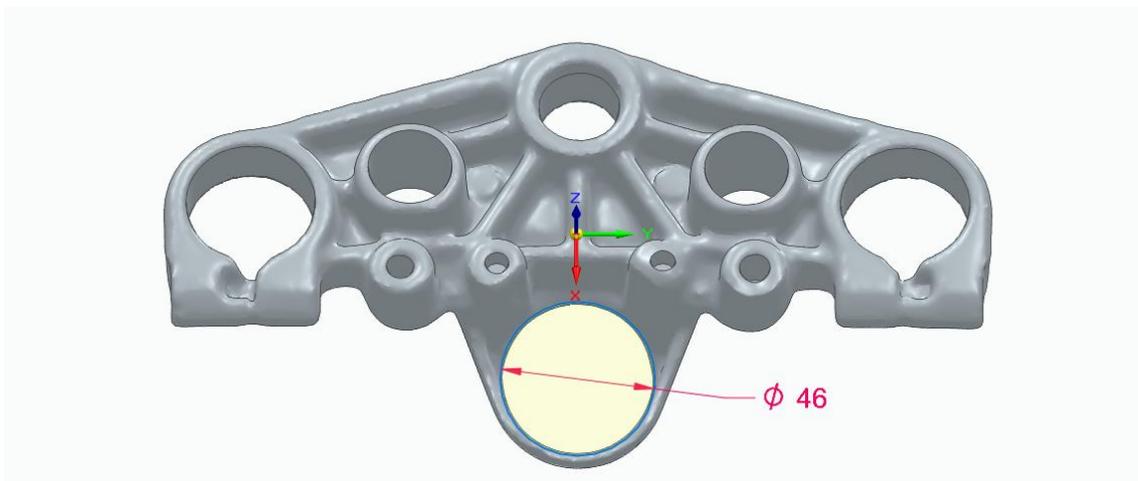


Figura 75 Detalle del ajuste de agujero central superior de la tija.

Fuente propia

En primer lugar, tenemos un grupo de 4 agujeros de tornillos dispuestos en la parte inferior de nuestra pieza y otro par de tornillos que están dispuestos en los laterales de la pieza, siendo todos estos mostrados junto a sus tornillos correspondientes en la Figura 76 y una enumeración correspondiente.

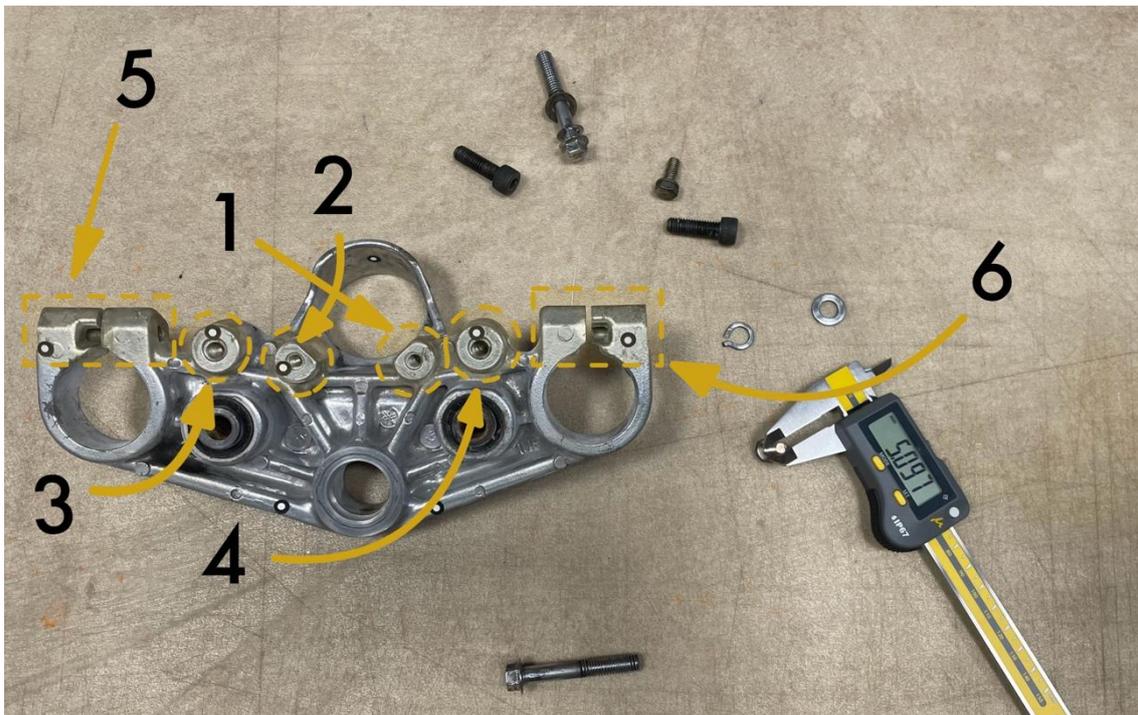


Figura 76 Agujeros con métrica traseros de la pieza con su enumeración.

Fuente propia

Nº DE AGUJERO	MÉTRICA	LARGO
1	5 mm	18 mm
2	5 mm	18 mm
3	7 mm	21 mm
4	7 mm	21 mm
5	7 mm	Pasante
6	7 mm	Pasante

Tabla 2 Medidas de los agujeros con métrica de la tija.

Fuente propia

Tras realizar los agujeros con sus diámetros de métrica y distancia de vaciado obtenemos los siguientes 4 agujeros en la parte trasera de la tija:

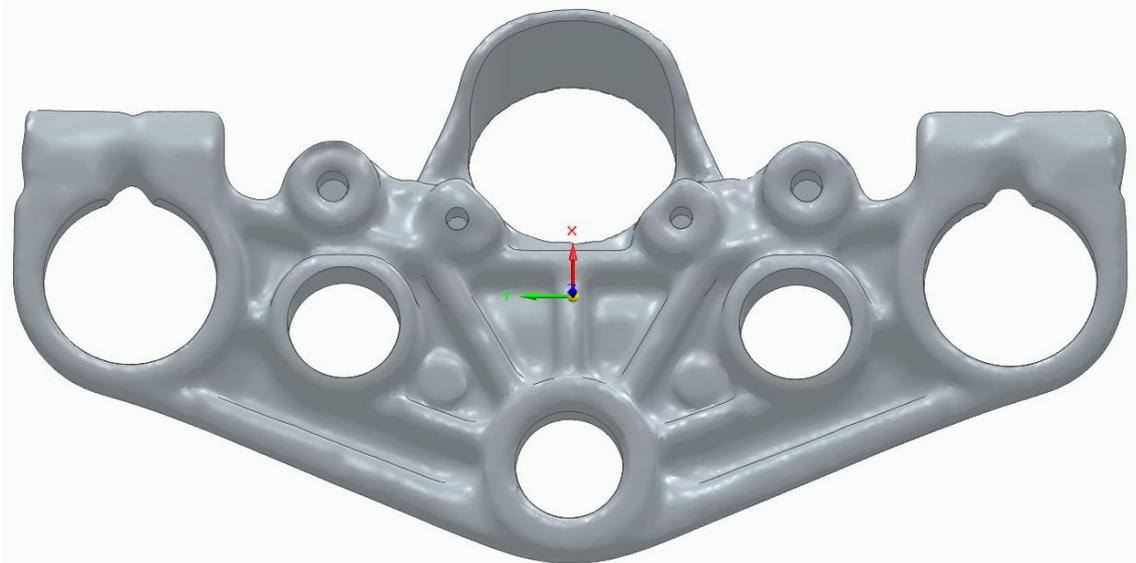


Figura 77 Detalle de los 4 agujeros con métrica traseros.

Fuente propia

Estos agujeros se han considerado como vaciados en el modelo ya que se definirán como restricciones de apoyos fijos en el análisis estructural. Esto permitirá simular con precisión cómo se comportará la tija bajo las distintas cargas aplicadas, ya que estos puntos de fijación son esenciales para reflejar correctamente la distribución de fuerzas en la pieza. Y, por otro lado, realizamos los correspondiente con las zonas laterales:

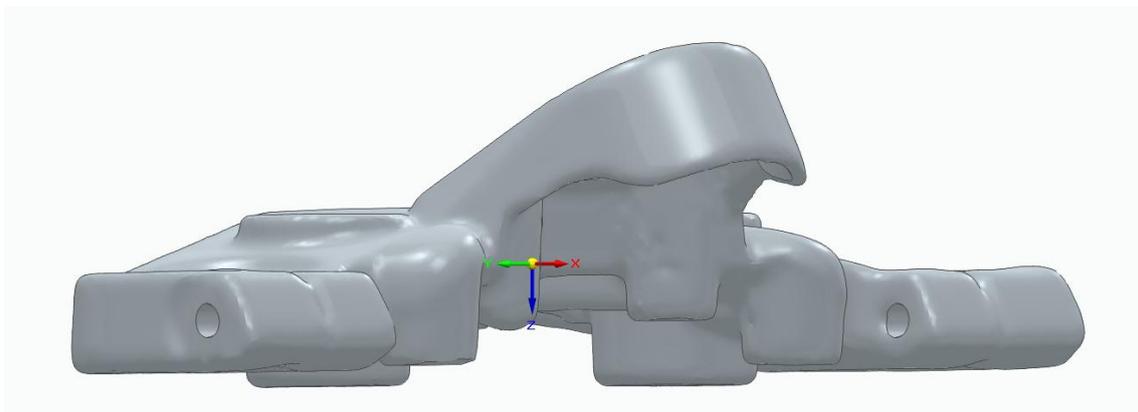


Figura 78 Detalle de los dos agujeros laterales.

Fuente propia

Como último paso en el proceso de refinamiento tras el escaneo de la pieza, es necesario retocar la zona señalada en la Figura 79. En la pieza original se emplean dos tornillos para fijarla a los amortiguadores de la moto; sin embargo, en este caso, para simplificar las simulaciones y las posteriores optimizaciones, se ha optado por tratarla como un sólido único. Esta unificación se ha realizado mediante una pequeña modificación en Solid Edge, obteniéndose el resultado que se muestra en la Figura 80.



*Figura 79 Detalle de los agujeros a retocar finales.
Fuente propia*

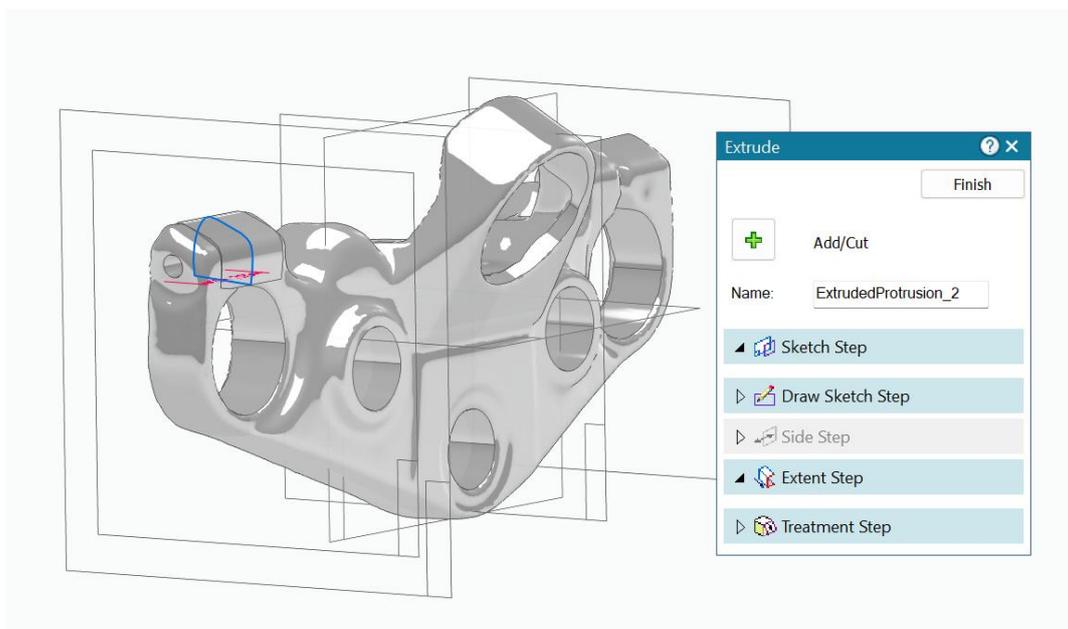


Figura 80 Realización de las extrusiones en la pieza.

Fuente propia

5.5.2 DIVISION DE SUPERFICIES AGUJEROS

Para incorporar correctamente las fuerzas que actúan sobre los agujeros de la tija, que son los puntos de unión con la barra de dirección de la moto y a los dos tubos amortiguadores de la horquilla, es necesario dividir las superficies en dos partes.

Esto último mencionado se debe a que, al considerar la frenada, las fuerzas de rozamiento solo afectan a la cara trasera de estas superficies y no a toda la superficie completa.

Por tanto, es necesario crear planos que permitan realizar estas particiones, de la siguiente manera:

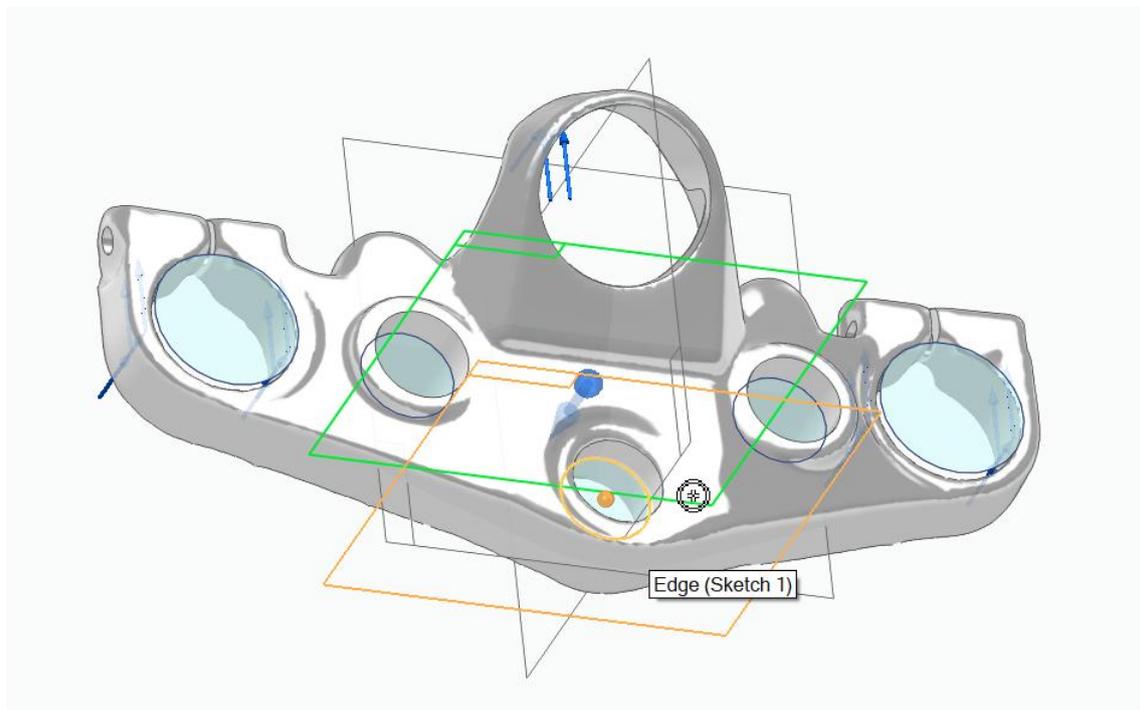
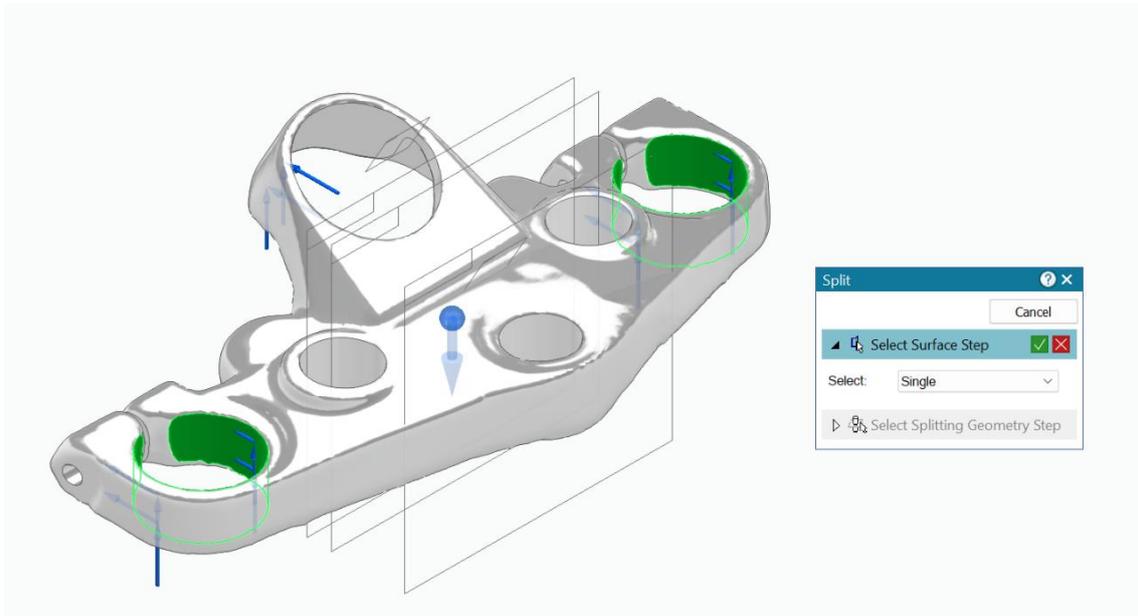
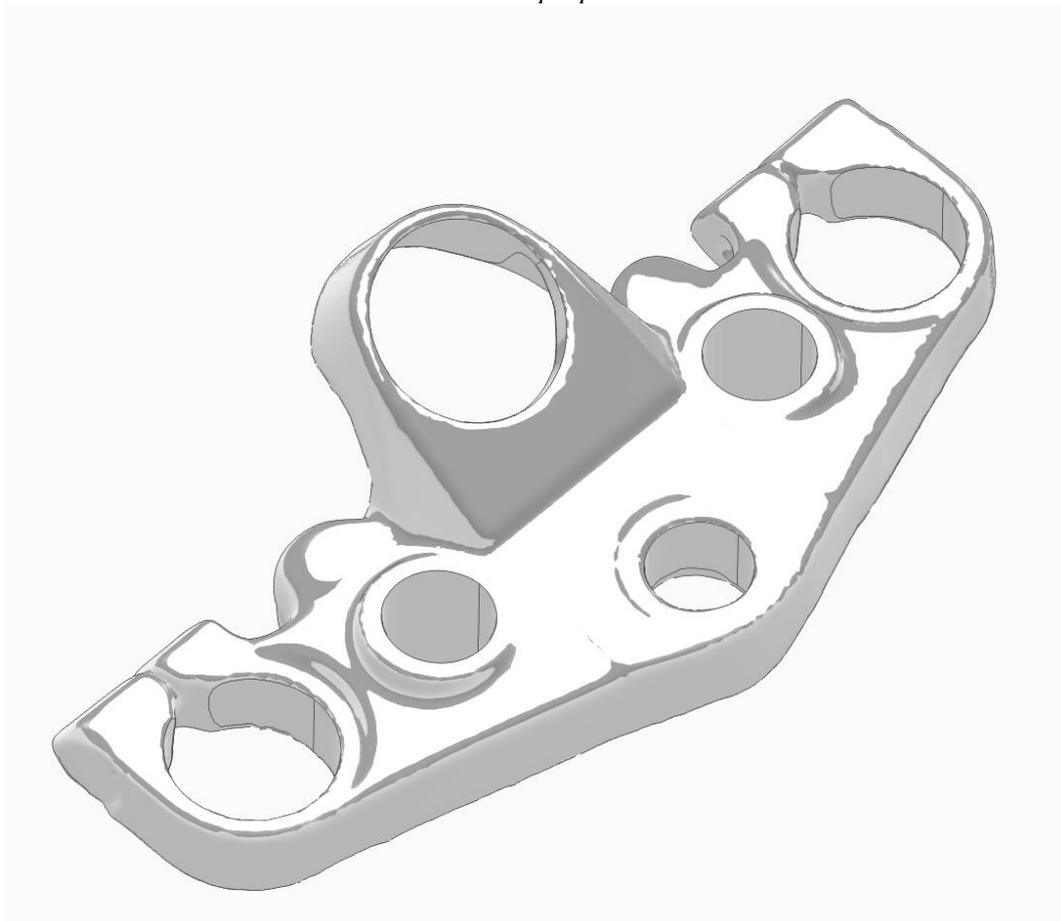


Figura 81 Detalle de la creación de los planos.

Fuente propia



*Figura 83 Detalle de la herramienta Split en SolidEdge.
Fuente propia*



*Figura 82 Detalle de las superficies de los agujeros divididas.
Fuente propia*

6. SIMULACION FEM

6.1 CONDICIONES CONTORNO PARA ESTUDIO FEM

Para analizar el comportamiento estructural de la tija de la motocicleta, se realizará un estudio mediante el Método de los Elementos Finitos (MEF) utilizando el módulo de Simulación de SolidEdge.

En este estudio, la tija será sometida a las principales cargas y restricciones que actúan sobre ella durante el uso más exigente de la motocicleta: principalmente durante la frenada intensa y el paso por curva.

El objetivo es evaluar los esfuerzos, deformaciones y desplazamientos que experimenta la tija bajo estas condiciones críticas de funcionamiento.

6.1.1 CARGAS

Las cargas consideradas para la simulación serán:

- Durante la frenada:

1. Carga axial debido al peso adelantado

Durante una frenada intensa, el peso de la motocicleta y del piloto se desplaza hacia la rueda delantera. Este peso es transmitido a través de las barras de la horquilla hasta la tija de dirección, generando una carga de compresión.

La fuerza normal transmitida se calcula como: $N = (m_{moto} + m_{piloto}) \times g$

- N: Fuerza normal (Newton)
- m_{moto} : Masa de la motocicleta (kg)
- m_{piloto} : Masa del piloto (kg)
- g: Aceleración de la gravedad

Para realizar el cálculo de las cargas aplicadas sobre la tija superior de la motocicleta, se han consultado las especificaciones técnicas de la Yamaha FZR 600 del año 1992, disponibles en bases de datos de motocicletas especializadas.[10] [11]



Figura 84 Fuerza normal, reacción sufrida por la motocicleta en la frenada.
Fuente: [7]

Según dicha fuente, el peso en orden de marcha ("Wet Weight") es de 208 kg. Para representar la masa del piloto, se ha considerado un valor de 85 kg, que corresponde a una estimación habitual en estudios de simulación y análisis dinámico de motocicletas. Estos datos serán empleados para calcular de manera precisa las fuerzas de reacción y las cargas que afectan directamente a la tija en situaciones críticas de conducción, como la frenada intensa y la entrada en curva. Por lo tanto, tras analizar estos datos podemos obtener una carga axial de:

$$N = (208 + 85) * 9.81 = 2874.33 \text{ N}$$



Figura 85 Detalle de la adición al estudio de la Fuerza normal.
Fuente propia

2. Fuerza de rozamiento

El frenado también genera una fuerza longitudinal opuesta al sentido de la marcha. Esta fuerza de rozamiento (F_r) se origina en el contacto neumático-asfalto y se transmite hacia la tija.

Se calcula como: $F_r = \mu \times N$

- F_r : Fuerza de rozamiento (Newton)
- μ : Coeficiente de rozamiento (valor estimado de 1,2)
- N : Fuerza normal (Newton)

$$F_r = 1.2 * 2874.33 = 3449.196 \text{ N}$$



Figura 86 Fuerza de rozamiento, reacción sufrida por la motocicleta en la frenada.

Fuente:[7]

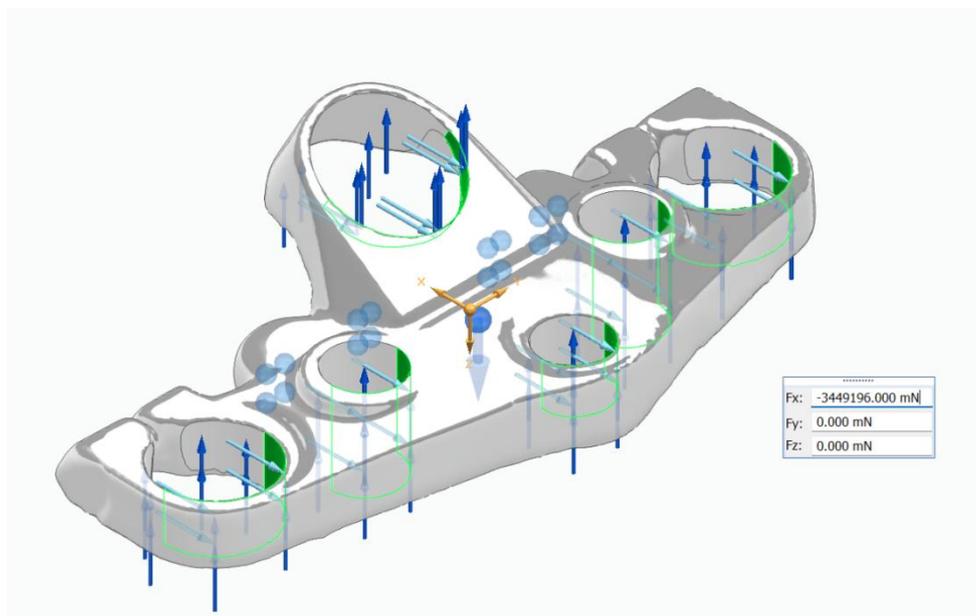


Figura 87 Detalle de la adición de la F_r en el estudio.

