COMILLAS
UNIVERSIDAD PONTIFICIA
ICAI

MÁSTER EN MOTORSPORT, MOVILIDAD Y SEGURIDAD

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA I.C.A.I.

TRABAJO FIN DE MÁSTER

DISEÑO DE UNA PIEZA IDUSTRIAL A PARTIR DE INGENIERÍA INVERSA Y MEDIANTE LA COMBINACIÓN DE OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA, DISEÑO GENERATIVO Y ESTRUCTURAS LATTICE.

Autor: Marco Arias Lezcano

Director: Mariano Jiménez Calzado y Xavier Soldani

Madrid
2024

índice

Análisis de costes 11
Conclusiones 12
Desarrollo 6
Estado del arte 4
Introducción 3
Relación con M2S 12

Tabla de contenido

Figura 1 Objetivos de desarrollo sostenible 4

Figura 2 Férula de muñeca optimizada topológicamente 6

Figura 3 Escaner Go! Scan 30 7

Figura 4 Resultados del escaneado 7

Figura 5 Escaneado importado a entorno CAD 8

Figura 6 Estado de cargas de pieza original 10

Figura 7 Estado de cargas de pieza actual 10

Figura 8 Suavizado de pieza mediante PolyNURBS 11

Introducción

El sector de la automoción, y en particular el de las motocicletas, se encuentra en un proceso continuo de innovación con el fin de optimizar el rendimiento, la seguridad y la eficiencia de sus componentes. El basculante constituye una pieza clave en este contexto, al unir el tren trasero con el chasis y garantizar la estabilidad y el comportamiento dinámico del vehículo. Tradicionalmente se ha fabricado con métodos convencionales centrados en la rigidez y la durabilidad, pero las crecientes exigencias de emisiones y por tanto aligeramiento, han impulsado la aplicación de tecnologías avanzadas como la optimización topológica, el diseño generativo y las estructuras lattice.

El proyecto plantea como objetivos digitalizar un basculante existente, optimizar su mallado y emplear técnicas de optimización topológica para reducir su peso manteniendo resistencia y rigidez. Asimismo, se exploran geometrías mediante diseño generativo, se incorporan estructuras lattice para mejorar la relación peso-resistencia y se valida el diseño final con simulaciones de elementos finitos y prototipado mediante impresión 3D.

El alcance se centra en el diseño y análisis estructural mediante herramientas CAD y FEA (SolidWorks y VX), aplicando procesos de optimización y exploración de estructuras complejas como Voronoi, Gyroid o Octet. Se contempla la validación del diseño con técnicas de fabricación aditiva disponibles en la Universidad Pontificia Comillas (FDM, SLA, SLS o filamentos reforzados con fibra), teniendo en cuenta las limitaciones de tamaño, materiales y postprocesado que estas tecnologías implican. Si bien los prototipos permiten demostrar la viabilidad de la solución a escala, la fabricación en tamaño real podría requerir tecnologías adicionales.

Figura 9 Objetivos de desarrollo sostenible

Además de su componente técnico, el proyecto se alinea con los **Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)**. En concreto, contribuye al ODS 9 fomentando la innovación industrial y el uso de nuevas metodologías de diseño; al ODS 12, promoviendo un consumo responsable mediante la reducción de material; al ODS 13, al disminuir el impacto ambiental y energético de los componentes optimizados; y al ODS 8, al impulsar la especialización tecnológica y la creación de empleo en sectores de alto valor añadido.

El TFM se alinea con el Máster en Motorsport, Movilidad y Seguridad (M2S) al aplicar conocimientos de dinámica de vehículos, simulación estructural y materiales avanzados al rediseño de un basculante de motocicleta. La integración de optimización topológica, diseño generativo y estructuras lattice refleja la orientación del máster hacia la innovación en competición, la movilidad sostenible y la seguridad en automoción.

Estado del arte

El estado del arte en el ámbito de la ingeniería de diseño se apoya en tres ejes fundamentales: la ingeniería inversa, la impresión 3D y el diseño generativo con estructuras lattice. La ingeniería inversa se ha consolidado como una herramienta clave en numerosos sectores al permitir la digitalización precisa de objetos físicos mediante tecnologías como el escaneado

3D y la metrología avanzada. Esta práctica facilita la creación de modelos CAD fiables, lo que resulta esencial cuando no existe documentación técnica o se requieren mejoras sobre componentes ya existentes. Gracias a la digitalización, es posible acelerar procesos de rediseño, optimización, calidad y validación de productos, aumentando la exactitud y reduciendo los tiempos de desarrollo.