Fuente propia

3. Gravedad

También hemos de añadir la gravedad como fuerza sufrida por toda la tija:

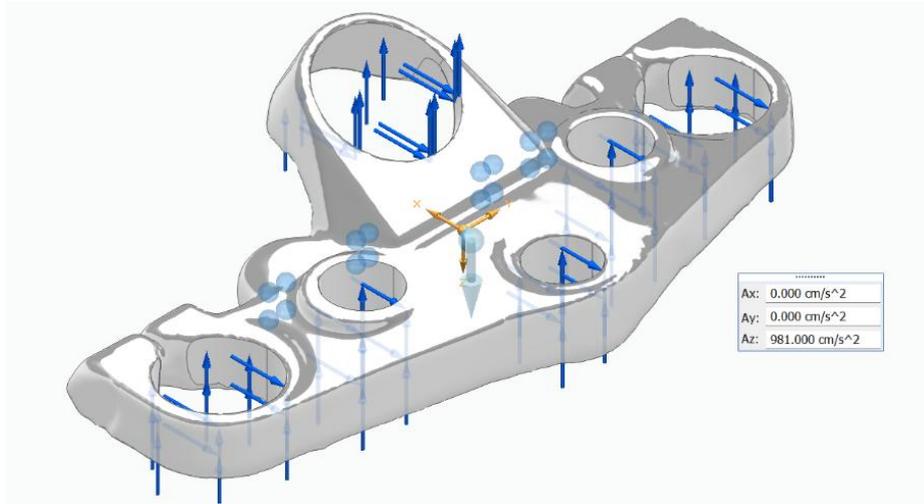


Figura 88 Detalle de la adición de la gravedad al estudio.
Fuente propia

6.1.2 RESTRICCIONES DE MOVIMIENTO

Para simular de forma realista el comportamiento de la tija, se aplicará una restricción en el punto de contacto entre la tija con la barra de dirección, es decir, se simulará la fijación donde la barra de dirección se conecta con la tija. Esta unión permitirá la rotación alrededor del eje de dirección, pero restringirá los desplazamientos en los otros dos ejes.

Con este planteamiento de cargas y restricciones, se podrá obtener un análisis preciso de los esfuerzos, desplazamientos y posibles puntos críticos de la tija de motocicleta en condiciones extremas de uso.

Este comportamiento se va a simular a través de la herramienta de restricción de “Restricción fija” de la siguiente forma:



Figura 89 Detalle de las restricciones fijas de la tija

Fuente propia

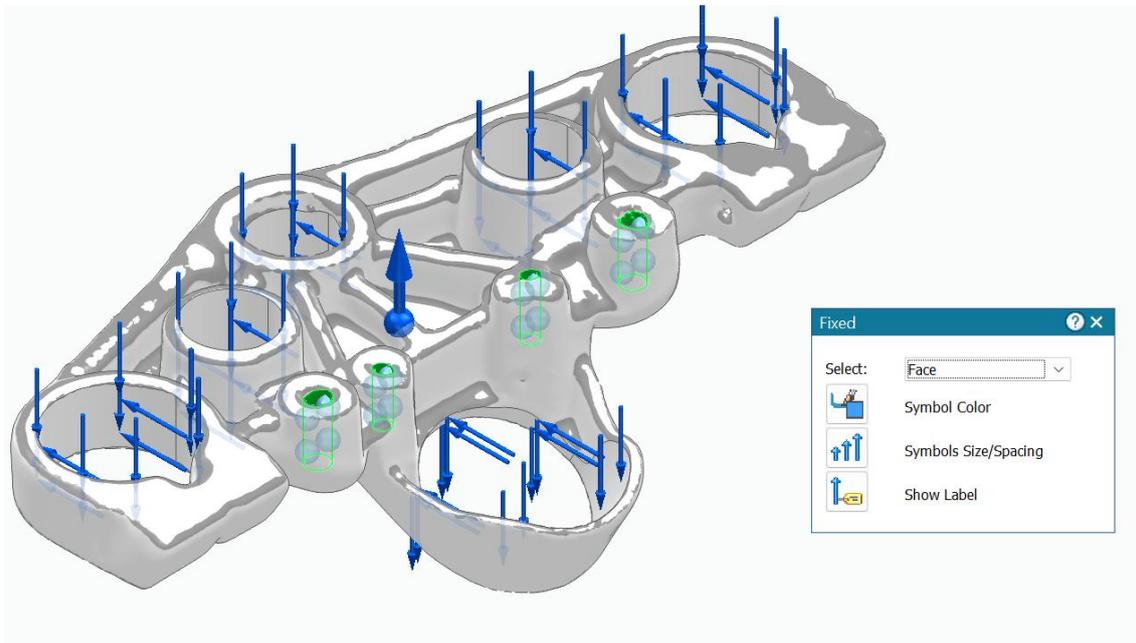


Figura 91 Detalle de las restricciones fijas de la tija.

Fuente propia

6.1.3 ELECCIÓN DE MATERIAL

Tras una investigación exhaustiva sobre los materiales comúnmente utilizados en la fabricación de tijas, consultando manuales de servicio, catálogos de repuestos y documentación técnica de motocicletas deportivas similares, se ha determinado que el aluminio es el material predominante debido a su combinación de resistencia y ligereza.

Este material ofrece muchas ventajas, incluyendo las siguientes:

1. Alta resistencia mecánica, soportando fuerzas muy elevadas, y, por lo tanto es ideal para componentes críticos.
2. Buena soldabilidad
3. Buena resistencia a fatiga; soportando ciclos de carga repetidos sin deformarse.
4. Ligereza y baja densidad, lo que mejora la eficiencia y el rendimiento.
5. Resistencia al agrietamiento por corrosión bajo tensión: Más resistente a este fenómeno que otras aleaciones.

En base a esta información, para la simulación de la tija se selecciona el aluminio 5456 (H111), introduciendo en el programa de simulación los valores de sus propiedades mecánicas conforme a los requisitos del software.

Teniendo este material las siguientes propiedades:

Physical Properties	Metric	English	Comments
Density	2.66 g/cc	0.0961 lb/in ³	AA; Typical
Mechanical Properties	Metric	English	Comments
Hardness, Brinell	87	87	500 kg load with 10 mm ball. Calculated value.
Hardness, Knoop	111	111	Converted from Brinell Hardness Value
Hardness, Rockwell A	37.2	37.2	Converted from Brinell Hardness Value
Hardness, Rockwell B	54	54	Converted from Brinell Hardness Value
Hardness, Vickers	98	98	Converted from Brinell Hardness Value
Tensile Strength, Ultimate	320 MPa	46400 psi	
Tensile Strength, Yield	230 MPa	33400 psi	
Elongation at Break	18 % @Diameter 13.0 mm	18 % @Diameter 0.512 in	In 5 cm
Tensile Modulus	70.3 GPa	10200 ksi	
Compressive Modulus	71.7 GPa	10400 ksi	
Poissons Ratio	0.33	0.33	Estimated from trends in similar Al alloys.
Shear Modulus	26.0 GPa	3770 ksi	Estimated from similar Al alloys.
Shear Strength	195 MPa	28300 psi	Calculated value.
Thermal Properties	Metric	English	Comments
Specific Heat Capacity	0.900 J/g-°C	0.215 BTU/lb-°F	
Thermal Conductivity	116 W/m-K	805 BTU-in/hr-ft ² -°F	
Melting Point	568.3 - 638 °C	1055 - 1180 °F	AA; Typical range based on typical composition for wrought products >= 1/4 in. thickness
Solidus	568.3 °C	1055 °F	AA; Typical
Liquidus	638 °C	1180 °F	AA; Typical

Figura 92 Propiedades mecánicas Al5456 H111

Fuente: Matweb.com

Y esta lista de propiedades tenemos que introducirla en el programa a utilizar para realizar la simulación por elementos finitos, Solid Edge:

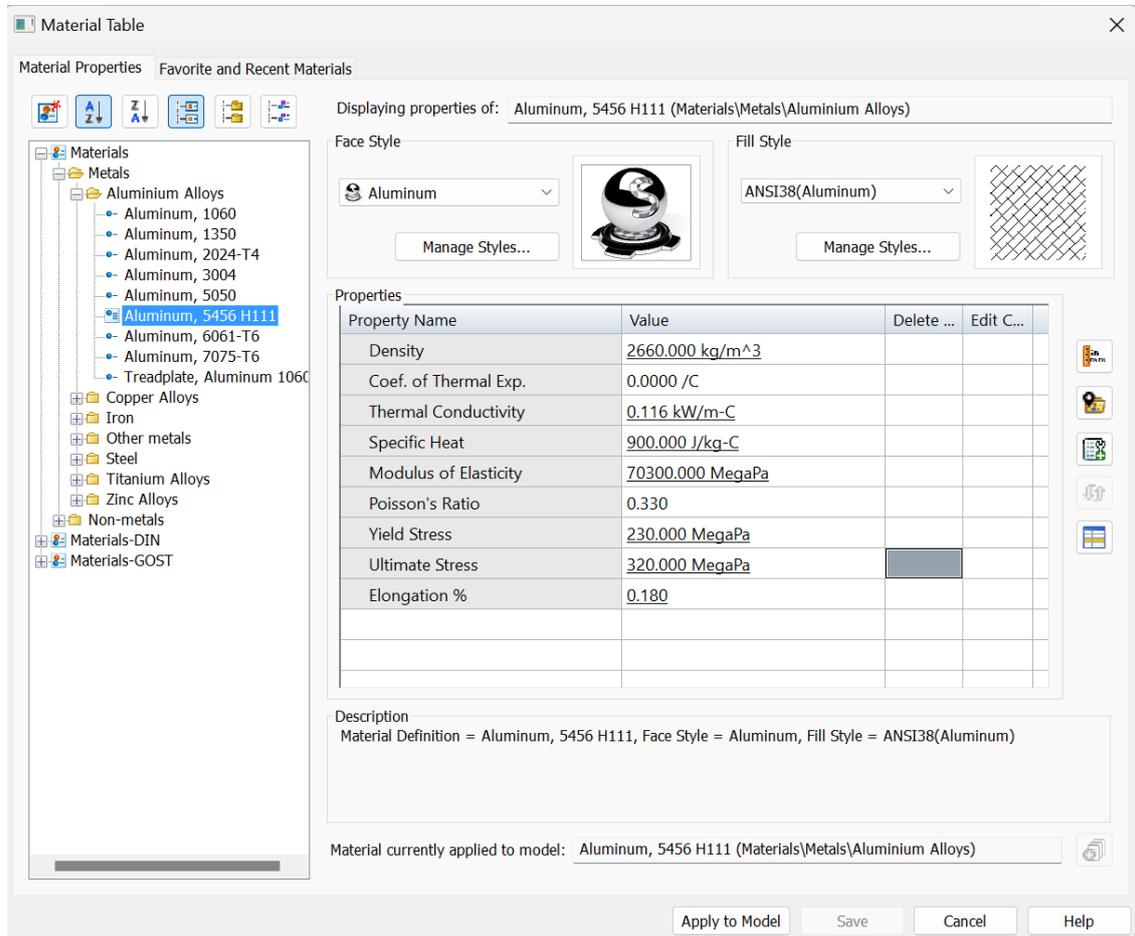


Figura 93 Detalle de la adición del material Al5456 H111 a Solid Edge

Fuente propia

6.2 ESTUDIO FEM

Una vez incluidas todas las cargas y restricciones en la pieza, podemos realizar la simulación por elementos finitos de la tija. Tal como se observa en la figura inferior, la tija no presenta fallo bajo este estado de cargas, lo que nos permite avanzar con el inicio de las iteraciones de optimización topológica. La tensión máxima que experimenta la tija es de 92.1 megapascales, por lo que la pieza no rompe ya que el límite elástico del material es de 230 megapascales.

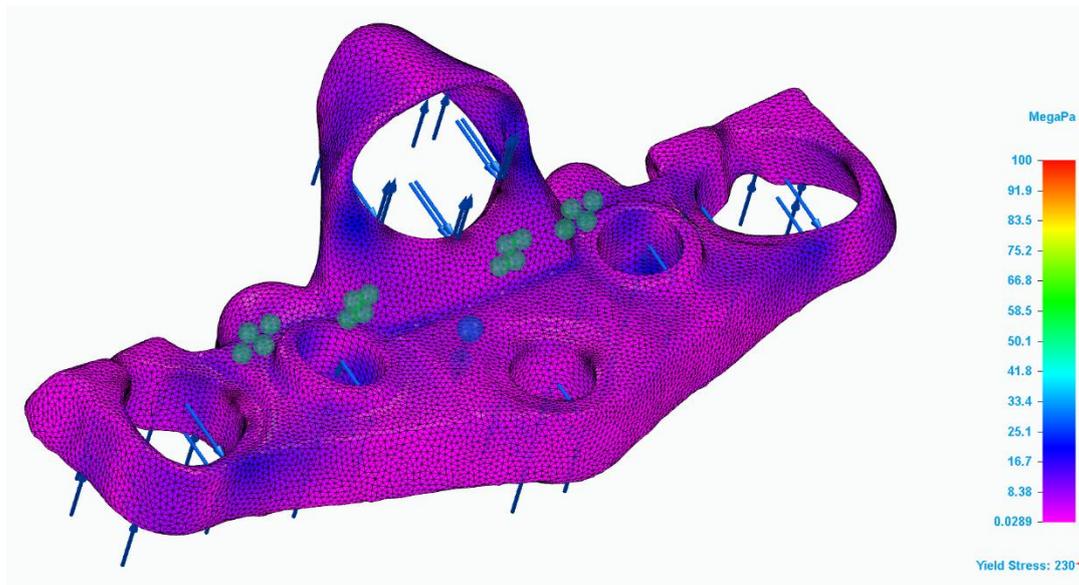


Figura 94 Simulación FEM de la tija original de tensiones.

Fuente propia

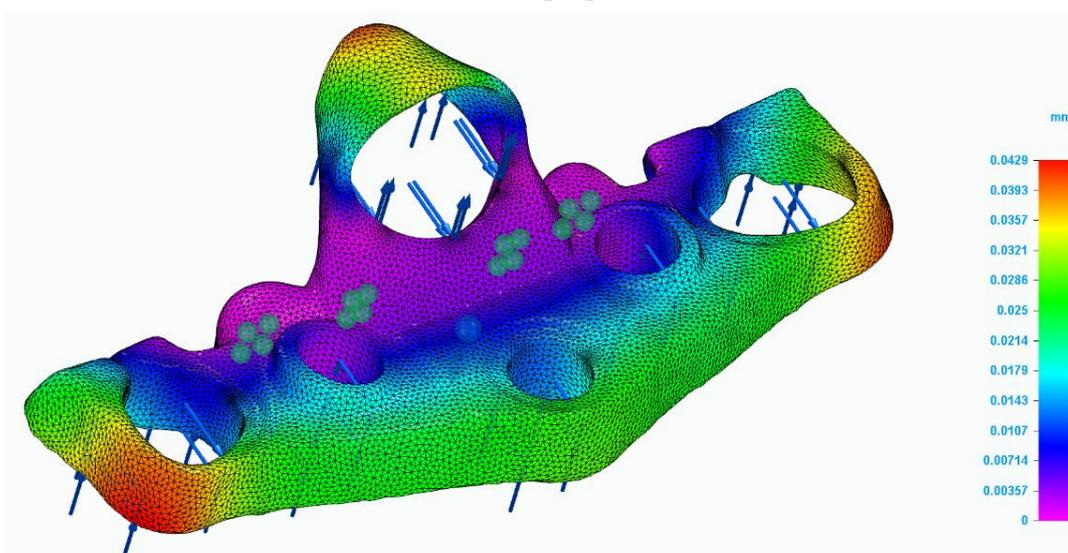


Figura 95 Simulación FEM de la tija original de desplazamiento.

Fuente propia

7. OPTIMIZACION TOPOLOGICA

Una vez verificado que la tija no se rompe bajo el estado de cargas aplicado, se pueden aplicar criterios de diseño generativo para dar inicio al proceso iterativo de optimización topológica. Este proceso consiste en utilizar algoritmos que generan distintas opciones de diseño que cumplen con las cargas y restricciones definidas. Posteriormente, estas opciones serán evaluadas para seleccionar la topología más eficiente.

En este caso, se han preservado únicamente las zonas correspondientes a los agujeros donde se aplican las fuerzas, ya que son puntos clave para la funcionalidad estructural de la tija. A partir de este punto, se inicia la fase iterativa con el objetivo de obtener una versión optimizada de la tija.

La primera iteración consistirá en una reducción del 20 % de la masa. En función de los resultados obtenidos mediante simulaciones por elementos finitos (FEM), se ajustará este porcentaje, incrementándolo o disminuyéndolo, con el fin de alcanzar un equilibrio óptimo entre la reducción de masa y la integridad estructural de la pieza.

Ponemos todas las restricciones detalladas previamente en el aparrado de simulación en la parte de diseño generativo de Solid Edge.

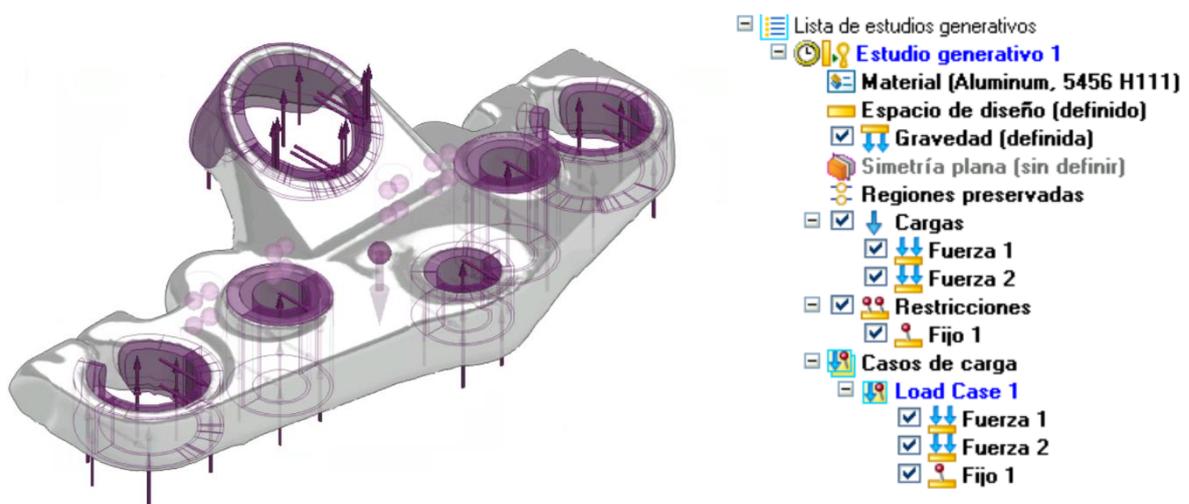


Figura 96 Detalle del estado de cargas y restricciones para el estudio generativo.

Fuente propia

7.1 ITERACIÓN 1

Como bien hemos indicado en el apartado anterior, comenzaremos la primera iteración con una reducción de peso del 20% tal como se muestra en la figura posterior.

Respecto al tamaño de vóxel podemos indicar que se ha definido un tamaño de 1,51 mm, lo cual influye en la resolución del mallado del modelo para el análisis. Un tamaño de vóxel más pequeño proporcionaría mayor precisión, pero también incrementaría el tiempo de cálculo.

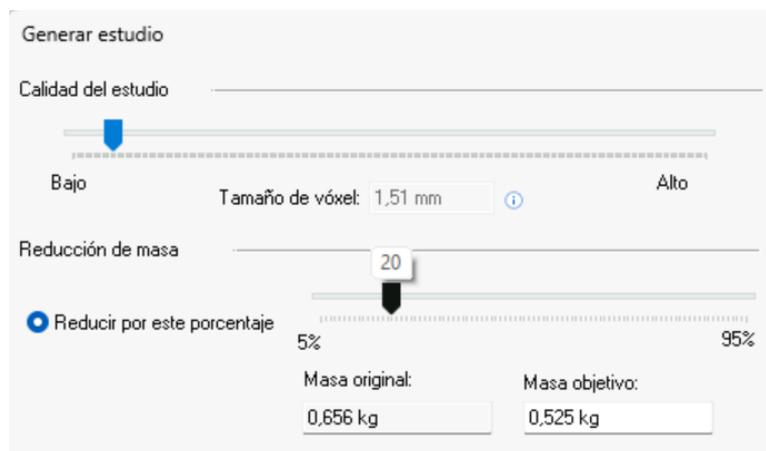


Figura 97 Detalle de las restricciones de reducción de masa Iteración 1.

Fuente propia

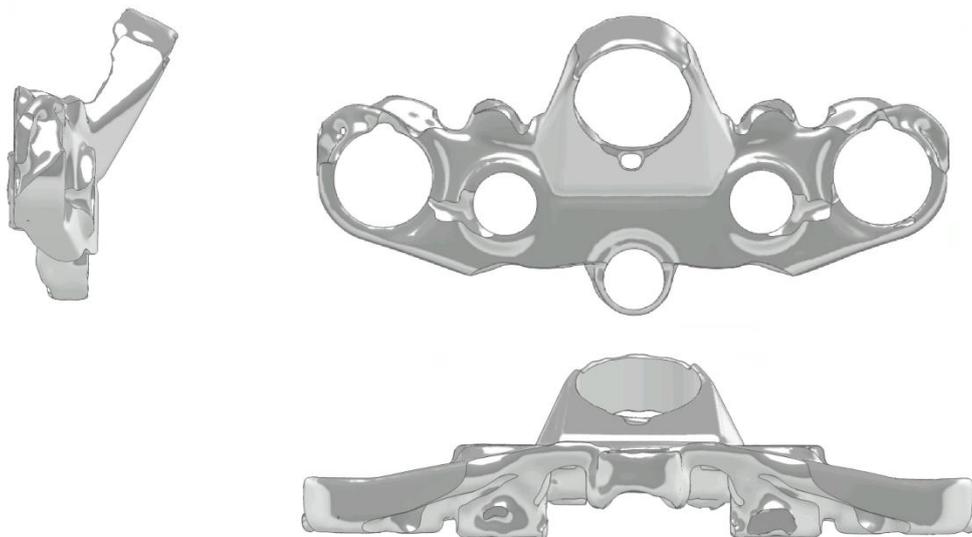
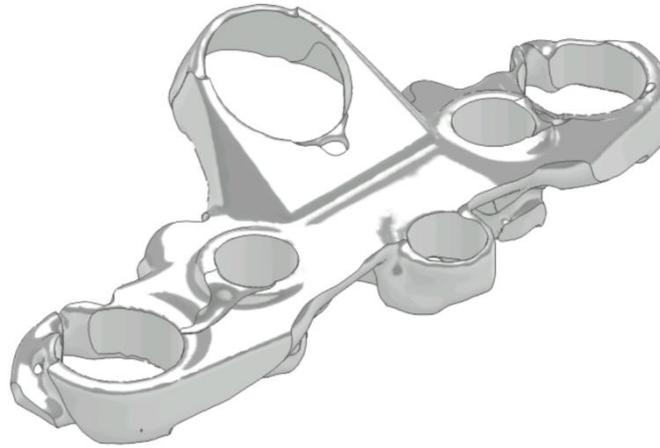


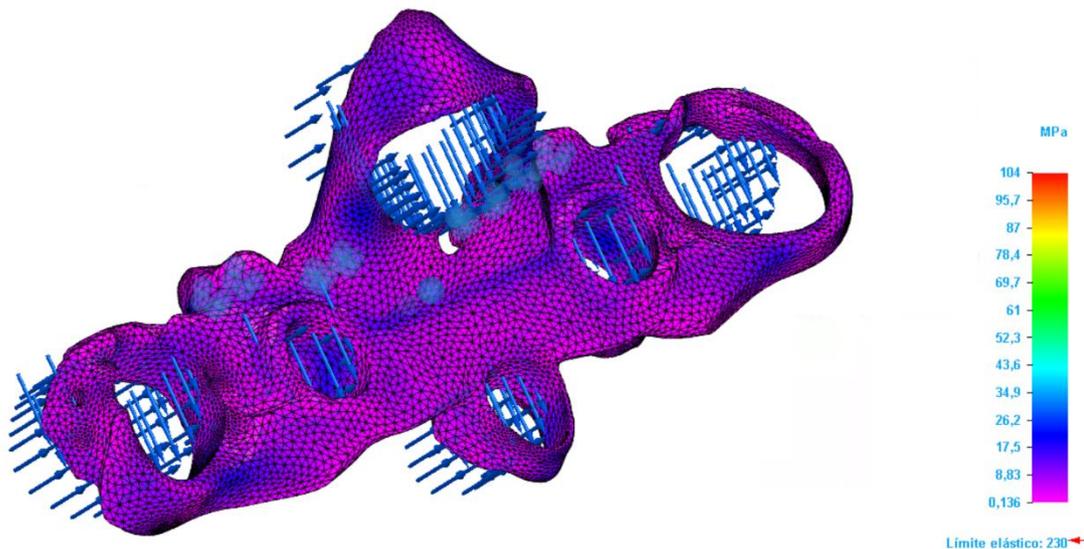
Figura 98 Vistas laterales de la OT de la pieza en la primera iteración.

Fuente propia



*Figura 99 Vista isométrica de la primera iteración.
Fuente propia*

Y volvemos a realizar la simulación por elementos finitos para comprobar que bajo el mismo estado de cargas y restricciones y habiéndole quitado esa masa la pieza no rompería y poder así saber por dónde continuar las iteraciones.



*Figura 100 Simulación FEM a la pieza optimizada 1.
Fuente propia*

Podemos observar como la pieza optimizada de la primera iteración no rompería teniendo un 20% menos de masa, ya que $104 < 230$ MPa. Por lo cual, continuaremos la segunda iteración aumentando este porcentaje.

7.2 ITERACIÓN 2

Como bien hemos indicado en el apartado anterior, comenzaremos la primera iteración con una reducción de peso del 30% tal como se muestra en la figura posterior.

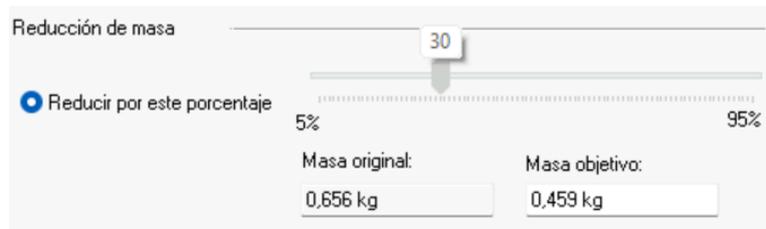


Figura 101 Detalle de las restricciones de reducción de masa Iteración 2.

Fuente propia

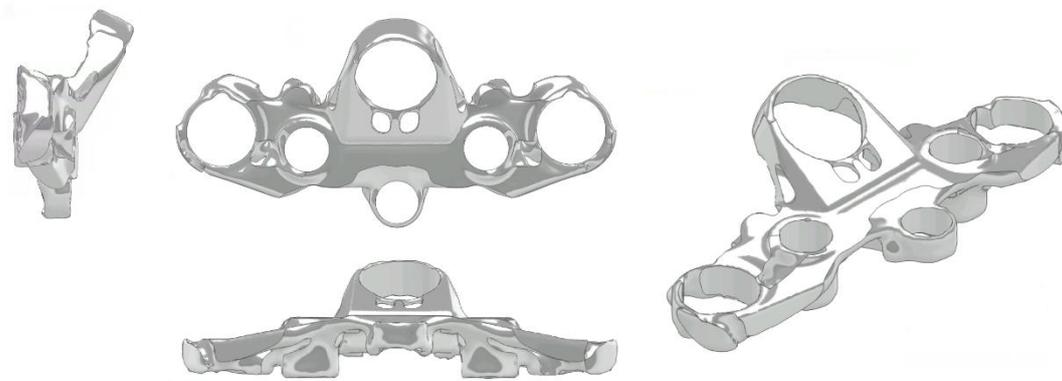


Figura 102 OT de la pieza en la segunda iteración.

Fuente propia

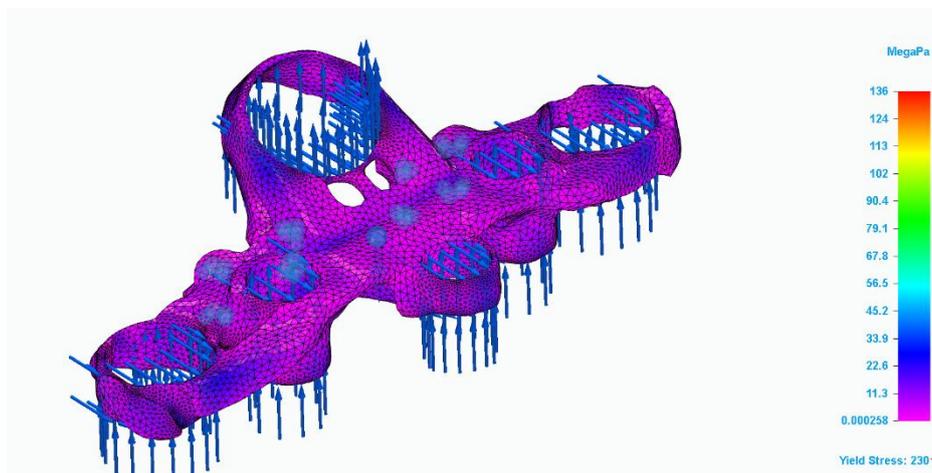


Figura 103 Simulación FEM a la pieza optimizada 2.

Fuente propia

Podemos observar como la pieza optimizada de la segunda iteración no rompería teniendo un 30% menos de masa, ya que $138 < 230$ MPa. Por lo cual, continuaremos la tercera iteración aumentando este porcentaje.

7.3 ITERACIÓN 3

Como bien hemos indicado en el apartado anterior, comenzaremos la primera iteración con una reducción de peso del 40% tal como se muestra en la figura posterior.

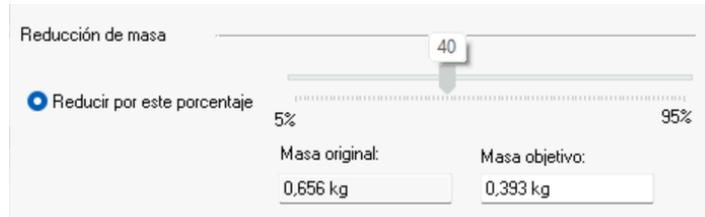


Figura 104 Detalle de las restricciones de reducción de masa Iteración 3.

Fuente propia

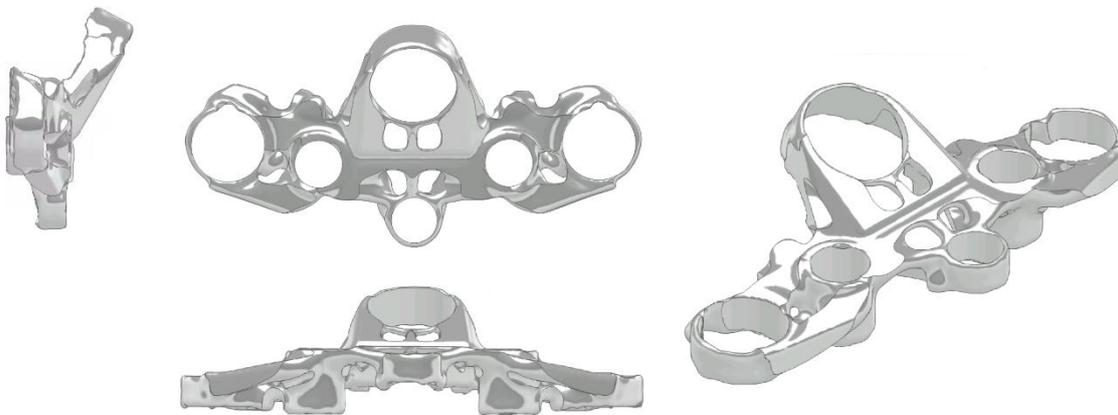


Figura 105 OT de la pieza en la tercera iteración.

Fuente propia

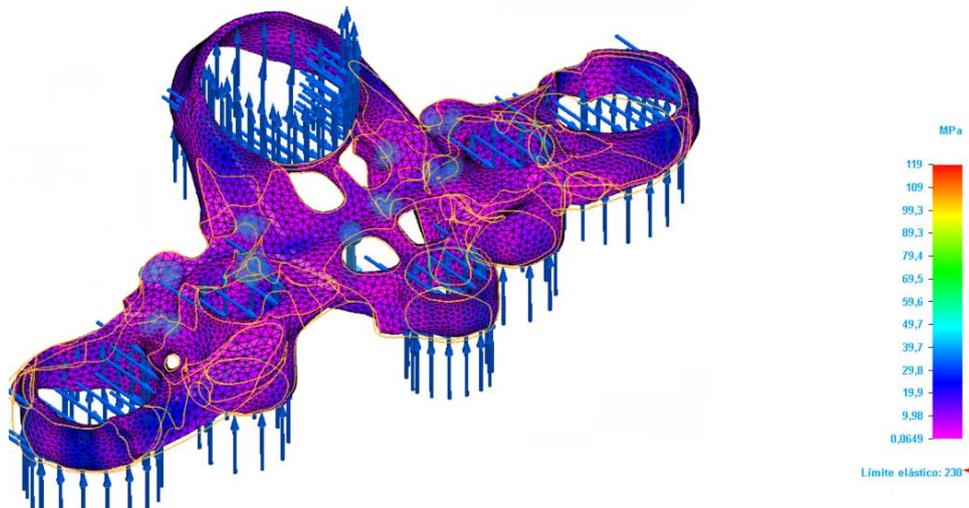


Figura 106 Simulación FEM a la pieza optimizada 3.

Fuente propia

Podemos observar como la pieza optimizada de la segunda iteración no rompería teniendo un 40% menos de masa. Por lo cual, continuaremos la cuarta iteración aumentando este porcentaje.

7.4 ITERACIÓN 4

Como bien hemos indicado en el apartado anterior, comenzaremos la primera iteración con una reducción de peso del 50% tal como se muestra en la figura posterior.

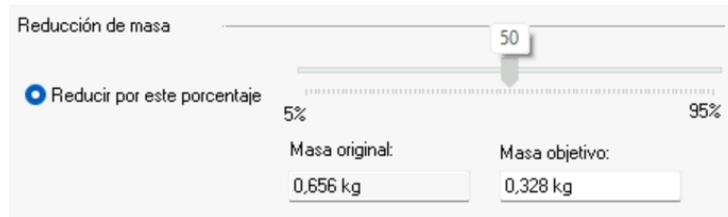


Figura 107 Detalle de las restricciones de reducción de masa Iteración 4.
Fuente propia

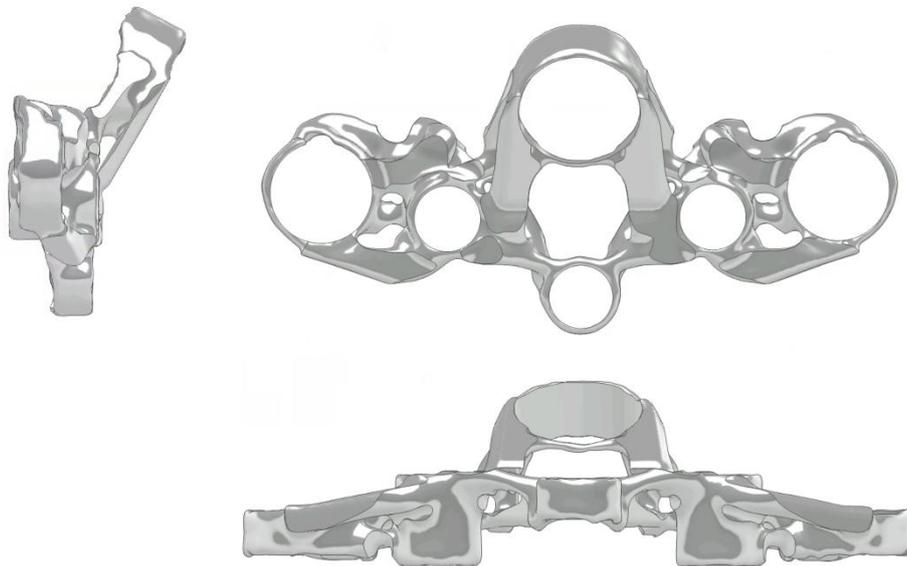


Figura 108 Vistas laterales de la OT de la pieza en la cuarta iteración.
Fuente propia

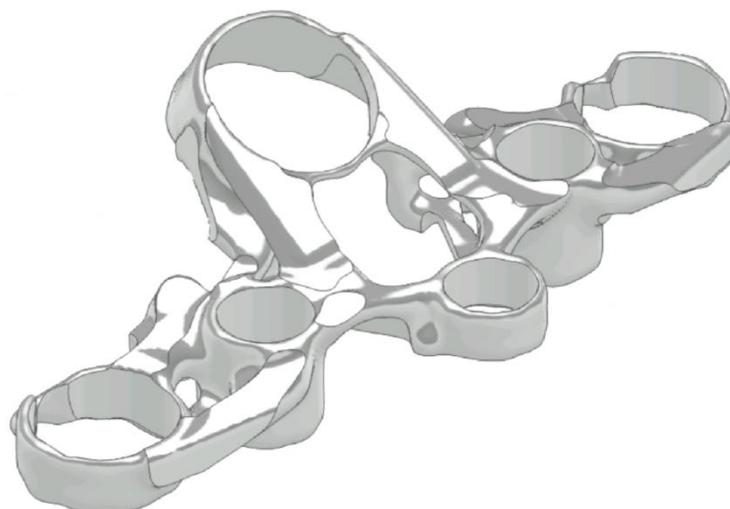
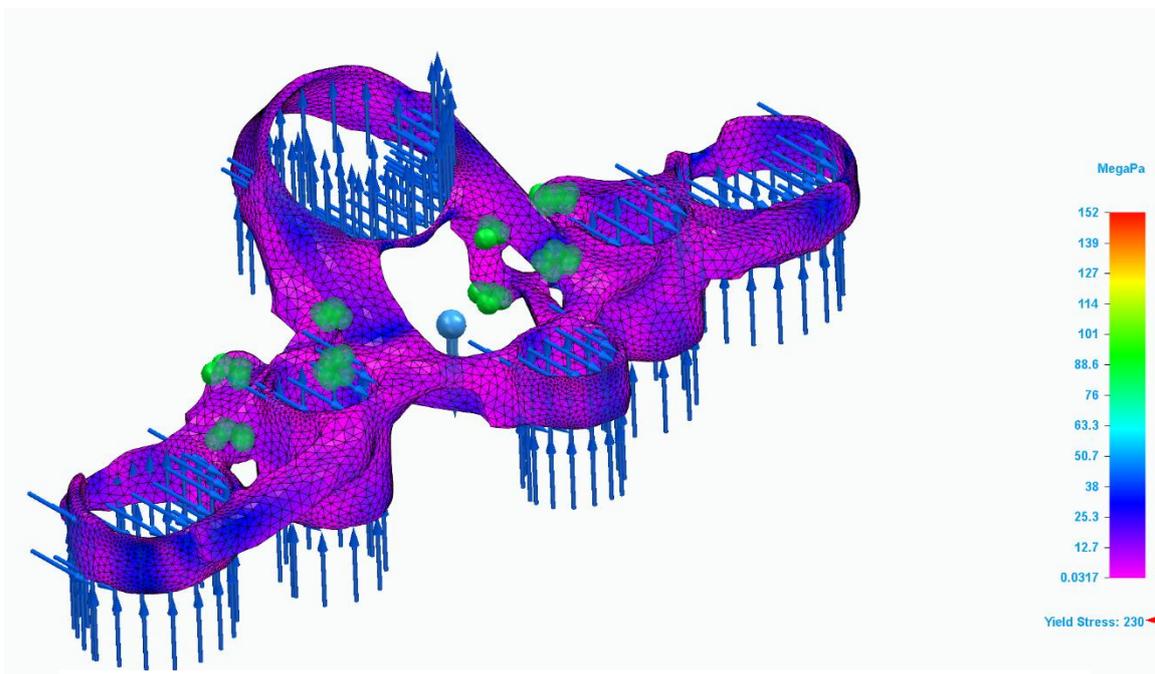


Figura 109 Vista isométrica de la cuarta iteración.
Fuente propia



*Figura 110 Simulación FEM a la pieza optimizada 4.
Fuente propia*

Se da por finalizado el proceso iterativo en la Iteración 4, en la cual se ha alcanzado una reducción del 50% de la masa original. Este nivel de aligeramiento se considera suficiente, ya que representa un ahorro significativo de material sin comprometer la funcionalidad estructural de la pieza.

Además, el diseño resultante tiene un rango en el que puede soportar tensiones de hasta 70 MPa más, lo cual se considera razonable para las sollicitaciones excepcionales que podría experimentar una motocicleta en condiciones no habituales, como impactos, baches o frenadas bruscas.

Con esta base, se considera que el objetivo de optimización ha sido cumplido y, por tanto, el siguiente paso será proceder al refinamiento geométrico de la pieza.

8. REFINAMIENTO TRAS LA OT

Una vez completado el proceso de optimización topológica mediante diseño generativo, y obtenida una geometría preliminar con una reducción significativa de masa, es necesario llevar a cabo una fase de refinamiento para transformar esta geometría en una pieza fabricable y con un comportamiento estructural adecuado.

8.1 REFINAMIENTO 1: AGUJEROS

En esta etapa, se procederá primero al refinamiento local de los agujeros de la tija, dado que constituyen zonas críticas tanto para el montaje como para la transmisión de cargas.

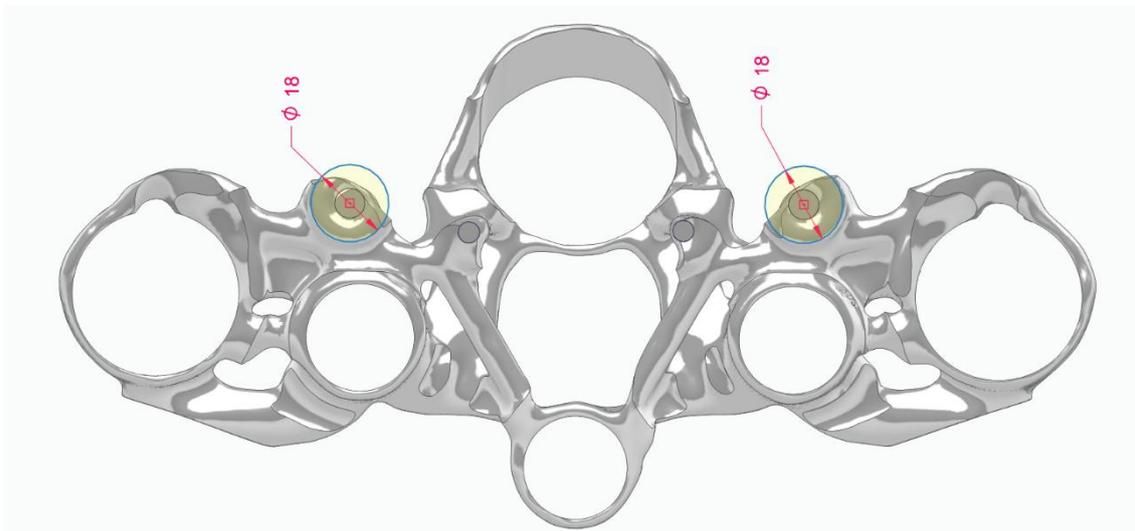


Figura 112 Detalle de los bocetos de extrusión del refinamiento de los agujeros inferiores.

Fuente propia

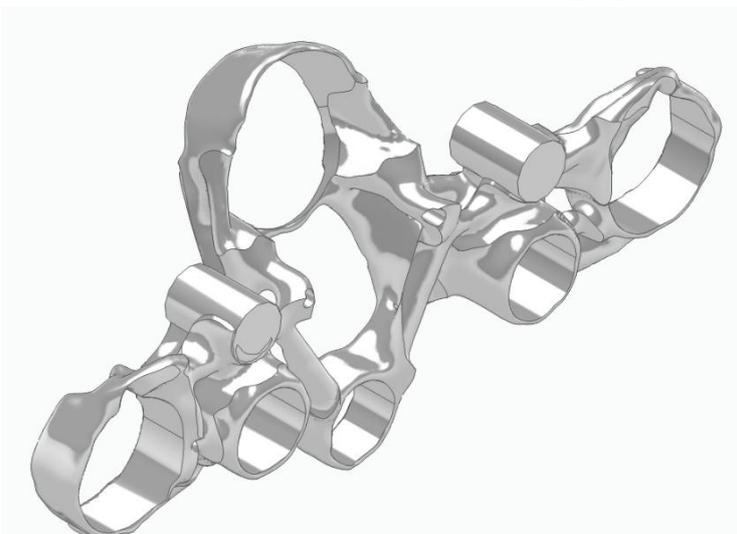
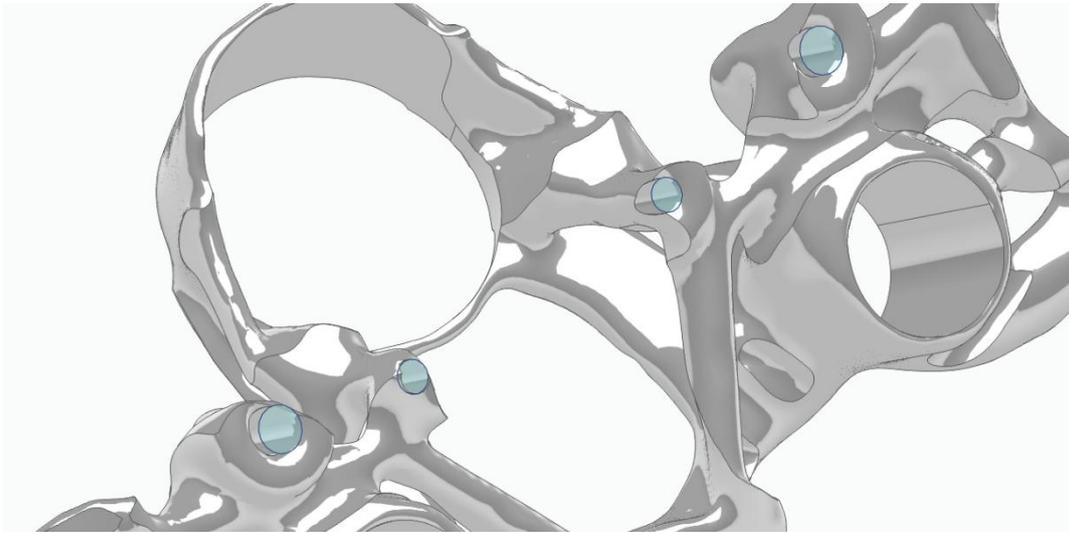


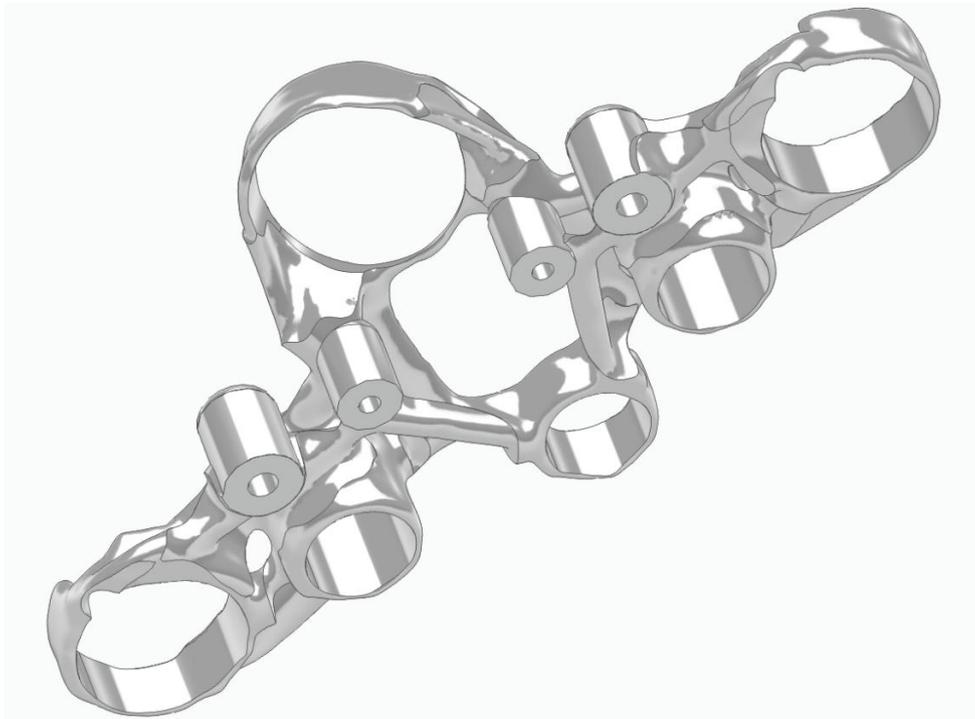
Figura 111 Detalle de las extrusiones del refinamiento de los agujeros interiores.

Fuente propia



*Figura 113 Detalle de los bocetos de vaciado del refinamiento de los agujeros inferiores.
Fuente propia*

En la Figura 111, Figura 112 y Figura 113 se pueden observar cómo se han definido los agujeros centrales inferiores donde van insertados los tornillos. Se ha realizado mediante la creación de bocetos (de 18 y 15mm) en los planos correspondientes y la posterior operación de extrusión con Solid Edge, asegurando su correcta posición y diámetro. Podemos observar el resultado final en la Figura 114.



*Figura 114 Detalle del resultado final del refinamiento de los agujeros
Fuente propia*

A continuación, tenemos el refinamiento de los agujeros de sujeción.

Para ello, realizamos el mismo procedimiento que el realizado anteriormente con los agujeros inferiores: realizamos un boceto exterior para la extrusión de material y extruimos y posteriormente se generaron bocetos interiores que permitieron realizar el vaciado del material con el diámetro exacto, previamente medido antes del escaneo de la pieza.

De este modo, se garantiza que las dimensiones obtenidas sean las más adecuadas para el montaje y la correcta sujeción de los componentes.

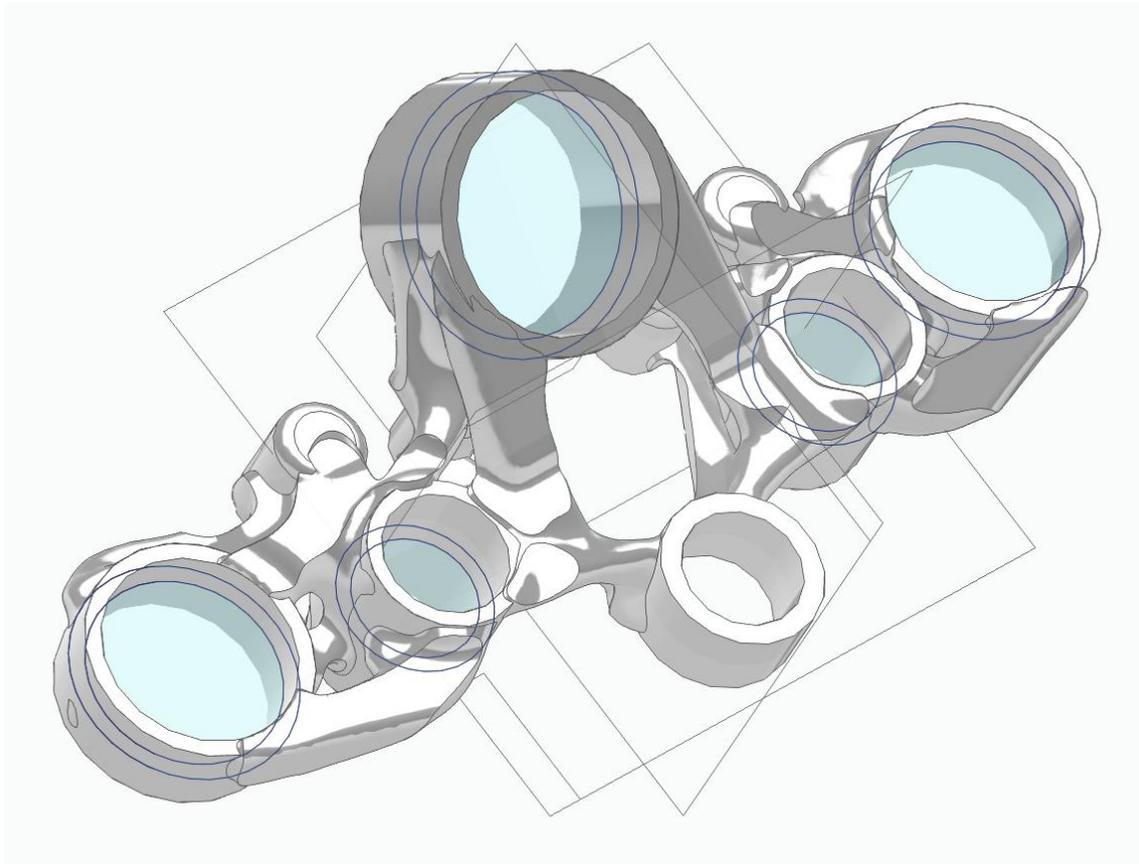


Figura 115 Detalle de la tija refinada con sus bocetos y operaciones que definen los agujeros de sujeción.

Fuente propia

8.2 REFINAMIENTO 2: SUAVIZADO

La pieza, antes de este refinamiento de suavizado se encuentra como la Figura 116.

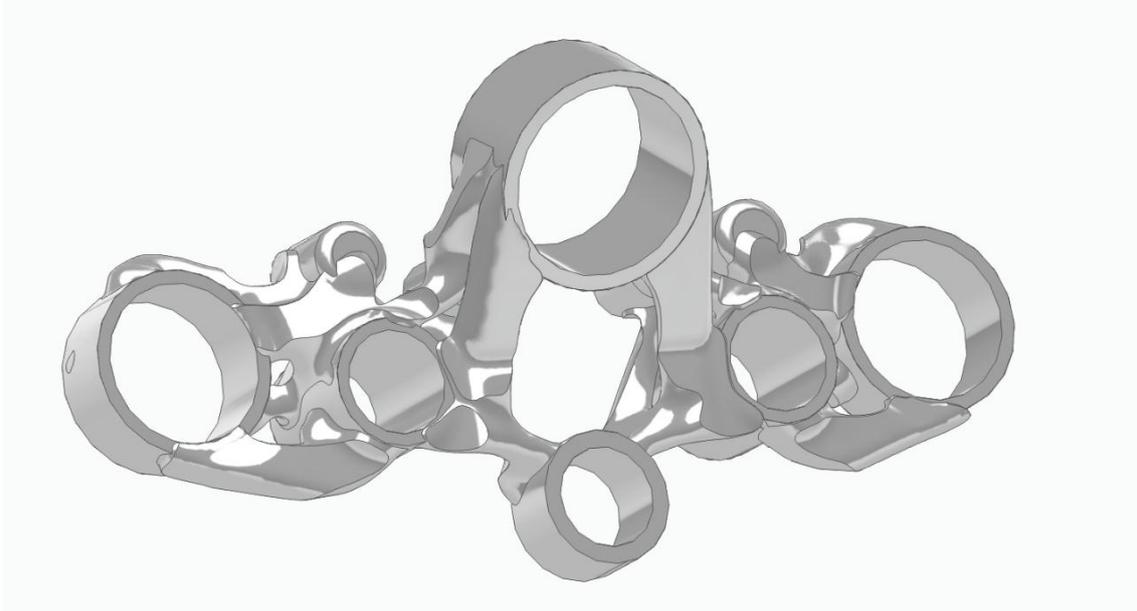


Figura 116 Detalle de la tija optimizada y refinada de agujeros, pero no refinada de suavizado.
Fuente propia

A continuación, se va a realizar un refinamiento global de toda la geometría utilizando el software Altair Inspire, que proporciona herramientas específicas para suavizar superficies, eliminar irregularidades generadas en el proceso de optimización y mejorar la continuidad geométrica de la pieza, llamada “Fit PolyNURBS”.

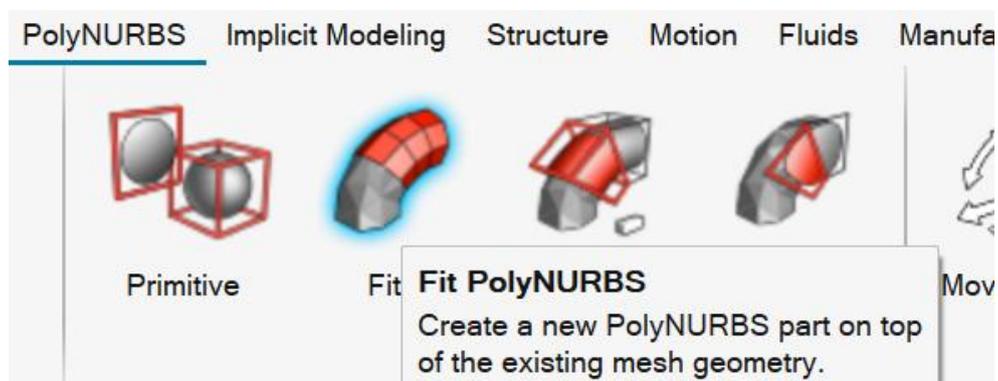


Figura 117 Detalle de la herramienta a usar de Altair Inspire Fit PolyNURBS.

Fuente propia

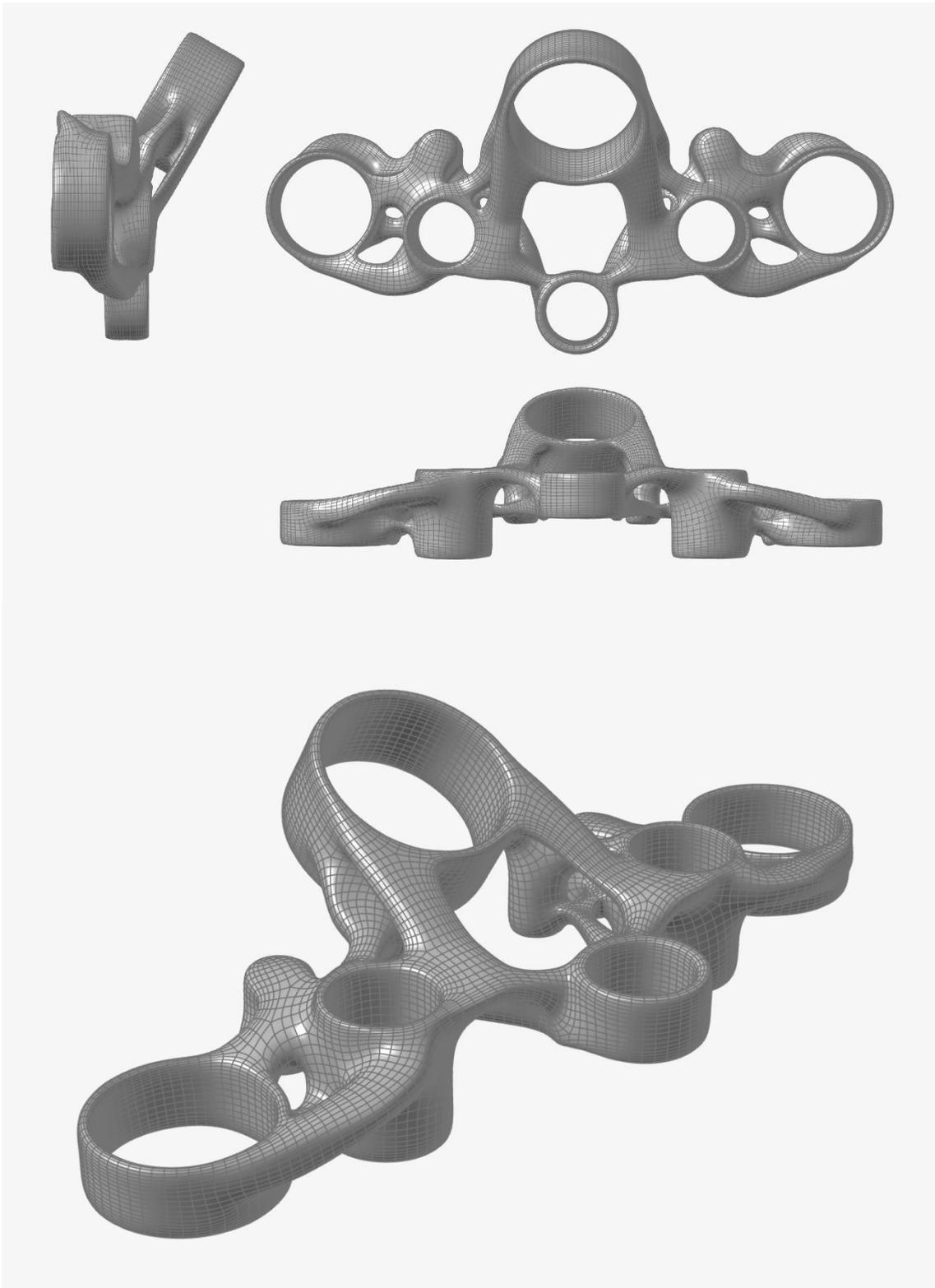


Figura 118 Detalle de la tija optimizada y refinada tanto de agujeros como de suavizado.

Fuente propia

8.3 SIMULACION FEM TRAS REFINAMIENTO

Una vez refinada la geometría, se volverá a importar el modelo a Solid Edge, donde se aplicará nuevamente un análisis por el método de elementos finitos (FEM) con las mismas condiciones de carga y restricciones descritas previamente.

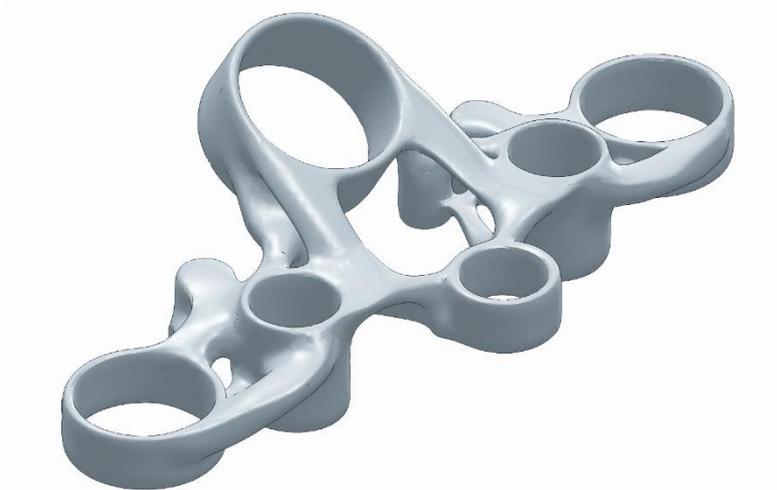


Figura 119 Tija optimizada y refinada sin retoque de agujeros.

Fuente propia

Para ello realizamos los últimos ajustes para la realización de esta simulación: extrusiones de vaciado del tamaño exacto de los agujeros de la tija que han sido deformados tras los refinamientos. En las figuras inferiores podemos observar estos bocetos realizados obteniendo los datos de las Tablas 1 y 2.

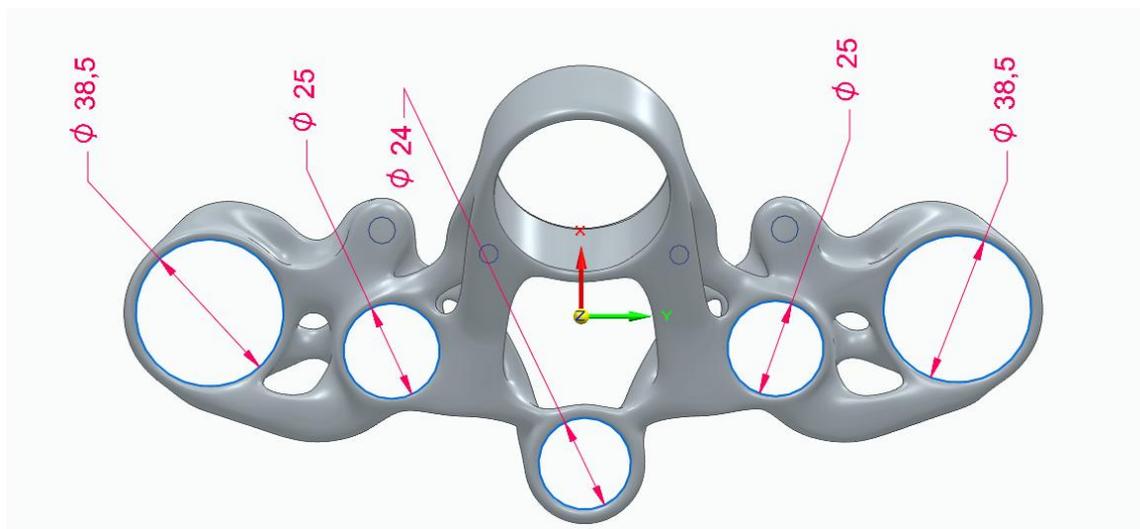


Figura 120 Ajuste agujeros exteriores.

Fuente propia

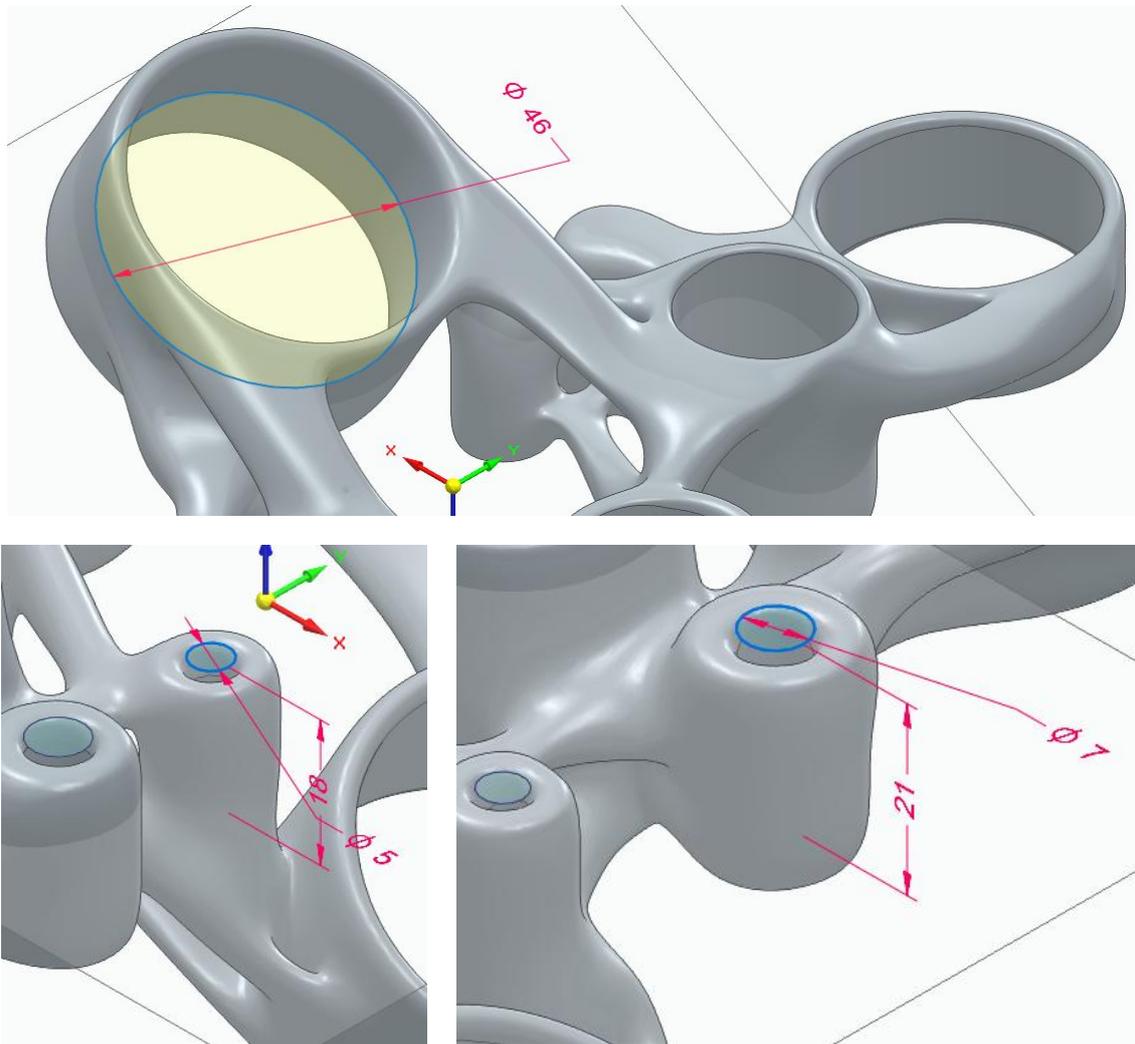


Figura 121 Ajuste de agujeros interiores y superior.

Fuente propia

A continuación, tras la realización de este último refinamiento podemos realizar la comprobación por FEM.

Este análisis permitirá verificar que la nueva versión de la pieza mantiene su integridad estructural y cumple con los criterios de diseño definidos, concluyendo así el proceso de optimización topológica y refinamiento antes de avanzar al siguiente capítulo, dedicado al estudio y aplicación de estructuras tipo Lattice.

Con el objetivo de continuar con el proceso de validación, se vuelven a aplicar las cargas y restricciones sobre la versión optimizada de la pieza.

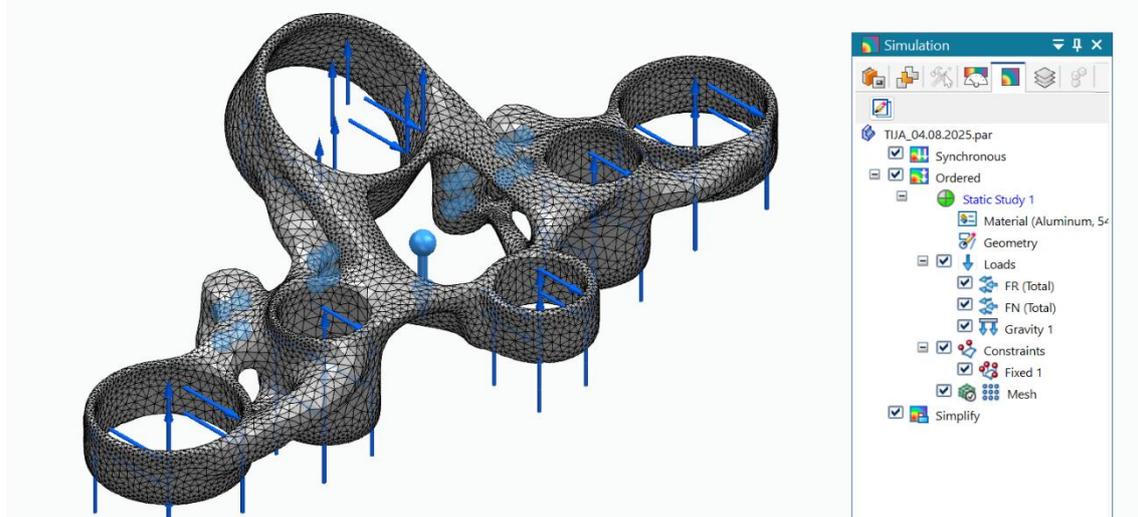


Figura 122 Detalle de las restricciones y cargas de la tija optimizada y refinada.
Fuente propia

Y, a continuación, realizamos la simulación por análisis de elementos finitos:

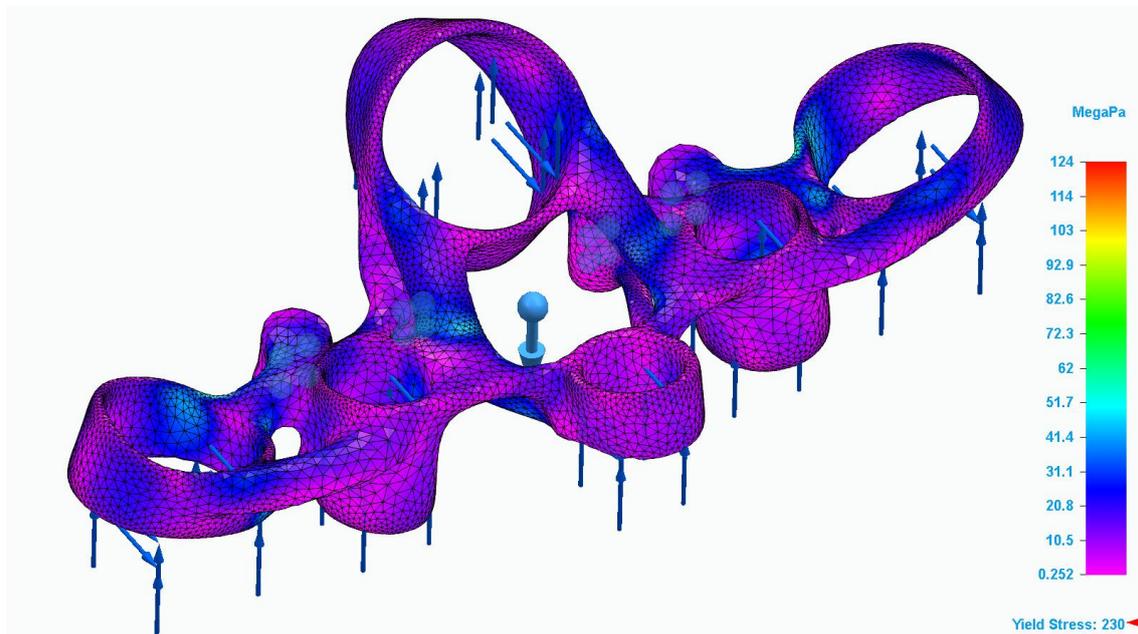


Figura 123 Simulación FEM de la tija optimizada y refinada.
Fuente propia

Al observar que la tensión máxima que soporta la pieza es de 124 MPa, muy por debajo del límite de resistencia de 230 MPa, se puede concluir que el diseño obtenido es satisfactorio y no presentará fallos estructurales. Por lo tanto, es posible avanzar a la siguiente etapa del proyecto: el relleno de estructuras lattices utilizando el programa Ntop.

9. RELLENO CON LATTICE

9.1 SOFTWARE NTOP

Para optimizar el rendimiento estructural y reducir el peso de la pieza en estudio, se ha incorporado la técnica de relleno mediante estructuras tipo lattice. Estas estructuras, ampliamente utilizadas en diseño avanzado y fabricación aditiva, permiten distribuir el material de forma eficiente manteniendo la resistencia mecánica y mejorando el comportamiento frente a cargas específicas.

El trabajo se ha realizado empleando el software nTop (nTopology), una herramienta especializada en el modelado generativo e implícito, que ofrece un control detallado sobre la geometría interna de los componentes.

La plataforma incluye módulos específicos para la creación y parametrización de lattices, diferenciando entre dos familias principales:

Surface-Based Lattices (implícitos): incluyen geometrías basadas en superficies periódicas mínimas (TPMS) y sus variantes con refuerzo o paredes (Walled TPMS), que proporcionan una alta relación rigidez-peso.

Beam-Based Lattices (gráficos): conformadas por celdas unitarias tipo viga, pudiendo ser periódicas o no periódicas, lo que facilita la adaptación a zonas específicas de la pieza.

A través de la plataforma de aprendizaje nTop Learn, se han seguido cursos introductorios que explican las propiedades de los lattices, la definición de celdas unitarias (Unit Cells), la generación de mapas de celdas (Cell Maps), y las distintas estrategias para integrar estas estructuras en piezas de geometría compleja.

Esto ha permitido adquirir los conocimientos necesarios para la implementación controlada de rellenos lattice en el diseño final, garantizando un equilibrio óptimo entre peso, rigidez y funcionalidad.

9.2 PROCEDIMIENTO RELLENO CON LATTICE

El procedimiento para obtener la pieza rellena a partir de estructuras lattice tras la preparación del modelo en Solid Edge explicado en el capítulo anterior donde se realizaron tareas de refinado y suavizado de superficies, además de una redefinición más precisa de los agujeros, comienza con la exportación en formato STL a el nuevo software a usar llamado nTopology.

En este entorno, el modelo se representaba como una malla triangular volumétrica. Este hecho planteó una dificultad inicial, ya que las herramientas necesarias para generar una cáscara o borde (shell) y aplicar después el relleno con estructuras reticuladas no podían actuar directamente sobre un cuerpo de malla. En la imagen posterior podemos observar cómo, a partir de un plano de corte, la pieza en formato STL añadida al software se abre como una malla de cuerpo sólida.

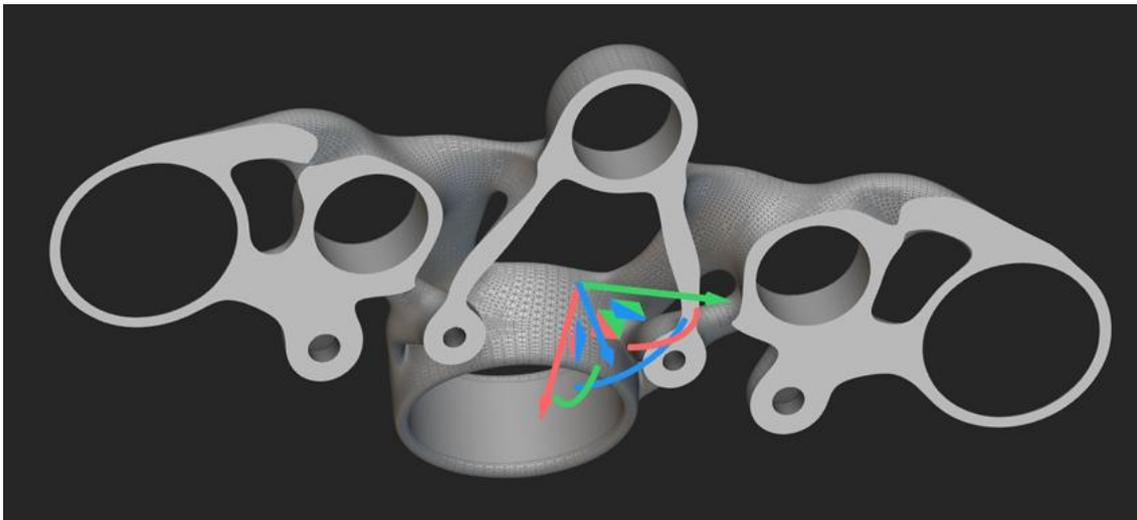


Figura 124 Detalle del modelo en forma de cuerpo de malla.

Fuente propia

Para resolver esta limitación, fue necesario convertir la malla en un cuerpo implícito. Gracias a esta transformación, el modelo pasó de ser únicamente una malla para considerarse como un sólido dentro del programa, lo que permitió habilitar las funciones necesarias para la siguiente fase.

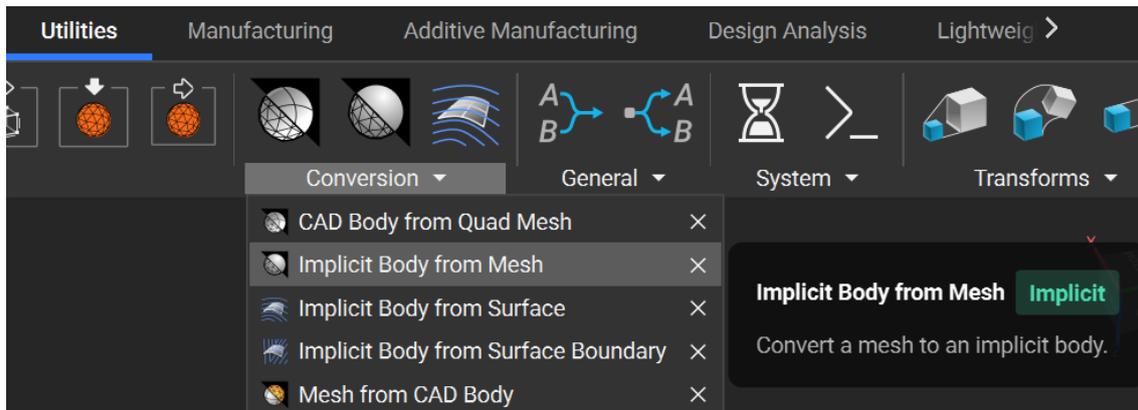


Figura 125 Detalle de la herramienta Implicit body de nTop
Fuente propia

En la imagen posterior podemos observar cómo, tras utilizar esta herramienta el modelo se transforma de malla a sólido.

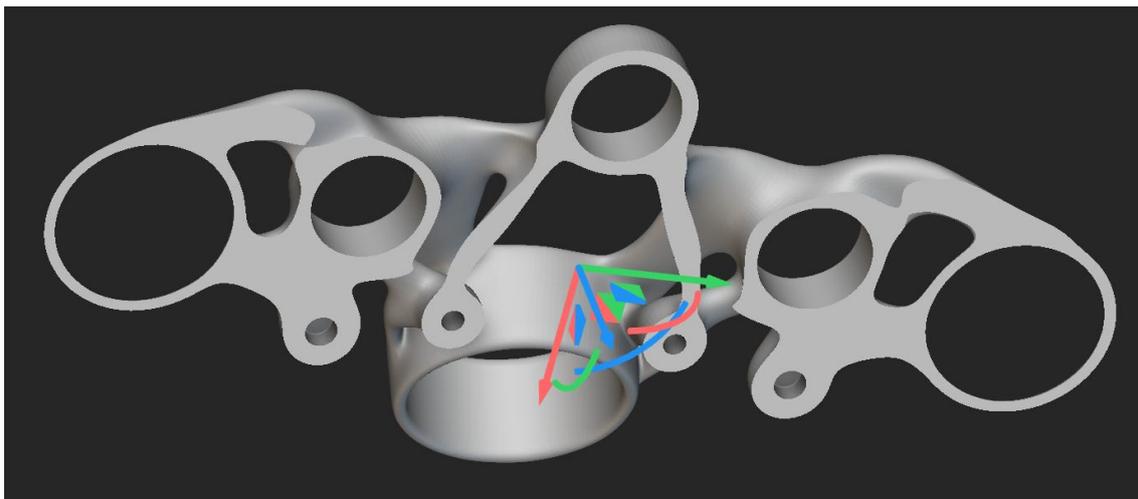


Figura 126 Detalle del modelo en forma de cuerpo implícito.
Fuente propia

Una vez obtenido el cuerpo implícito, se procedió a la creación de la cáscara o borde (shell). Con ello se generó una capa exterior sólida de 1 mm que conserva la forma de la tija de motocicleta y, al mismo tiempo, delimita el volumen interno de la pieza. Este espacio interior quedó preparado para ser rellenado posteriormente mediante diferentes configuraciones de estructuras lattice.

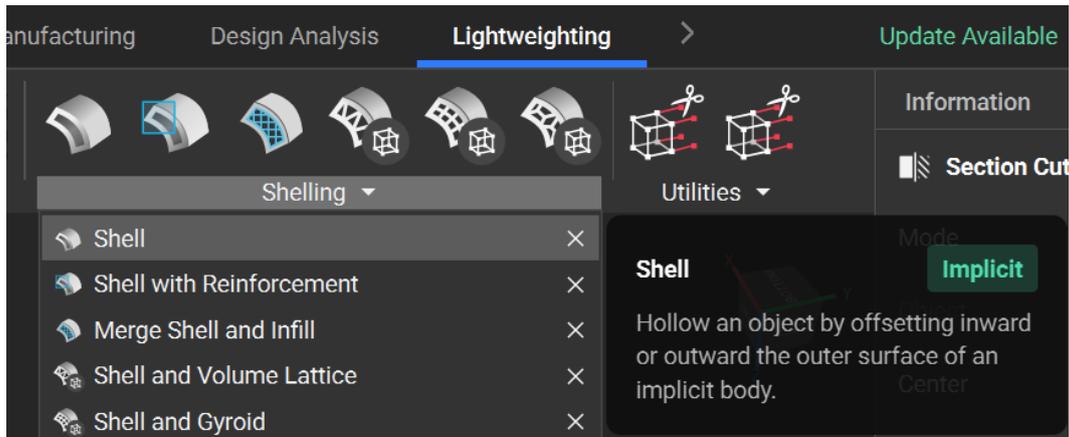


Figura 127 Detalle de la herramienta shell en nTop
Fuente propia

En la imagen posterior podemos observar cómo, tras utilizar esta herramienta el modelo se transforma de malla a sólido.

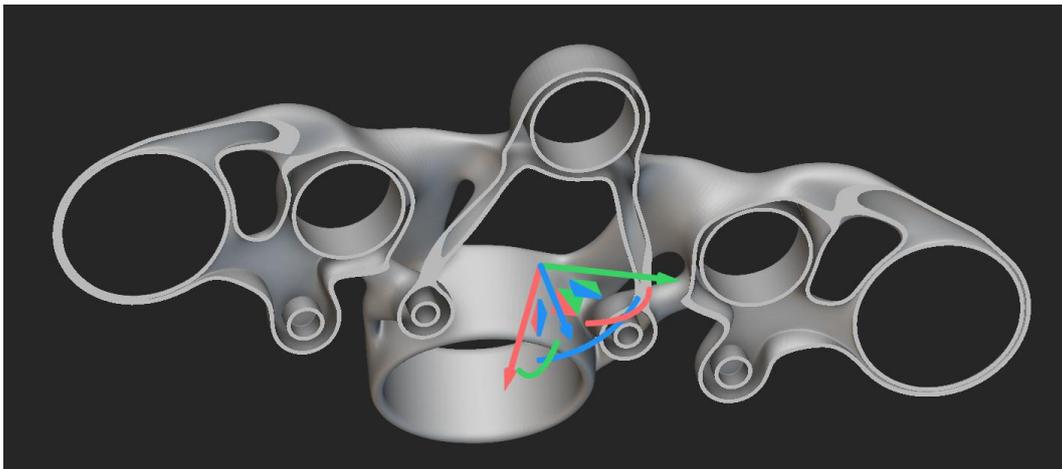


Figura 128 Detalle del modelo en forma de cuerpo implícito hueco.
Fuente propia

Este proceso que acabamos de comentar se esquematiza automáticamente en el programa a través de un árbol de procedimiento, siendo este el mostrado en la figura posterior.

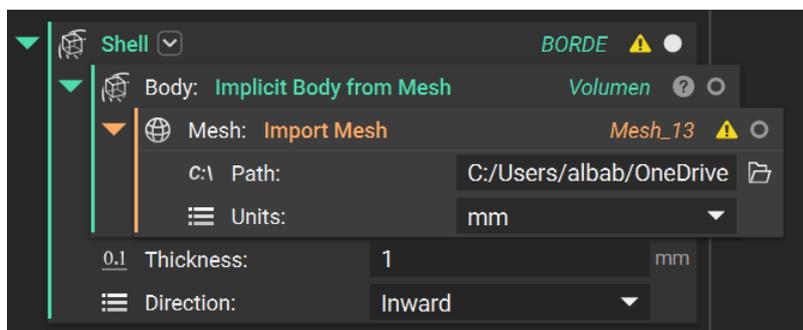


Figura 129 Detalle del árbol de procedimiento de "Shell"
Fuente propia

9.2.1 DISTRIBUCION LATTICE 1: CUBIC

A continuación, vamos a diseñar las estructuras internas de la pieza mediante lattices, que permiten reducir el peso manteniendo la resistencia. Para ello utilizaremos la herramienta Periodic Lattice de nTop, la cual nos permite crear redes internas repetitivas a partir de una celda unitaria (unit cell) y distribuirla dentro de un volumen definido mediante un mapa de celdas (cell map).

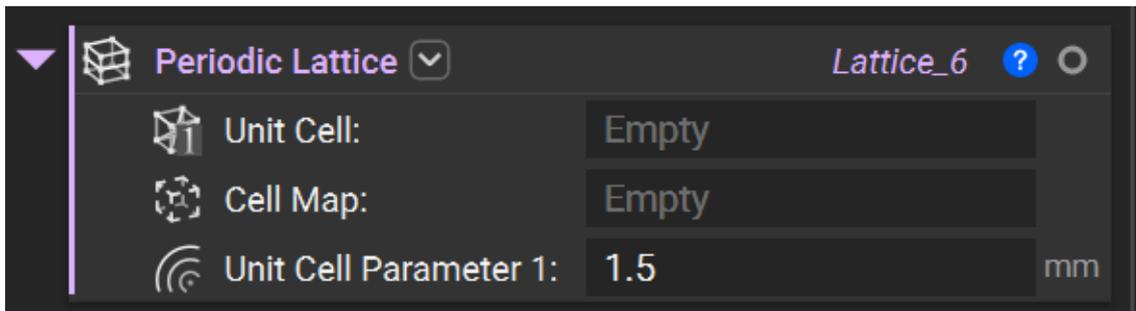


Figura 130 Detalle de la herramienta de Periodic Lattice de nTop

Fuente propia

En el bloque Periodic Lattice, los conceptos clave son la unit cell y el cell map. La unit cell o celda unitaria es la estructura repetitiva más pequeña que define la geometría del lattice y se repite periódicamente en el espacio para formar la red completa; se puede entender como un “bloque de construcción”, cuya forma y parámetros, como el grosor de barras o el espesor de paredes, determinan la rigidez, resistencia y densidad del lattice.

En nTop, existen distintos tipos de celdas unitarias, como las Graph Unit Cells, basadas en grafos (por ejemplo, body-centered cubic), o las TPMS Unit Cells, basadas en superficies mínimas periódicas (por ejemplo, gyroid o diamond).

Por otra parte, el cell map o mapa de celdas define la región o volumen en el que se distribuye la celda unitaria, indicando dónde y cómo se repite dentro de la pieza. Dependiendo de la geometría, puede ser un Rectangular Cell Map, que organiza las celdas en una rejilla cartesiana, un Cylindrical Cell Map, que las alinea a lo largo de un cilindro, o mapas más complejos, como esféricos. Además, el cell map permite ajustar la orientación, el tamaño de las celdas y los ejes de referencia (frame), controlando de manera precisa cómo se llena el volumen de la pieza con la celda elegida.

Como primera configuración de lattice a analizar, seleccionaremos una unit cell de tipo gráfico (Graph Unit Cell) y la configuraremos como cúbica centrada en el cuerpo de la tija.

Esta elección nos permitirá crear una red interna regular y estructuralmente eficiente, que se adaptará al volumen definido por la geometría del componente y servirá como referencia inicial para evaluar el comportamiento de la pieza con estructuras internas ligeras.

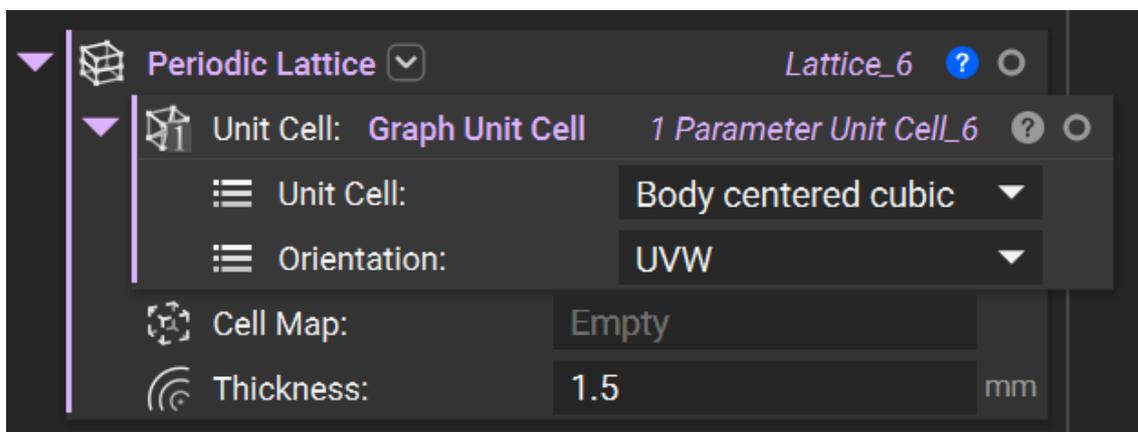


Figura 131 Detalle de la herramienta de Graph Unit Cell.

Fuente propia

Por otro lado, para distribuir la celda unitaria a lo largo del volumen de la pieza, seleccionaremos un Cell Map rectangular.

El volumen que utilizará este mapa será el cuerpo implícito definido previamente a partir de la malla de la pieza original, permitiendo que la red de celdas se ajuste exactamente al interior del componente. Esta configuración asegura que la estructura interna ocupe todo el espacio disponible de manera ordenada y uniforme.

Aunque el objetivo principal de la estructura lattice es reducir el peso de la pieza, es fundamental que siga cumpliendo las mismas restricciones y soportando las mismas fuerzas que tendría si fuese sólida. Por ello, hemos seleccionado un tamaño de celda de $5 \times 5 \times 5 \text{ mm}^3$, proporcional al tamaño de la pieza, adoptando un formato cúbico, de manera que la distribución uniforme de la celda unitaria permita mantener la rigidez y resistencia necesarias mientras se optimiza la masa del componente.

Por último, se ha escogido un espesor de estructura lattice de 1,5 mm, lo que garantiza un equilibrio entre ligereza y resistencia.

En la figura posterior se puede observar el árbol de procedimiento final, que resume todas las configuraciones y herramientas utilizadas en nTop para generar la estructura interna de la pieza, incluyendo la selección de la unit cell tipo gráfico, el cell map rectangular, el tamaño de celda y el espesor de la red lattice.

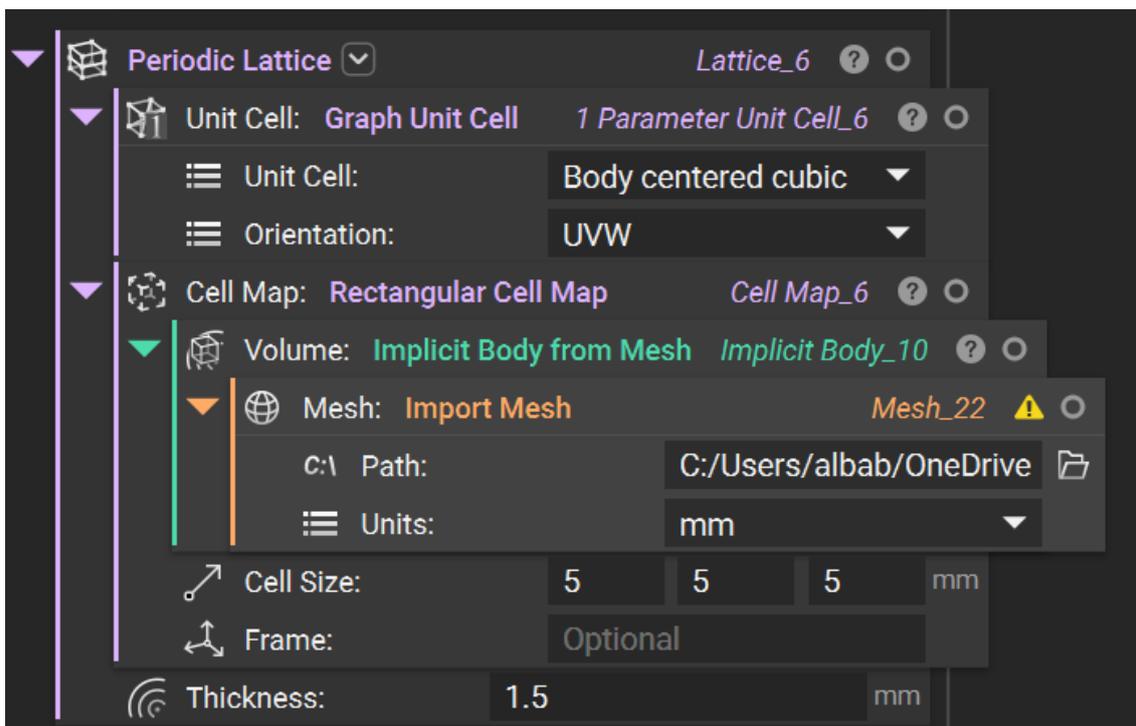


Figura 132 Detalle de la herramienta de Rectangular Cell Map

Fuente propia

Esta configuración nos muestra una estructura lattice distribuida a lo largo de un prisma rectangular con las dimensiones de nuestra tija, como se puede observar en la Figura 133.

Por lo tanto, para poder visualizar y analizar este patrón a lo largo de toda la estructura, es necesario utilizar otra herramienta dentro del programa nTop, que permita que sea solamente a lo largo del volumen de nuestra tija.

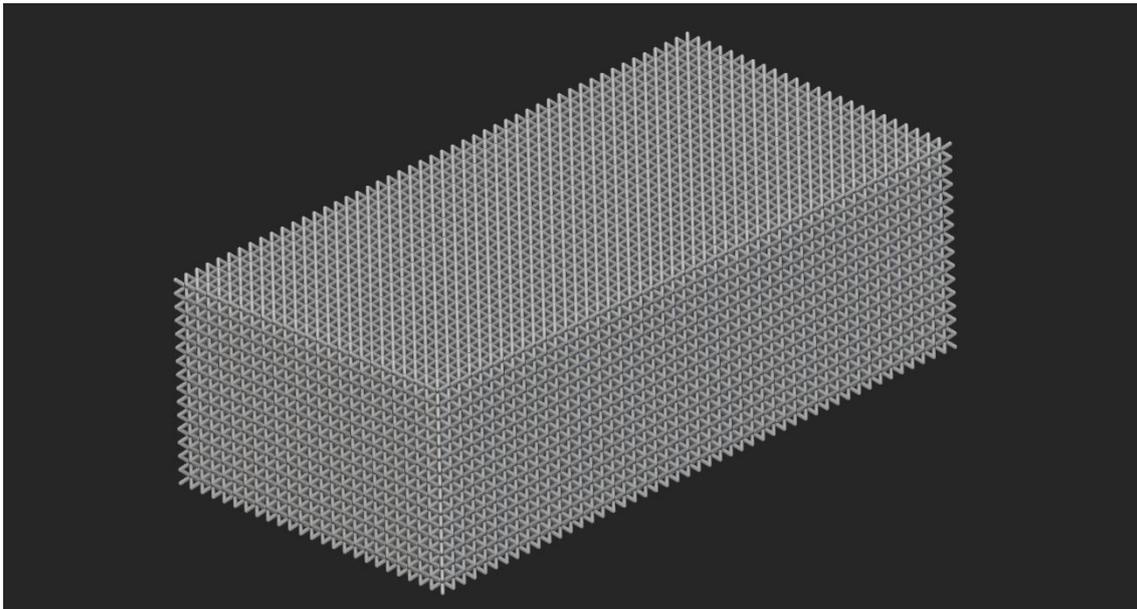


Figura 133 Detalle de la primera estructura lattice sin intersección con la tija.

Fuente propia

La herramienta que utilizaremos para lograr esta configuración es la intersección booleana. Con ella, se realizará una intersección entre la tija, en su formato de cuerpo implícito, y la estructura lattice generada previamente, como se muestra en la Figura 134.

Este procedimiento permite que la red interna se ajuste exactamente al volumen de la tija, eliminando cualquier exceso de material y asegurando que la estructura lattice se integre perfectamente con la geometría del componente.

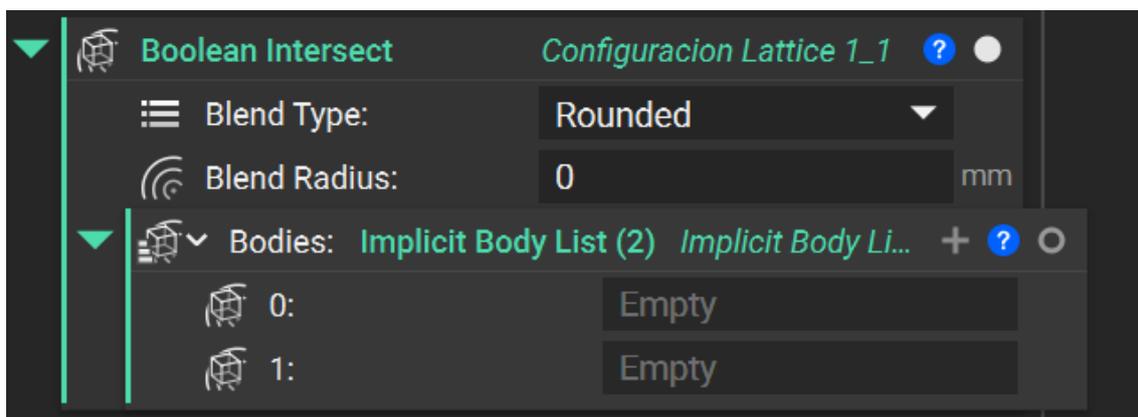


Figura 134 Detalle de la herramienta intersección booleana sin parámetros añadidos.

Fuente propia

En la intersección booleana, como cuerpo “0” añadiremos todo el árbol de configuración del Periodic Lattice realizado previamente, mientras que como cuerpo “1” utilizaremos el cuerpo implícito de la tija, tal y como se muestra en la Figura 135.

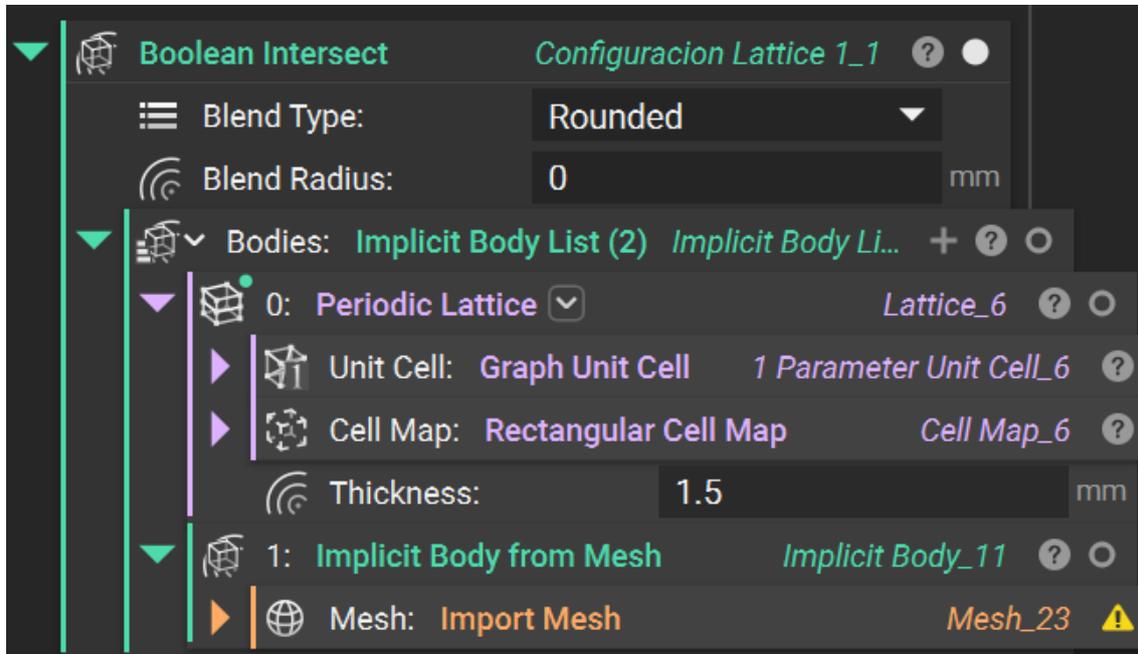


Figura 135 Detalle de la herramienta intersección booleana 1 con parámetros añadidos.
 Fuente propia

Toda esta configuración nos proporciona la estructura lattice 1 final:



Figura 136 Estructura lattice 1 sin borde
 Fuente propia

Si activamos tanto la cáscara (Shell) como el relleno lattice correspondiente a esta primera configuración, obtenemos el siguiente árbol de procedimiento y modelo de la tija:

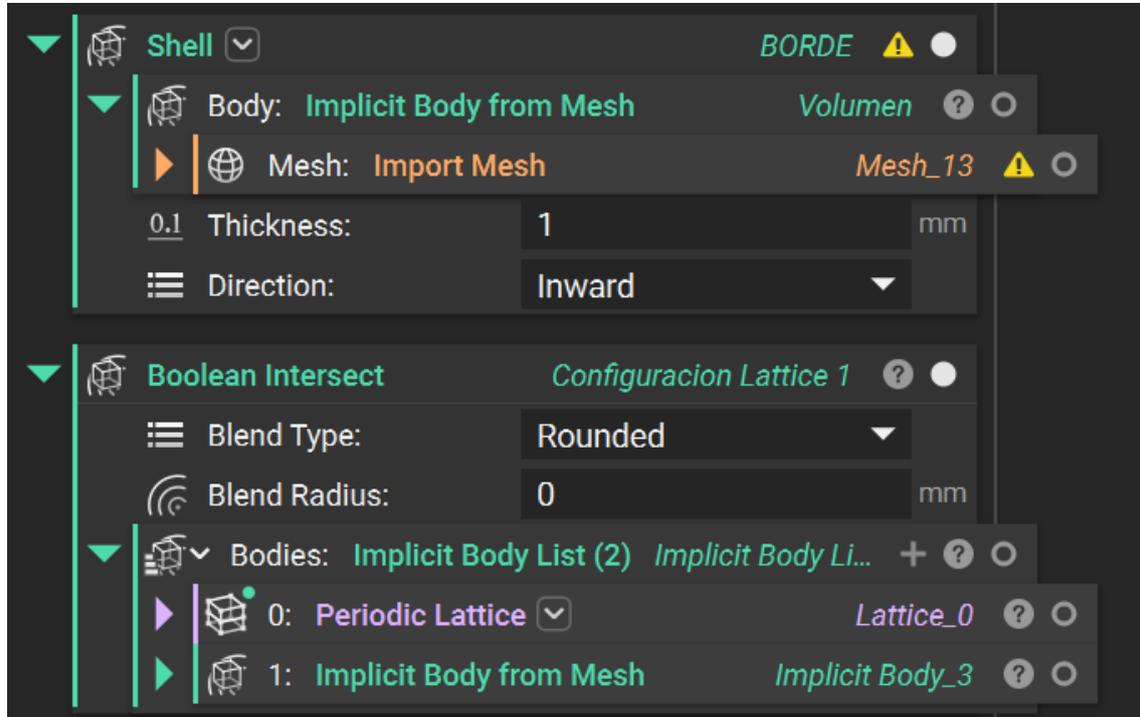


Figura 137 Configuración de la estructura lattice final 1

Fuente propia



Figura 138 Tija optimizada, refinada y rellena con Lattice 1.

Fuente propia

9.2.2 DISTRIBUCION LATTICE 2: GYROID

Como segunda configuración de lattice a analizar, seleccionaremos una unit cell de tipo Walled TPMS, en este caso con geometría gyroid. Este tipo de celda, basada en superficies mínimas periódicas, permite generar estructuras internas continuas y con una excelente relación entre resistencia y ligereza.

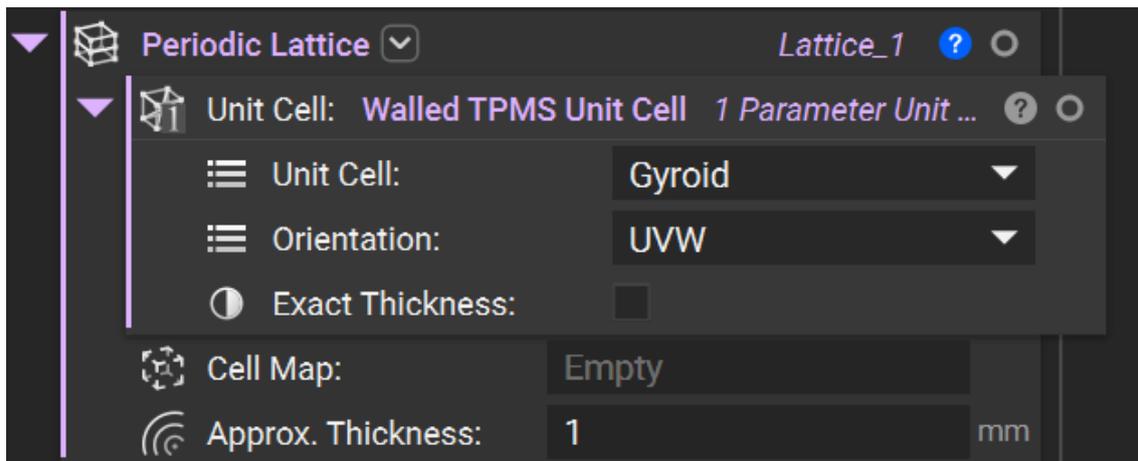


Figura 139 Detalle de la herramienta de Walled TPMS Unit Cell: Gyroid.

Fuente propia

Para la distribución de esta celda unitaria utilizaremos un Cylindrical Cell Map, ya que su forma se ajusta mejor a la geometría de la tija y en particular a la zona del orificio central. De este modo, la red de celdas se organizará en torno a un patrón cilíndrico en lugar de rectangular.

En este mapa hemos definido un radio de celda de 10 mm, una altura de 10 mm y un número de arcos igual a 20, de forma que la distribución se adapte a la geometría del volumen.

Además, mediante el ajuste del frame, se ha alineado correctamente el origen y los ejes de referencia con el orificio de la tija, consiguiendo que la red cilíndrica se posicione de manera precisa.

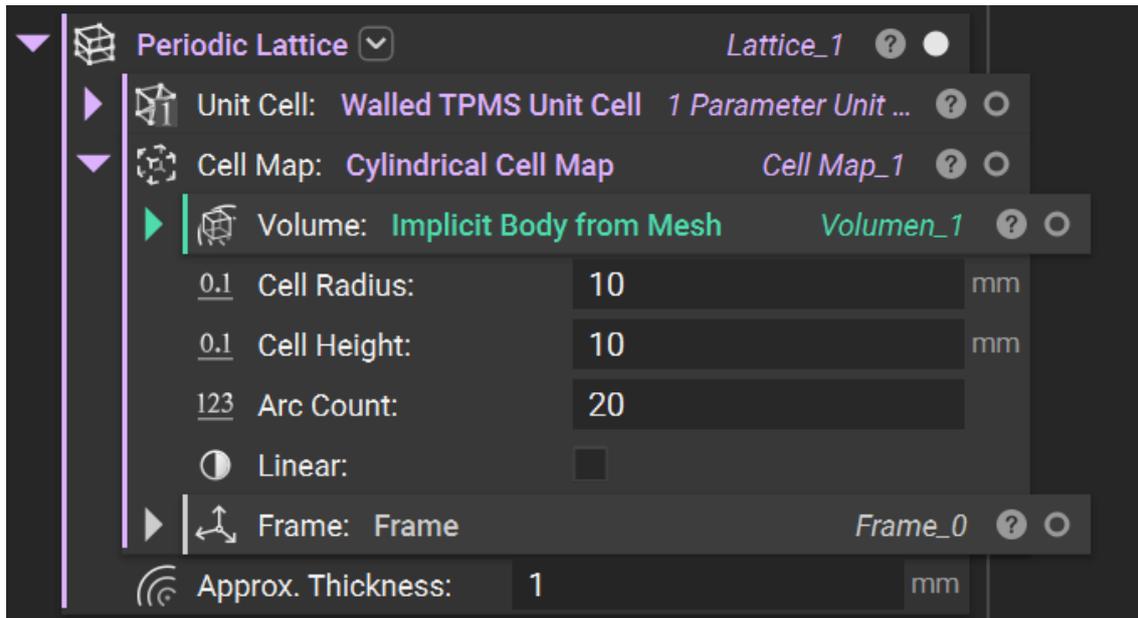


Figura 140 Detalle de la herramienta Cylindrical Cell Map de lattice 2.

Fuente propia

Una vez configurada la unit cell y el cell map, se integran en el bloque Periodic Lattice, asignando un espesor de 1,5 mm a las paredes del TPMS. El resultado es una estructura interna de tipo gyroid mapeada cilíndricamente, que se diferencia de la primera configuración rectangular por su mayor continuidad y adaptación geométrica.

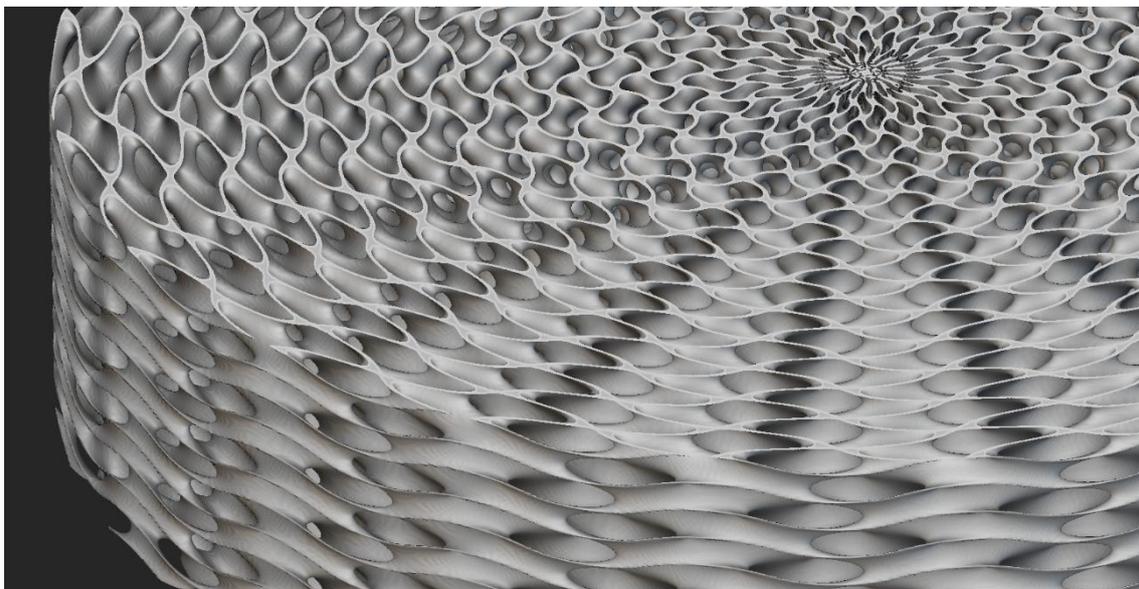


Figura 141 Detalle de la segunda estructura lattice sin intersección con la tija

Fuente propia

Al igual que en la configuración anterior, es necesario realizar una intersección booleana entre la estructura lattice generada y el cuerpo implícito de la tija, lo que asegura que el patrón quede exactamente contenido en el volumen de la pieza.

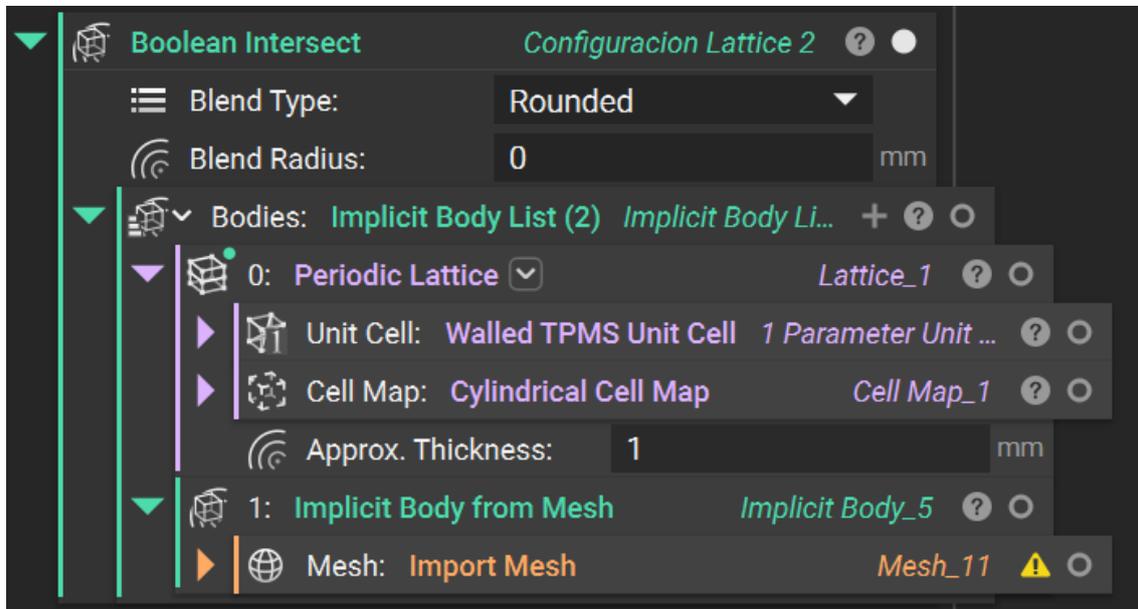


Figura 142 Detalle de la herramienta intersección booleana 2.
Fuente propia

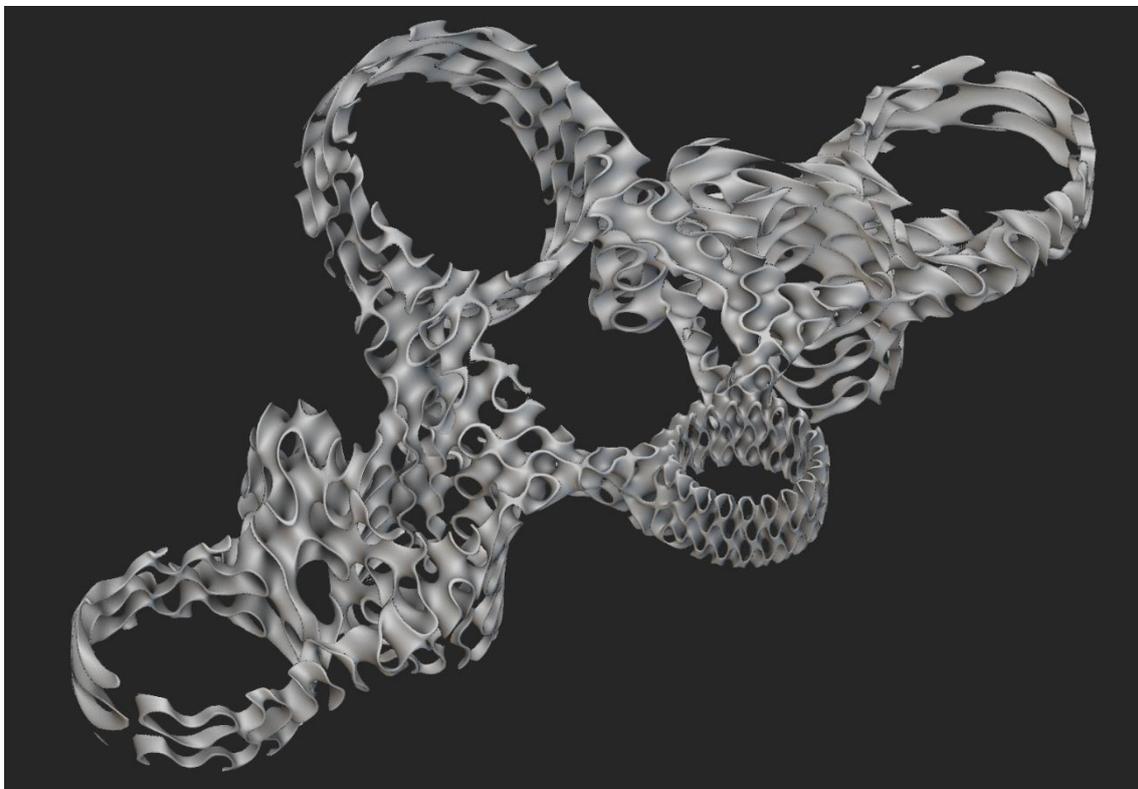


Figura 143 Estructura lattice 2 sin borde
Fuente propia

Finalmente, al activar tanto la cáscara externa (Shell) como el relleno lattice de tipo Walled TPMS, se obtiene el modelo final de la tija para esta segunda configuración. En la figura posterior se puede observar el resultado geométrico del nuevo modelo, cortado a través de un plano para observar su interior.

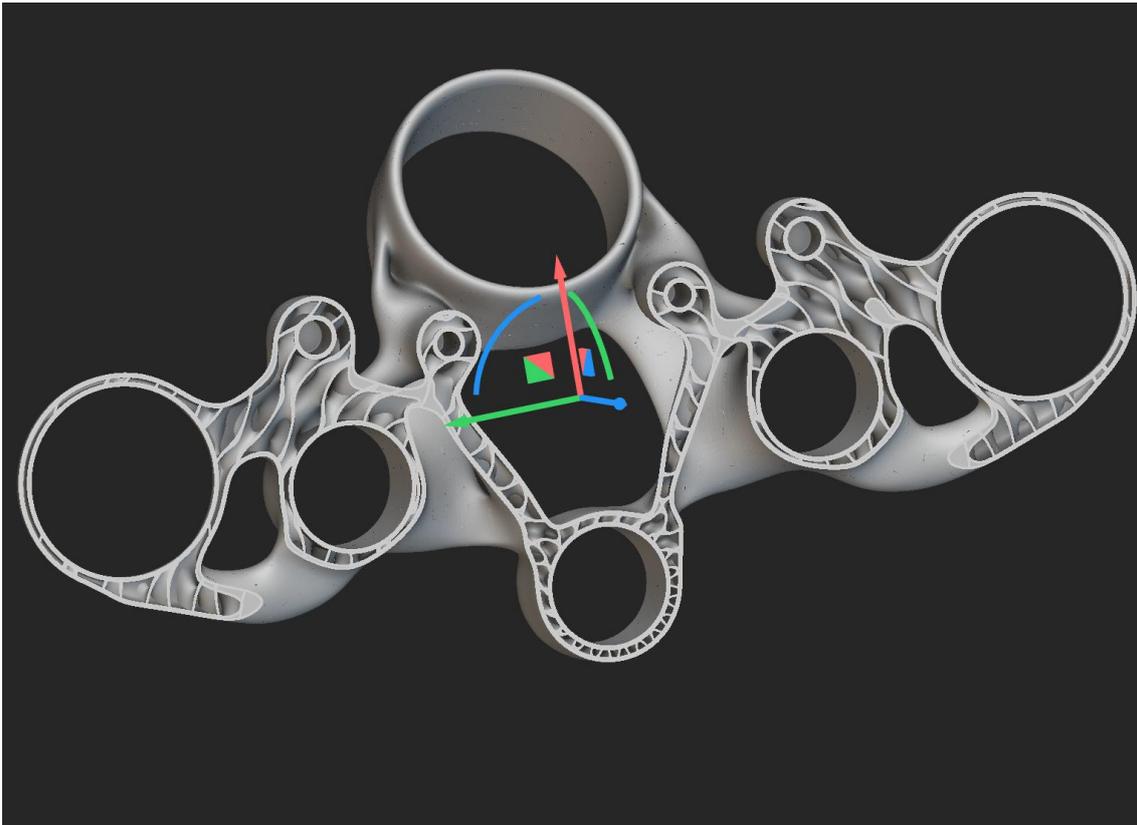


Figura 144 Tija optimizada, refinada y rellena con Lattice 2

Fuente propia

9.2.3 DISTRIBUCION LATTICE 3: SCHWARZ

En esta tercera configuración de lattice seleccionaremos una unit cell de tipo Walled TPMS, pero en este caso con geometría Schwarz. Este tipo de celda, al igual que el gyroid, se basa en superficies mínimas periódicas, pero presenta un patrón distinto que proporciona una distribución más equilibrada de tensiones y una excelente capacidad de absorción de cargas.

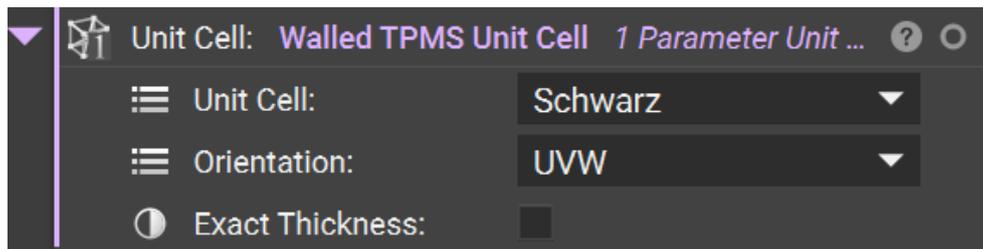


Figura 145 Detalle de la herramienta de Walled TPMS Unit Cell: Schwarz

Fuente propia

En este caso vamos a hacer uso de un mapa de celda rectangular con el objetivo de adaptar el patrón Schwarz a la geometría de la tija y obtener una distribución interna optimizada.

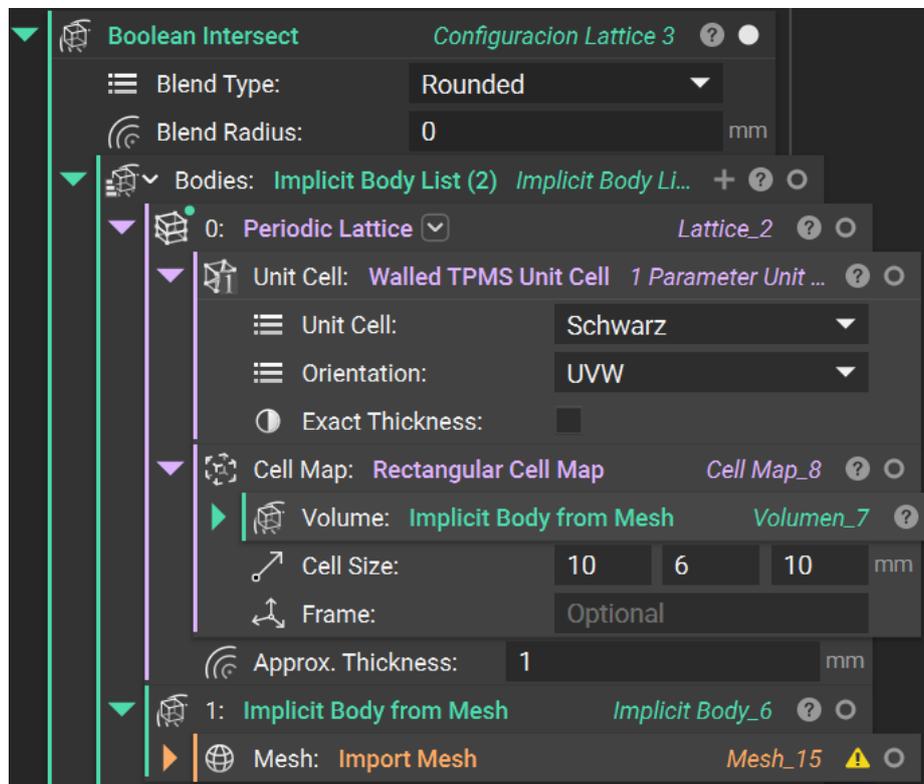


Figura 146 Detalle del árbol de configuración del modelo lattice 3

Fuente propia

Una vez definidos la celda y el mapa rectangular, ambos se integran dentro del bloque Periodic Lattice, estableciendo un espesor de 1 mm para las paredes de la estructura.



Figura 147 Estructura lattice 3 sin borde
Fuente propia

Finalmente, al activar tanto la cáscara externa (Shell) como el relleno lattice de tipo Walled TPMS, se obtiene el modelo final de la tija para esta segunda configuración.

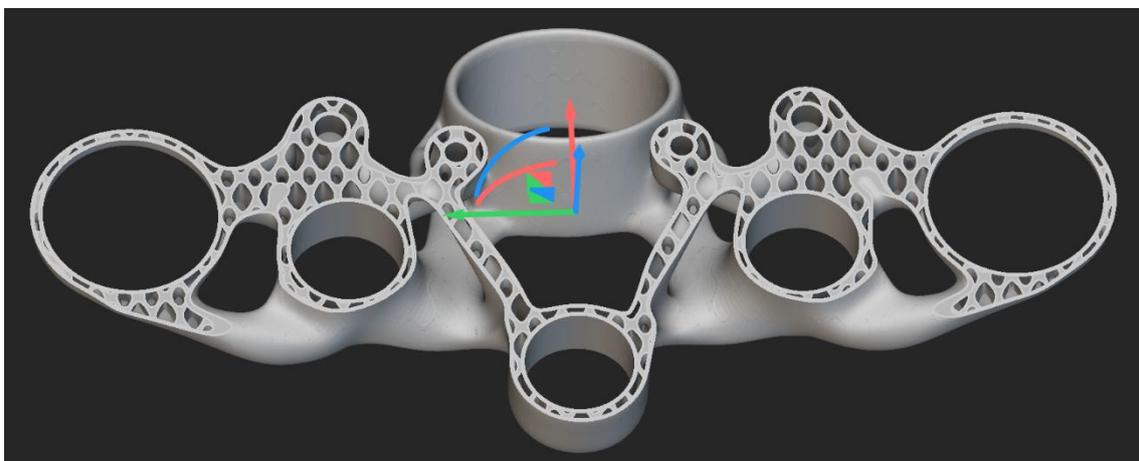


Figura 148 Tija optimizada, refinada y rellena con Lattice 3
Fuente propia

9.2.4 DISTRIBUCION LATTICE 4: LILINOID

En esta cuarta configuración seleccionaremos una unit cell de tipo Walled TPMS con geometría Lidinoid. Este tipo de celda, menos común que el gyroid o el schwarz, también se basa en superficies mínimas periódicas y se caracteriza por una conectividad más compleja y un patrón tridimensional altamente eficiente para distribuir esfuerzos.

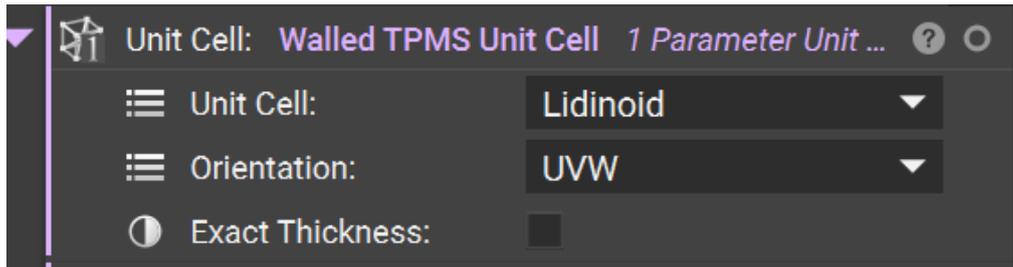


Figura 149 Detalle de la herramienta de Walled TPMS Unit Cell: Lidinoid
Fuente propia

En este caso vamos a hacer uso de un mapa de celda rectangular con el objetivo de adaptar el patrón Lidinoid a la geometría de la tija y obtener una distribución interna optimizada.

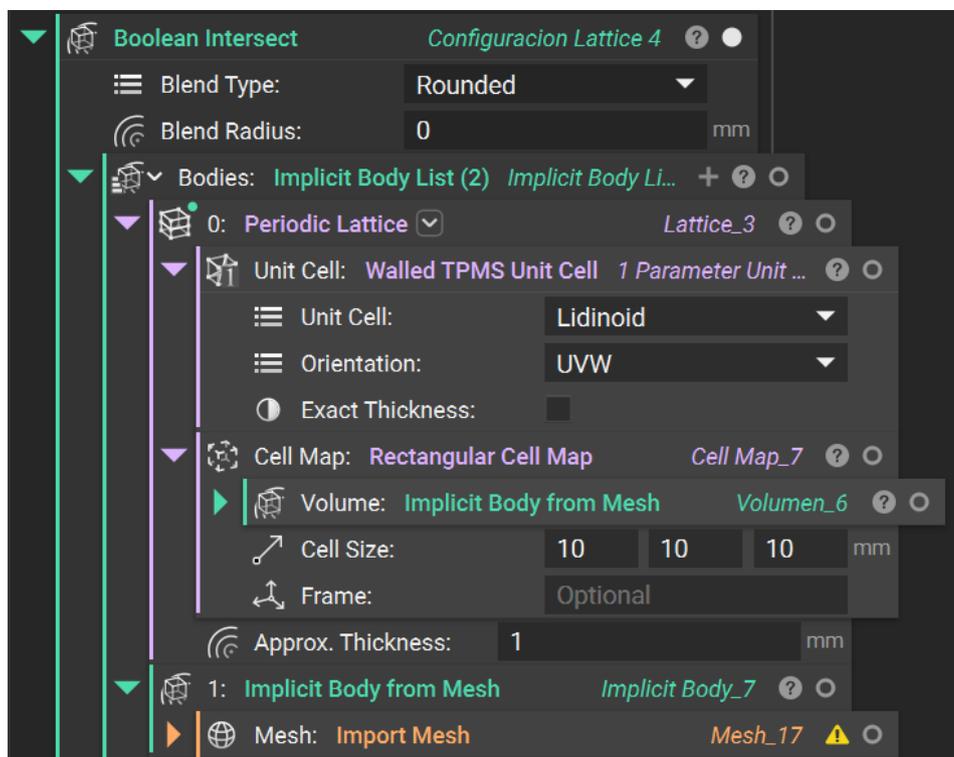


Figura 150 Detalle del árbol de configuración del modelo lattice 4
Fuente propia

Una vez definidos la celda y el mapa cilíndrico, ambos se integran dentro del bloque Periodic Lattice, estableciendo un espesor de 1 mm para las paredes de la estructura.



Figura 151 Estructura lattice 4 sin borde
Fuente propia

Finalmente, al activar tanto la cáscara externa (Shell) como el relleno lattice de tipo Walled TPMS, se obtiene el modelo final de la tija para esta segunda configuración.

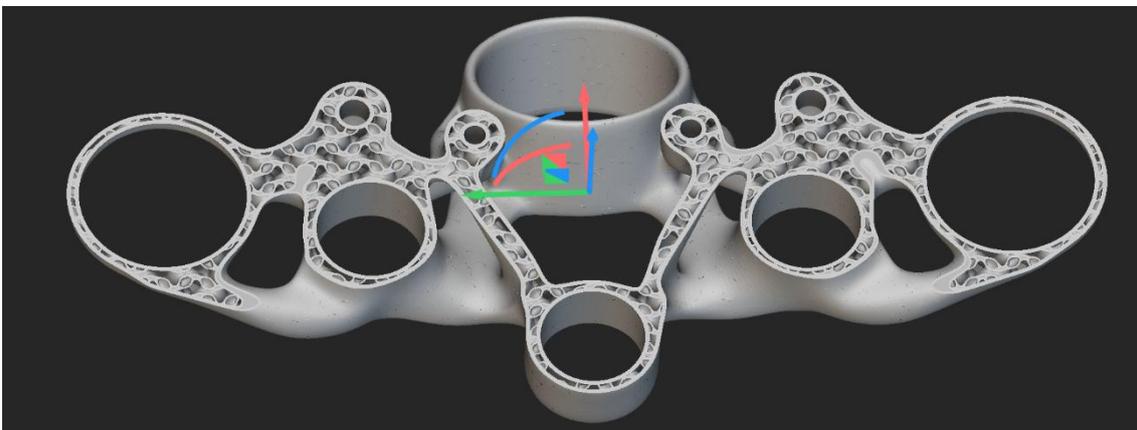


Figura 152 Tija optimizada, refinada y rellena con Lattice 4
Fuente propia

9.2.5 DISTRIBUCION LATTICE 5: SPLIT-P

En esta quinta configuración seleccionaremos una unit cell de tipo Walled TPMS con geometría Split-P. Este tipo de celda se basa en superficies mínimas periódicas, presentando un patrón característico en forma de “canales” interconectados, lo que permite una buena combinación entre ligereza, rigidez y disipación de esfuerzos dentro de la pieza.

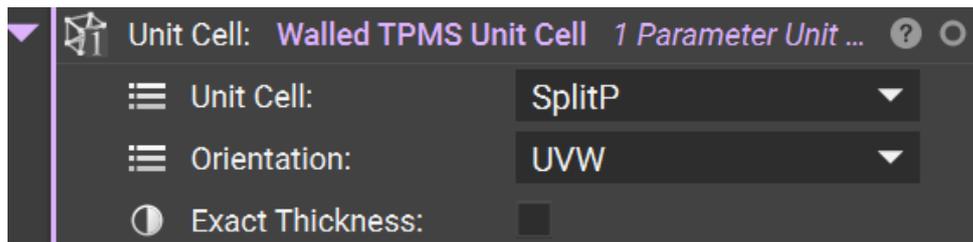


Figura 153 Detalle de la herramienta de Walled TPMS Unit Cell: SplitP
Fuente propia

En este caso vamos a hacer uso de un mapa de celda rectangular con el objetivo de adaptar el patrón SplitP a la geometría de la tija y obtener una distribución interna optimizada.

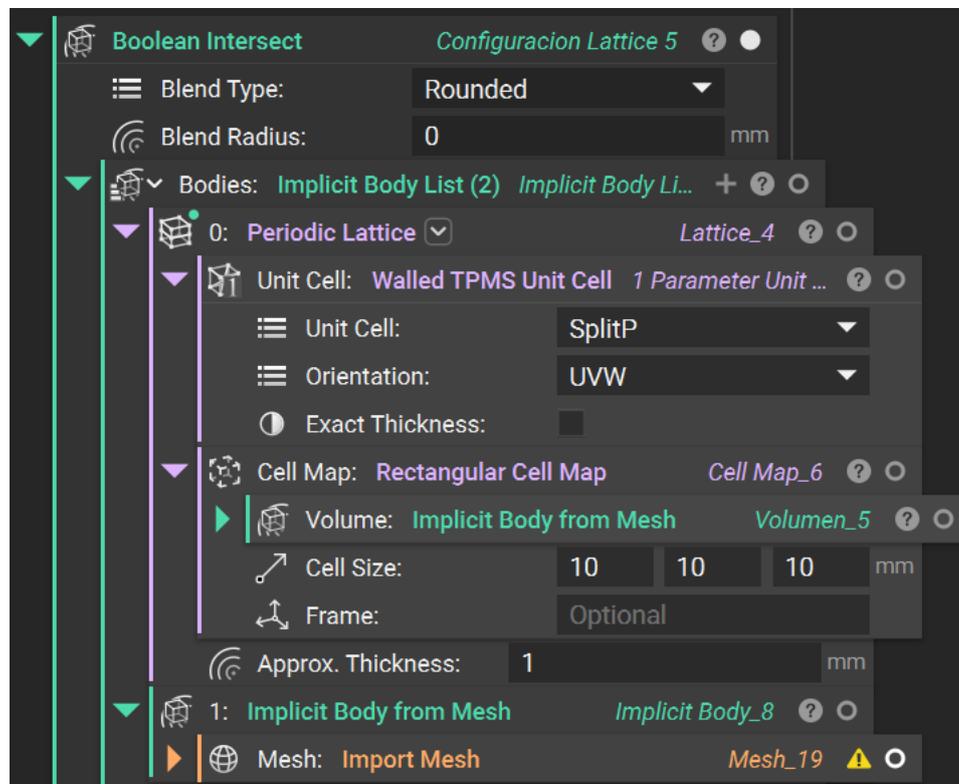


Figura 154 Detalle del árbol de configuración del modelo lattice 5
Fuente propia

Una vez definidos la celda y el mapa rectangular, ambos se integran dentro del bloque Periodic Lattice, estableciendo un espesor de 1 mm para las paredes de la estructura.

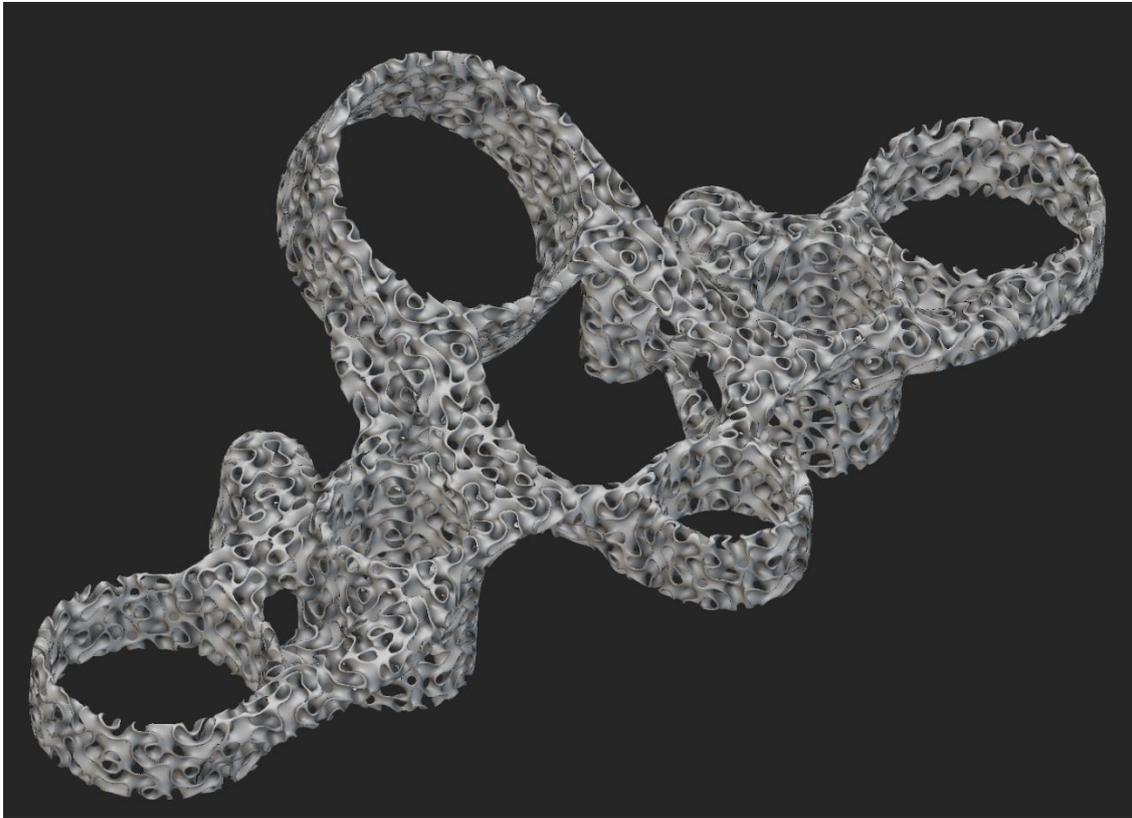


Figura 155 Estructura lattice 5 sin borde
Fuente propia

Finalmente, al activar tanto la cáscara externa (Shell) como el relleno lattice de tipo Walled TPMS, se obtiene el modelo final de la tija para esta segunda configuración.

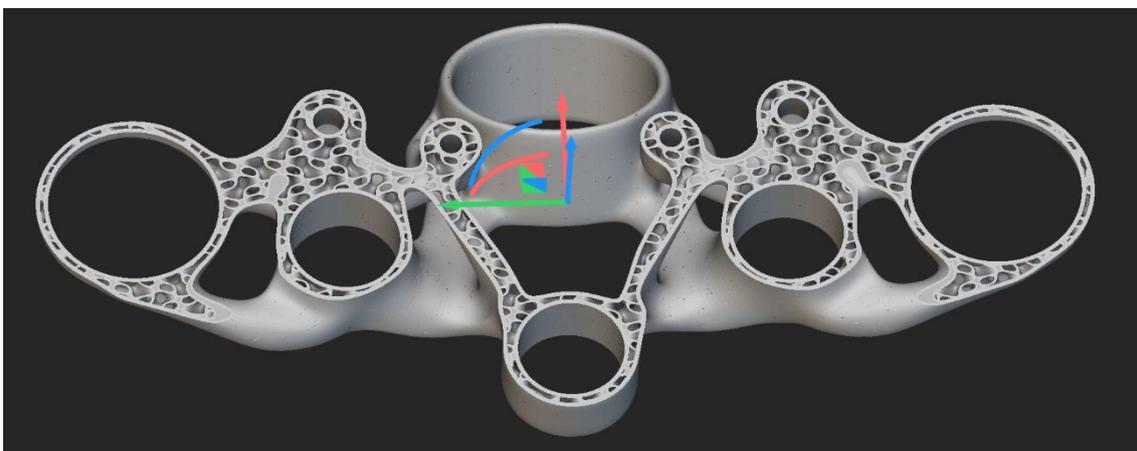


Figura 156 Tija optimizada, refinada y rellena con Lattice 5
Fuente propia

10. SIMULACION FEM ESTRUCTURAS LATTICE

En esta fase del proyecto se planteó realizar un análisis por elementos finitos (FEM) sobre las dos versiones de la tija rellenas con estructuras lattice: una con configuración Body-Centered Cubic (BCC) y otra con estructura TPMS Gyroid.

El objetivo de este análisis era evaluar el comportamiento mecánico de cada diseño bajo las cargas y restricciones establecidas a lo largo del proyecto, considerando la distribución de esfuerzos, la deformación y la estabilidad estructural. Con base en dichos resultados se esperaba determinar cuál de las dos configuraciones ofrecía una mejor combinación entre reducción de masa, resistencia y rigidez.

No obstante, tras una investigación más profunda se comprobó que la simulación FEM de piezas rellenas con estructuras lattice resulta extremadamente compleja debido a la gran cantidad de geometría a discretizar. Los softwares empleados en este proyecto no fueron capaces de procesar y resolver los modelos, ya que requieren recursos de cálculo y algoritmos más avanzados que los disponibles.

Para llevar a cabo este tipo de análisis sería necesario utilizar herramientas de simulación de alto nivel, como Siemens NX o ANSYS, junto con una estrategia de mallado y simplificación específica para este tipo de estructuras.

Por este motivo, la simulación FEM de las versiones lattice no se ha podido ejecutar dentro del marco de este proyecto, quedando como una línea abierta para futuras investigaciones que cuenten con software y recursos más avanzados.

11. ANÁLISIS DE RESULTADOS

11.1 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.

11.1.1 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.

TIJA SIN OPTIMIZAR

El prototipo del soporte sin optimizar se fabricará mediante la tecnología de deposición de material fundido (FDM), empleando PLA como material de impresión y utilizando el software CURA para la preparación y programación del proceso.

La fabricación de esta pieza inicial tiene como finalidad contar con un modelo físico de referencia que permita, a través de su comparación directa con el componente original, evaluar el grado de exactitud alcanzado en la etapa de ingeniería inversa.

De esta manera, podremos verificar tanto la calidad geométrica como la dimensional del modelo obtenido, identificando posibles desviaciones y aspectos de mejora en futuras iteraciones.

En la figura inferior podemos observar como se reliazrar la impresión de la pieza, que parte es el soporte(azul) y que parte es la pieza(rojos y amarillos).

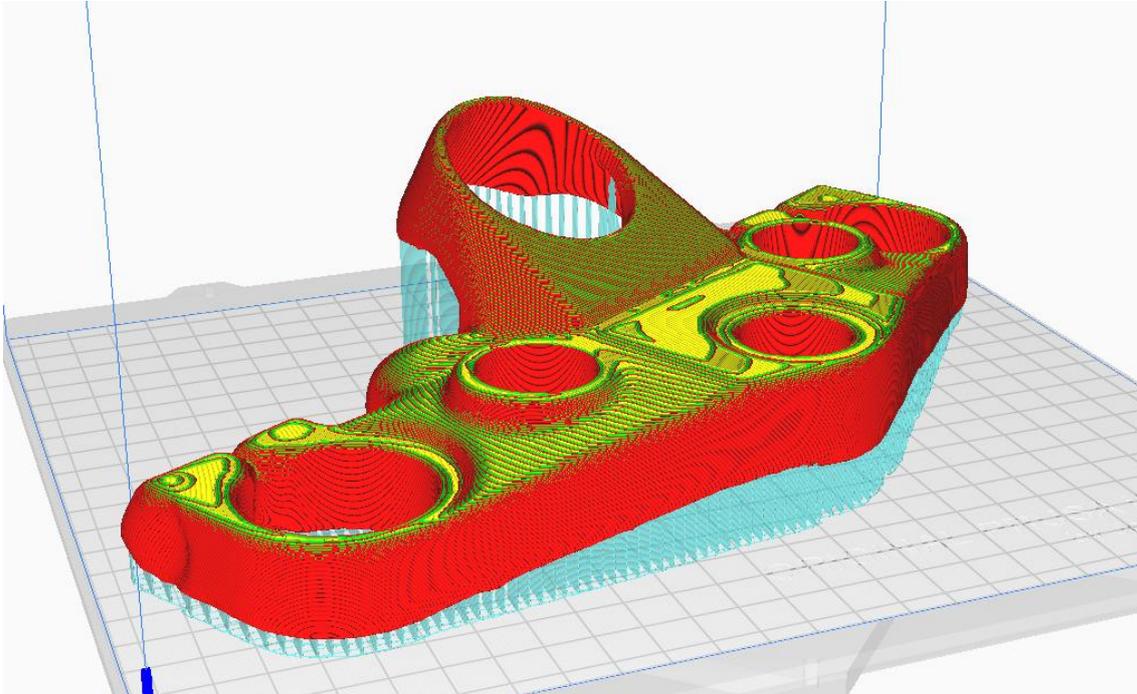
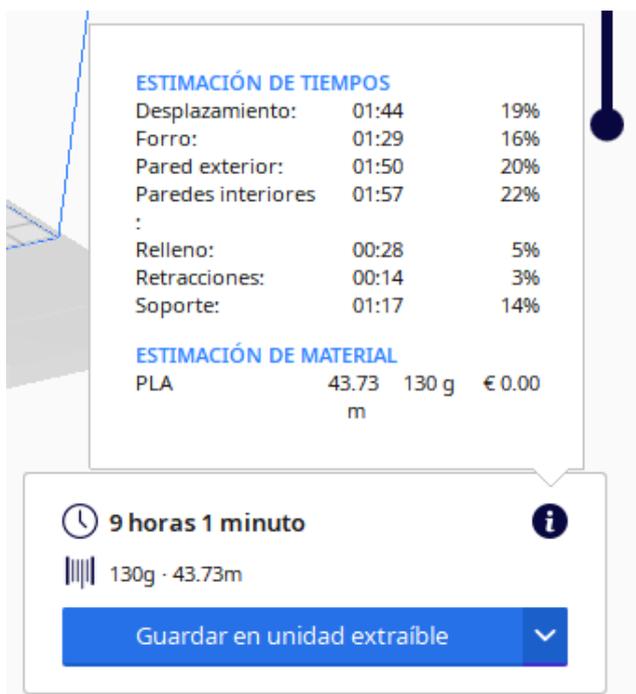


Figura 157 Detalle de la simulación de impresión de la tija sin optimizar en CURA

Fuente propia



ESTIMACIÓN DE TIEMPOS

Desplazamiento:	01:44	19%
Forro:	01:29	16%
Pared exterior:	01:50	20%
Paredes interiores	01:57	22%
:		
Relleno:	00:28	5%
Retracciones:	00:14	3%
Soporte:	01:17	14%

ESTIMACIÓN DE MATERIAL

PLA	43.73	130 g	€ 0.00
		m	

🕒 9 horas 1 minuto ⓘ

📊 130g · 43.73m

Guardar en unidad extraíble ▾

Figura 158 Detalle de la estimación de tiempos de la impresión de la tija sin optimizar en CURA

Fuente propia

En la siguiente tabla se muestra el análisis de costes de fabricar el soporte sin optimizar mediante impresión FDM en PLA, considerando el consumo de material y el tiempo de máquina.



ANÁLISIS DE COSTES PARA PROTOTIPADO DE PIEZAS EN IMPRESORA 3D -FDM	
DATOS AMORTIZACIÓN MÁQUINA	
Precio máquina (€)	1,325
Coste mantenimiento anual (€)	133
Años de amortización	2
Amortización (h/año) - 223 días-año / 8 horas-día	1784
Precio Hora máquina-amortización (€/h)	0.48
Precio Hora venta-público (€/h)	0.72
DATOS COSTE MATERIAL	
Coste material modelo: filamento PLA (€/cc) (18,20€-750 cc)	0.02
Coste material soporte: filamento PLA (€/cc) (20€-750 cc)	0.00
Coste material bandeja (€/Ud.): (20€-100 uds.)	0.20
DATOS COSTE TÉCNICO ANALISTA	
Coste técnico analista del modelo - inc. desmoldeo (€/h)	30

PIEZA TIJA SIN OPTIMIZAR		
CONCEPTOS PRESUPUESTADOS	Opción Solido	Costes parciales
Material modelo (cc)	130.00	3.15 €/ud
Soporte modelo (cc)	0.00	0.00 €/ud
Tiempo modelo (h)	9.00	6.52 €/ud
Piezas por bandeja (ud)	1.00	0.20 €/ud
Tiempo técnico-analista (h)	0.50	15.00 €
Cantidad de piezas	1.00	
Coste unitario (€) en ICAI + IVA	24.87 €/Ud	
Coste total (€) en ICAI + IVA	24.87 €	

Tabla 3 Análisis de costes prototipado tija sin optimizar FDM.

Fuente propia

Para poder realizar una comparativa con los prototipos fabricados mediante MJF en polvo, se han recopilado datos equivalentes de coste y tiempo de producción de cada versión optimizada, refinada y con relleno lattice, permitiendo evaluar de manera directa la eficiencia y viabilidad de ambas tecnologías.

TIJA SIN OPTIMIZAR

El prototipo del soporte sin optimizar se fabricará mediante la tecnología de impresión 3D por fusión en lecho de polvo (MJF), utilizando poliamida como material base y el software HP SmartStream 3d Build Manager como programa de configuración de impresión.

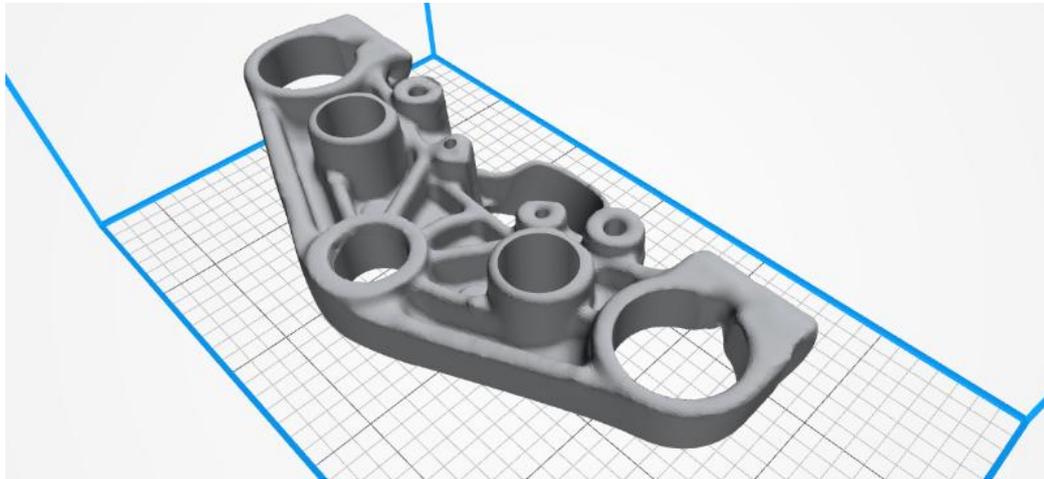


Figura 159 Detalle de la simulación de impresión de la tija sin optimizar en HP SmartStream 3d Build Manager

Fuente propia

En las figuras siguientes se observa el volumen total de la pieza, así como las características asociadas a su impresión. El volumen calculado es de 246564 mm³, equivalente a 246.564 cm³.

TIJA_SIN_OPTIMIZAR	
	246.23 x 125.99 x 70.43 mm 246564 mm ³

Figura 160 Detalle del volumen de la tija sin optimizar sólida.



Figura 161 Características y tiempo de impresión de la tija sin optimizar.

Fuente propia



ANÁLISIS DE COSTES PARA PROTOTIPADO DE PIEZAS EN IMPRESORA 3D -HP 580		
DATOS AMORTIZACIÓN MÁQUINA		
Precio máquina (€)		80,000
Coste mantenimiento anual (€)		2,000
Años de amortización		5
Días impresión/año		249
Impresiones/día		0.5
Precio impresión (€)		147.53
Precio Impresión venta-público (€)		147.53
DATOS COSTE MATERIAL		
Coste material: (€/kg)		141.00
Coste material: (€/cc)		0.15
Volumen Total (cc)		1560.00
Densidad de Empaquetado		10.00%
DATOS COSTE TÉCNICO ANALISTA		
Coste técnico analista del modelo - inc. limpieza (€/h)		20
PIEZA TIJA OPTIMIZADA SIN REFINAR SOLIDA		
CONCEPTOS PRESUPUESTADOS	Opción Solido	Costes parciales
Material modelo (cc)	246.56	36.60 €/ud
Impresión	6.63	233.18 €/ud
Tiempo técnico-analista (h)	0.50	10.00 €/ud
Tiempo Limpieza (h)	0.50	10.00 €/ud
Cantidad de piezas	1.00	
Coste unitario (€) en ICAI + IVA	289.77 €/Ud	
Coste total (€) en ICAI + IVA	289.77 €	

Tabla 4 Análisis de costes prototipado tija sin optimizar MJF.

Fuente propia

TIJA OPTIMIZADA Y SIN REFINAR SOLIDA

El prototipo del soporte optimizado y aún sin refinar se fabricará mediante la tecnología de impresión 3D por fusión en lecho de polvo (MJF), utilizando poliamida como material base y el software HP SmartStream 3d Build Manager como programa de configuración de impresión.

La elección de este método responde a la necesidad de prescindir de estructuras de soporte adicionales, ya que, tras la optimización topológica, la geometría de la pieza presenta una mayor complejidad que dificultaría su fabricación mediante FDM.

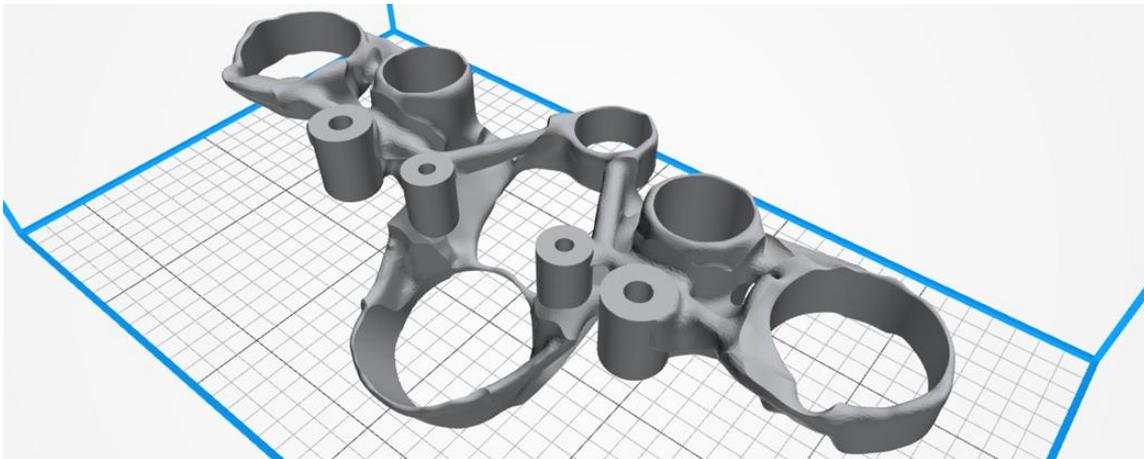


Figura 162 Detalle de la simulación de impresión de la tija optimizada sin refinar en HP SmartStream 3d Build Manager

Fuente propia

En las figuras siguientes se observa el volumen total de la pieza, así como las características asociadas a su impresión. El volumen calculado es de 99538 mm³, equivalente a 99.538 cm³. Este valor será empleado posteriormente en la tabla de costes como referencia para el cálculo del material requerido.

TIJA_OPTIMIZADA_SIN REFINAR_SOLIDA	
	239.13 x 117.02 x 66.42 mm 99538 mm ³

Figura 163 Detalle del volumen de la tija optimizada refinada sólida.

Fuente propia

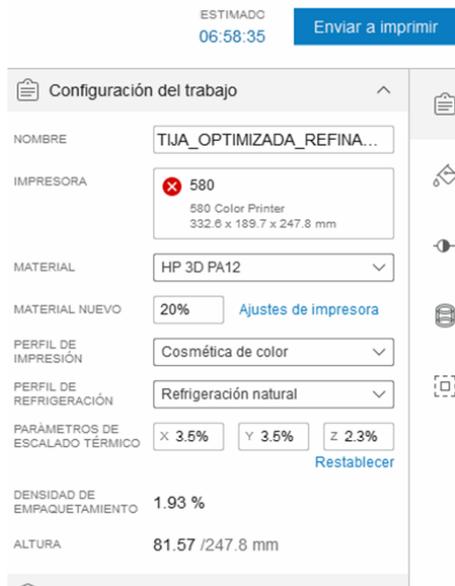


Figura 164 Características y tiempo de impresión de la tija optimizada refinada solida

Fuente propia



ANÁLISIS DE COSTES PARA PROTOTIPADO DE PIEZAS EN IMPRESORA 3D -HP 580		
DATOS AMORTIZACIÓN MÁQUINA		
Precio máquina (€)		80,000
Coste mantenimiento anual (€)		2,000
Años de amortización		5
Días impresión/año		249
Impresiones/día		0.5
Precio impresión (€)		147.53
Precio Impresión venta-público (€)		147.53
DATOS COSTE MATERIAL		
Coste material: (€/kg)		141.00
Coste material: (€/cc)		0.15
Volumen Total (cc)		1560.00
Densidad de Empaquetado		10.00%
DATOS COSTE TÉCNICO ANALISTA		
Coste técnico analista del modelo - inc. limpieza (€/h)		20
PIEZA TIJA OPTIMIZADA SIN REFINAR SOLIDA		
CONCEPTOS PRESUPUESTADOS	Opción Solido	Costes parciales
Material modelo (cc)	99.54	14.77 €/ud
Impresión	7.00	94.13 €/ud
Tiempo técnico-analista (h)	0.50	10.00 €/ud
Tiempo Limpieza (h)	0.50	10.00 €/ud
Cantidad de piezas	1.00	
Coste unitario (€) en ICAI + IVA	128.91 €/Ud	
Coste total (€) en ICAI + IVA	128.91 €	

Tabla 5 Análisis de costes prototipado tija optimizada sin refinar solida

Fuente propia

TIJA OPTIMIZADA Y REFINADA SOLIDA

El soporte optimizado y refinado se fabricará igualmente mediante la tecnología de fusión en lecho de polvo (MJF), utilizando poliamida como material

La elección de este método responde a la necesidad de prescindir de estructuras de soporte adicionales, ya que, tras la optimización topológica, la geometría de la pieza presenta una mayor complejidad que dificultaría su fabricación mediante FDM.

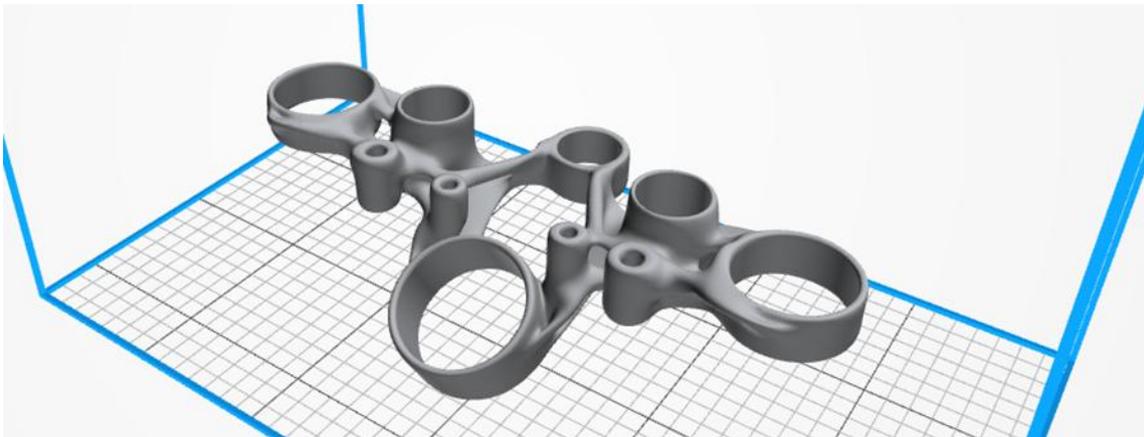


Figura 165 Detalle de la simulación de impresión de la tija optimizada y refinada en HP SmartStream 3d Build Manager

Fuente propia

En las figuras siguientes se observa el volumen total de la pieza, así como las características asociadas a su impresión. El volumen calculado es de 106 279 mm³, equivalente a 106,279 cm³. Este valor será empleado posteriormente en la tabla de costes como referencia para el cálculo del material requerido.

TIJA_OPTIMIZADA_REFINADA_SOLIDA	
	238.77 x 119.65 x 70.42 mm 106279 mm ³

Figura 166 Detalle del volumen de la tija optimizada refinada sólida.

Fuente propia

ESTIMADO 06:44:05 [Enviar a imprimir](#)

Configuración del trabajo

NOMBRE: TIJA_OPTIMIZADA_REFINA...

IMPRESORA: 580 (580 Color Printer, 332.6 x 189.7 x 247.8 mm)

MATERIAL: HP 3D PA12

MATERIAL NUEVO: 20% [Ajustes de impresora](#)

PERFIL DE IMPRESIÓN: Cosmética de color

PERFIL DE REFRIGERACIÓN: Refrigeración natural

PARÁMETROS DE ESCALADO TÉRMICO: X 3.5% Y 3.5% Z 2.3% [Restablecer](#)

DENSIDAD DE EMPAQUETAMIENTO: 2.29 %

ALTURA: 73.66 /247.8 mm

Figura 167 Características y tiempo de impresión de la tija optimizada refinada solida

Fuente propia



ANÁLISIS DE COSTES PARA PROTOTIPADO DE PIEZAS EN IMPRESORA 3D -HP 580	
DATOS AMORTIZACIÓN MÁQUINA	
Precio máquina (€)	80,000
Coste mantenimiento anual (€)	2,000
Años de amortización	5
Días impresión/año	249
Impresiones/día	0.5
Precio impresión (€)	147.53
Precio Impresión venta-público (€)	147.53
DATOS COSTE MATERIAL	
Coste material: (€/kg)	141.00
Coste material: (€/cc)	0.15
Volumen Total (cc)	1560.00
Densidad de Empaquetado	10.00%
DATOS COSTE TÉCNICO ANALISTA	
Coste técnico analista del modelo - inc. limpieza (€/h)	20

PIEZA TIJA OPTIMIZADA REFINADA SOLIDA		
CONCEPTOS PRESUPUESTADOS	Opción Solido	Costes parciales
Material modelo (cc)	106.28	15.77 €/ud
Impresión	6.75	100.51 €/ud
Tiempo técnico-analista (h)	0.50	10.00 €/ud
Tiempo Limpieza (h)	0.50	10.00 €/ud
Cantidad de piezas	1.00	
Coste unitario (€) en ICAI + IVA	136.28 €/Ud	
Coste total (€) en ICAI + IVA	136.28 €	

Tabla 6 Análisis de costes prototipado tija optimizada y refinada solida

Fuente propia

TIJA OPTIMIZADA, REFINADA Y RELLENO LATTICE

Este prototipo se fabricará mediante la tecnología de fusión en lecho de polvo (MJF) utilizando poliamida como material, al igual que en los casos anteriores. La principal característica de esta versión es la incorporación de un relleno interno tipo lattice, diseñado para disminuir el peso de la pieza manteniendo sus propiedades mecánicas. Para poder observar con claridad esta estructura interna, la pieza se imprimirá aplicando un plano de corte que la divida, de modo que el entramado quede expuesto de forma visual y accesible. No obstante, los datos de material, coste y tiempos de fabricación considerados en el análisis corresponden a la pieza completa, con el objetivo de obtener resultados más realistas y comparables con los demás prototipos desarrollados en el proyecto.

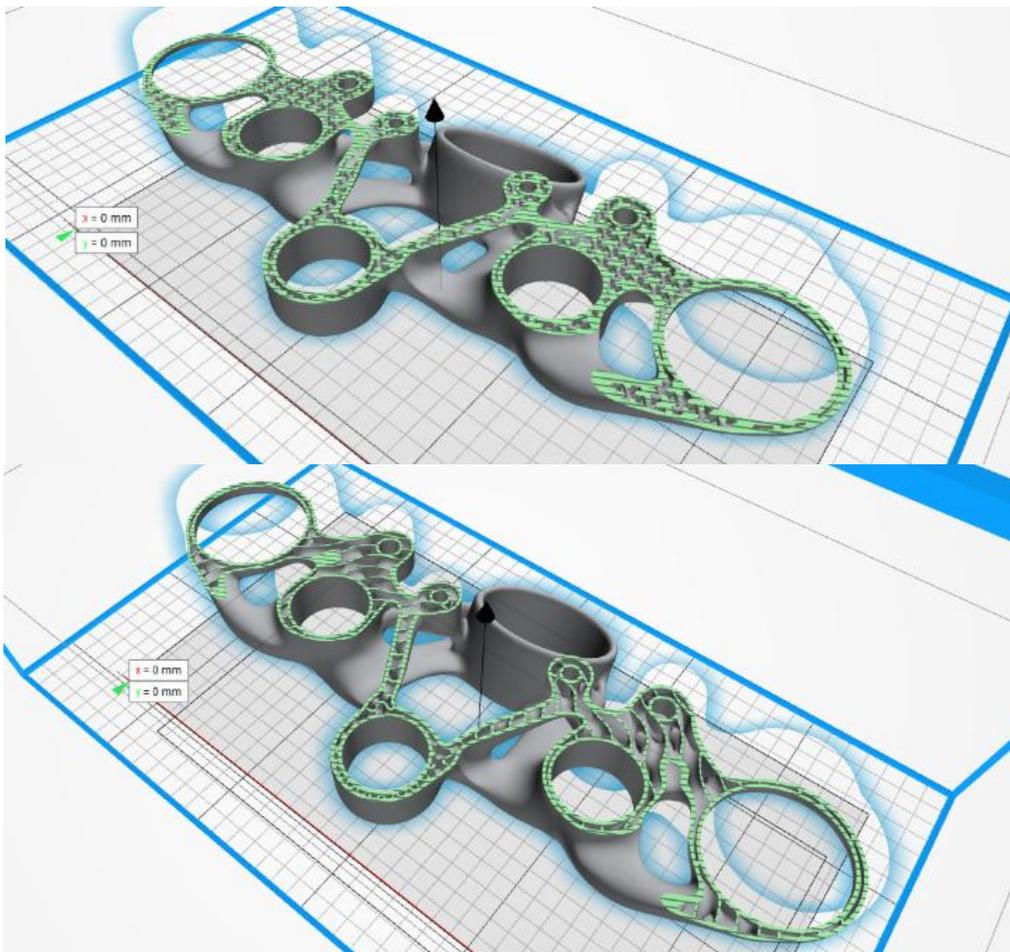


Figura 168 Detalle de la simulación de impresión de la tija optimizada refinada y rellenas de lattice 1 y 2 en HP SmartStream 3d Build Manager

Fuente propia

En las figuras siguientes se observa el volumen total de ambas piezas, así como las características asociadas a su impresión. El volumen calculado de la tija rellena de lattice1 es 70.091 cm³ y de la lattice2 de es de 58.573 mm³.

Fuente propia

Quantity	File name	Size	Triangles	Quality
1x	TIJA_LATT1	119.657mm x 238.769mm x 70.403mm Volume: 70.091cm ³	5813246 triangles 987 shells	✓
1x	TIJA_LATT2	119.637mm x 238.764mm x 70.403mm Volume: 58.573cm ³	5513710 triangles 582 shells	✓

Figura 169 Detalle de los volúmenes de las tijas optimizadas refinadas latitce 1 y 2.

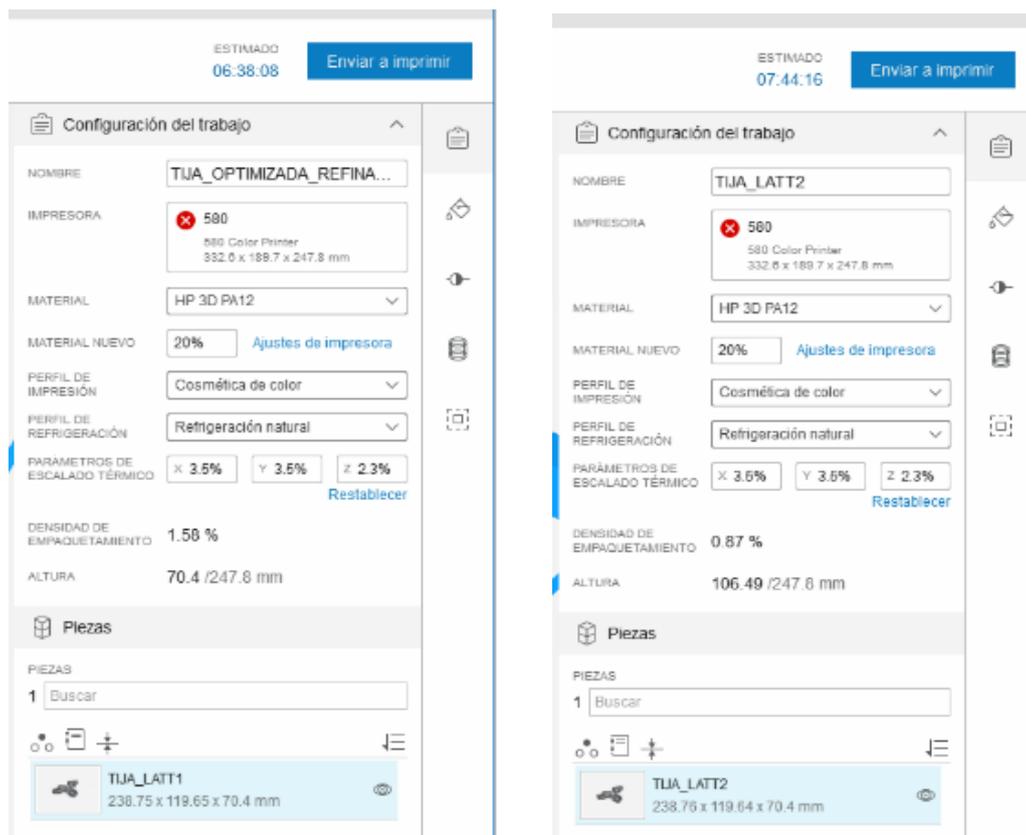


Figura 170 Características y tiempo de impresión de las tijas optimizadas refinadas latitce 1 y 2

Fuente propia

ANÁLISIS DE COSTES PARA PROTOTIPADO DE PIEZAS EN IMPRESORA 3D - HP 580	
DATOS AMORTIZACIÓN MÁQUINA	
Precio máquina (€)	80,000
Coste mantenimiento anual (€)	2,000
Años de amortización	5
Días impresión/año	249
Impresiones/día	0.5
Precio impresión (€)	147.53
Precio Impresión venta-público (€)	147.53
DATOS COSTE MATERIAL	
Coste material: (€/kg)	141.00
Coste material: (€/cc)	0.15
Volumen Total (cc)	1560.00
Densidad de Empaquetado	10.00%
DATOS COSTE TÉCNICO ANALISTA	
Coste técnico analista del modelo - inc. limpieza (€/h)	20

PIEZA TIJA OPTIMIZADA REFINADA LATTICE 1		
CONCEPTOS PRESUPUESTADOS	Opción Solido	Costes parciales
Material modelo (cc)	70.09	10.40 €/ud
Impresión	6.66	66.28 €/ud
Tiempo técnico-analista (h)	0.50	10.00 €/ud
Tiempo Limpieza (h)	0.50	10.00 €/ud
Cantidad de piezas	1.00	
Coste unitario (€) en ICAI + IVA	96.69 €/Ud	
Coste total (€) en ICAI + IVA	96.69 €	

PIEZA TIJA OPTIMIZADA REFINADA LATTICE 2		
CONCEPTOS PRESUPUESTADOS	Opción Solido	Costes parciales
Material modelo (cc)	58.57	8.69 €/ud
Impresión	7.75	55.39 €/ud
Tiempo técnico-analista (h)	0.50	10.00 €/ud
Tiempo Limpieza (h)	0.50	10.00 €/ud
Cantidad de piezas	1.00	
Coste unitario (€) en ICAI + IVA	84.08 €/Ud	
Coste total (€) en ICAI + IVA	84.08 €	

Tabla 7 Análisis de costes prototipado de las tijas optimizadas refinadas latitce 1 y 2

Fuente propia

11.1.2 COSTE DE IMPRESIÓN EN ACERO

En el apartado anterior se analizaron los costes de las piezas que fueron llevadas a impresión. No obstante, en este apartado se calculará únicamente el presupuesto estimado para la fabricación de la pieza final del proyecto, que corresponde a una tija de aluminio 5456 H111.

La estimación del coste se realizará utilizando la tabla de costes mostrada, teniendo en cuenta la amortización de la máquina, el coste del material, y el tiempo de análisis y limpieza por parte del técnico.

El proceso utilizado será Sinterizado Directo de Metal por Láser (DMLS), que consiste en fundir selectivamente capas de polvo metálico mediante un láser de alta potencia, creando la pieza capa por capa con gran precisión y detalle.

El precio del polvo de aluminio para impresión 3D DMLS, especialmente la aleación AlSi10Mg, puede variar según el proveedor y la cantidad, pero para esta estimación se considera un valor aproximado de 95 € por kilogramo, siguiendo los datos de la tabla de costes mostrada.

ANALISIS DE COSTES PARA PROTOTIPADO DE PIEZAS EN IMPRESORA 3D 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)	95.00	
Coste material: (€/cc)	0.25	
Volumen Total (cc)	15634.75	
Densidad de Empaquetado	7.00%	
DATOS COSTE TÉCNICO ANALISTA		
Coste técnico analista del modelo - inc. limpieza (€/h)	40	

Tabla 8 Datos cálculo de costes Impresora 3D DLMS.

Fuente propia

PIEZA TIJA SIN OPTIMIZAR SOLIDA		
CONCEPTOS PRESUPUESTADOS	Opción Solido	Costes parciales
Material modelo (cc)	246.56	62.13 €/ud
Impresión (horas)	1.97	123.28 €/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	313.41 €/Ud	
Coste total (€) en ICAI + IVA	313.41 €	

PIEZA TIJA OPTIMIZADA REFINADA SOLIDA		
CONCEPTOS PRESUPUESTADOS	Opción Solido	Costes parciales
Material modelo (cc)	106.28	26.78 €/ud
Impresión (horas)	0.85	53.14 €/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	207.92 €/Ud	
Coste total (€) en ICAI + IVA	207.92 €	

PIEZA TIJA OPTIMIZADA LATTICE 1		
CONCEPTOS PRESUPUESTADOS	Opción Solido	Costes parciales
Material modelo (cc)	70.09	17.66 €/ud
Impresión (horas)	0.56	35.05 €/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	180.71 €/Ud	
Coste total (€) en ICAI + IVA	180.71 €	

PIEZA TIJA OPTIMIZADA LATTICE 2		
CONCEPTOS PRESUPUESTADOS	Opción Solido	Costes parciales
Material modelo (cc)	58.57	14.76 €/ud
Impresión (horas)	0.47	29.29 €/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	172.04 €/Ud	
Coste total (€) en ICAI + IVA	172.04 €	

Tabla 9 Calculo de costes de todas las tijas para impresión de prototipos en metal.

Fuente propia

11.2 ANÁLISIS Y COMPARATIVA

Los resultados obtenidos antes y después de las distintas optimizaciones se compararon con el objetivo de evaluar el rendimiento y la eficiencia de las estrategias de rediseño aplicadas. En este caso se analizaron tres configuraciones:

- Pieza sin optimizar (sólida original).
- Pieza optimizada topológicamente sin refinar (sólida).
- Pieza optimizada topológicamente refinada (sólida).
- Pieza optimizada topológicamente refinada y con relleno de estructura interna tipo lattice (tipo 1 y tipo 2).

En cuanto a los costes de fabricación de prototipos en poliamida, la pieza original presentaba un valor de **289,77 €**. Tras aplicar únicamente la optimización topológica y el refinamiento, el coste se redujo a **136,28 €**, lo que supone un ahorro económico considerable. Finalmente, al implementar además el relleno con estructuras lattice, el coste descendió aún más hasta los **84,08 €**, evidenciando la eficiencia de combinar la optimización topológica con estructuras internas.

Del mismo modo, el análisis volumétrico refleja una tendencia similar. La pieza inicial tenía un volumen de **246,56 cm³**. Después de la optimización topológica y el refinamiento, este volumen se redujo a **106,27 cm³**, y al añadir la estructura lattice, el volumen final fue de apenas **58,57 cm³**. Esto representa una disminución significativa respecto a la geometría original, lograda sin comprometer la rigidez ni la resistencia necesarias de la pieza.

En el caso de la fabricación en metal mediante DMLS, la pieza no optimizada tiene un coste estimado de **313.41 €**, mientras que la optimizada se reduce a **207 €**. Con la incorporación de una estructura lattice, el coste baja aún más hasta los **172.04 €**, confirmando el ahorro económico que aporta la optimización topológica combinada con geometrías internas.

12. CONCLUSIONES

Nos hemos centrado en la optimización de la topología de una pieza y en la aplicación de diferentes tecnologías de ingeniería y fabricación para mejorar su rendimiento y eficiencia a lo largo de este proyecto. La siguiente lista contiene las principales conclusiones obtenidas:

- La aplicación de la optimización topológica (OT) ha permitido reducir significativamente los costos de fabricación, con una diferencia de XX €.
- La **OT** ha permitido disminuir el peso total de la estructura sin sacrificar su resistencia y rigidez.
- La **OT** ha demostrado su capacidad para aumentar la eficiencia de la pieza, eliminando material innecesario y concentrando la masa donde es más necesario.
- La combinación de **OT con estructuras lattice** ha permitido optimizar no solo la geometría externa, sino también el interior de la pieza, logrando una mayor reducción de volumen y peso sin comprometer la resistencia.
- El uso de **ingeniería inversa** ha sido fundamental para obtener una reconstrucción digital precisa de la pieza original, permitiendo reproducir su geometría con exactitud, analizar su comportamiento y aplicar las mejoras necesarias.
- La **fabricación aditiva** ha demostrado ser una herramienta clave en este proceso, tanto para la validación de prototipos iniciales como para la producción de piezas optimizadas, mostrando claras ventajas en costes, tiempos y flexibilidad de diseño frente a procesos de fabricación tradicionales.
- La implementación de **estructuras lattice** ha permitido evaluar nuevas configuraciones que aportan un equilibrio óptimo entre ligereza y resistencia, ampliando las posibilidades de diseño más allá de lo que se puede conseguir únicamente con la OT.

Por otro lado, este proyecto también ha supuesto un gran aprendizaje a nivel personal y técnico. Entre los conocimientos adquiridos destacan:

- **Dominio de Solid Edge:** Se ha logrado un control avanzado de las herramientas y características que ofrece el programa. Entre otras habilidades, se han utilizado comandos de modelado, creado ensamblajes, dibujos técnicos y simulaciones.
- **Diseño avanzado:** Se ha aprendido a aplicar restricciones y relaciones geométricas, crear modelos 3D complejos y realizar modificaciones paramétricas de manera efectiva.
- **Simulaciones FEM y diseño generativo:** Se ha adquirido experiencia en la aplicación de cargas, definición de materiales, análisis de esfuerzos y evaluación del rendimiento de los diseños, además de realizar estudios de diseño generativo para optimizar la pieza del proyecto.
- **Fundamentos de la fabricación aditiva (FA):** Se han comprendido los distintos procesos, materiales utilizados y consideraciones de diseño, así como el funcionamiento de la maquinaria necesaria para la impresión de las piezas.

En resumen, este trabajo ha permitido comprobar cómo la combinación de optimización topológica, ingeniería inversa, fabricación aditiva y estructuras lattice representa una estrategia de diseño altamente eficiente, que no solo reduce costes y peso, sino que también abre nuevas oportunidades para el desarrollo de componentes innovadores y funcionales en la ingeniería actual.

13. BIBLIOGRAFIA

- [1] «Ingeniería Inversa. Creaform.» [En línea]. Disponible en: <https://www.creaform3d.com/blog/es/que-es-ingenieria-inversa/>
 - [2] «Estructuras Lattice en la impresion 3D. IBER 3D.» [En línea]. Disponible en: <https://www.iber3d.es/es/noticias/detalle/estructuras-lattice-en-impresion-3d#:~:text=Las%20estructuras%20lattice%20son%20b%C3%A1sicamente,%2C%20por%20ejemplo%2C%20los%20giroides.>
 - [3] «Escáneres Go20 y Go50.» [En línea]. Disponible en: <https://3dprint.com/3358/goscan-50-goscan-20-creaform/>
 - [4] M. BETANCUR RODRIGUEZ, «INGENIERÍA INVERSA APLICADA: METODOLOGÍA Y APLICACIONES INDUSTRIALES». 2011.
 - [5] «What are Creaform's VXElements, VXModel, and VXInspect?», [En línea]. Disponible en: https://www.cati.com/blog/creaforms-vxelements-vxmodel-vxinspect/?utm_source=chatgpt.com
 - [6] «BloqueTech. Diseño Generativo.» [En línea]. Disponible en: <https://www.bloquetech.com/el-diseno-generativo/>
 - [7] L. L. Otero Pereiro, *Aprendiendo sobre el Método de los Elementos Finitos*. [En línea]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=225117945001>
 - [8] K. Salonitis, «Advances in Additive Manufacturing and Tooling», [En línea]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/stereolithography-process>
 - [9] T. Briard, F. Segonds, y N. Zamariola, «G-DfAM: a methodological proposal of generative design for additive manufacturing in the automotive industry», *Int J Interact Des Manuf*, vol. 14, n.º 3, pp. 875-886, sep. 2020, doi: 10.1007/s12008-020-00669-6.
 - [10] L. Fito Blazquez, «ESTUDIO, DISEÑO Y FABRICACIÓN DE ELEMENTOS PRIMARIOS DE UNA MOTOCICLETA». Universidad Carlos III de Madrid Escuela Politécnica Superior, Abril de 2014. [En línea]. Disponible en: <https://e-archivo.uc3m.es/rest/api/core/bitstreams/88dbfdee-1574-433f-b46a-80c64289059b/content>
 - [11] «Yamaha FZR 600», [En línea]. Disponible en: https://www.motorcyclespecs.co.za/model/yamaha/yamaha_fzr600%2092.htm
-