Por su parte, la fabricación aditiva o impresión 3D ha transformado la producción al posibilitar la construcción de piezas capa por capa a partir de modelos digitales. Frente a los métodos tradicionales, ofrece ventajas significativas como la creación de geometrías complejas, la reducción de material desperdiciado y la personalización masiva. Actualmente se dispone de diversas tecnologías de impresión adaptadas a polímeros, metales y cerámicas, lo que amplía sus aplicaciones desde la prototipación rápida hasta la fabricación de componentes funcionales en sectores de alta exigencia. Pese a estas ventajas, la impresión 3D aún se enfrenta a limitaciones como la velocidad de producción, la necesidad de postprocesos y los elevados costes en materiales avanzados.

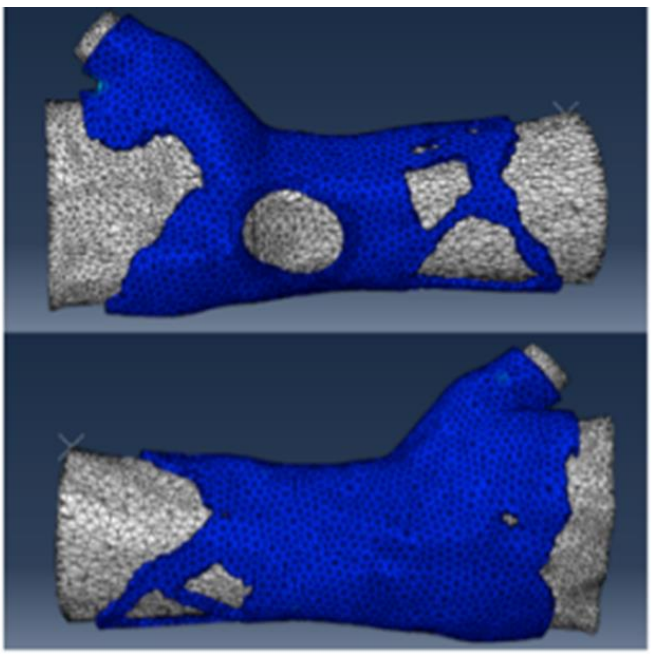


Figura 10 Férula de muñeca optimizada topológicamente

En este contexto, el diseño generativo surge como un enfoque nuevo basado en algoritmos y optimización topológica, que permite explorar múltiples alternativas geométricas en función de restricciones de carga, rigidez o peso. A diferencia de los métodos convencionales, no se limita a la intuición del diseñador, sino que aprovecha la capacidad computacional para iterar hasta generar soluciones eficientes en cuanto a uso de material y rendimiento mecánico. Esta metodología cobra especial relevancia en combinación con la fabricación aditiva, pues habilita la producción de formas no realizables con técnicas tradicionales. Entre las variantes más destacadas se encuentran las estructuras lattice, configuraciones periódicas tridimensionales que mejoran la relación resistencia-peso, optimizan la disipación térmica y permiten un uso más eficiente de los recursos. El interés actual se centra en su integración con métodos de simulación y optimización para obtener componentes más ligeros, sostenibles y de mayor rendimiento.

Desarrollo

El desarrollo del basculante optimizado comenzó con la ingeniería inversa de la pieza original mediante el escáner 3D GO! SCAN 50, seleccionado por su capacidad para trabajar con componentes de gran tamaño. El proceso de escaneo permitió obtener nubes de puntos desde distintos ángulos, generando un modelo detallado de la geometría.

Figura 11 Escaner Go! Scan 30

Posteriormente, los datos fueron tratados en el software VXmodel, donde se realizó una limpieza de las mallas para eliminar ruido y puntos aislados que no aportaban información relevante. Una vez depurados, se alinearon cuidadosamente los diferentes escaneos para garantizar su coherencia espacial, utilizando la herramienta Best Fit y verificando la continuidad de las zonas de contacto.

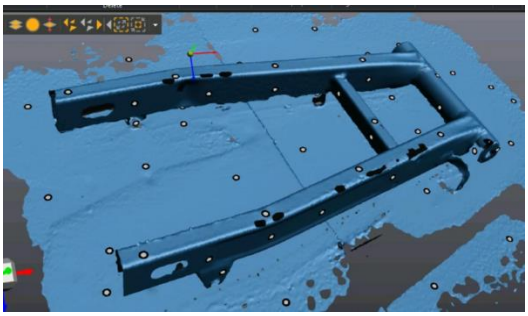


Figura 12 Resultados del escaneado

Con las mallas alineadas, se procedió a fusionarlas en un único modelo tridimensional, lo que permitió integrar toda la información recogida y obtener una representación completa y precisa del basculante. En esta fase también se aplicaron correcciones automáticas y manuales para

cerrar posibles huecos y resolver discontinuidades, asegurando una superficie uniforme y lista para las siguientes etapas de optimización.

Tras finalizar el procesado geométrico en VXelements y obtener un modelo digital limpio y consistente del basculante, se procedió a su importación en Solid Edge con el fin de llevar a cabo el análisis por elementos finitos (FEM).

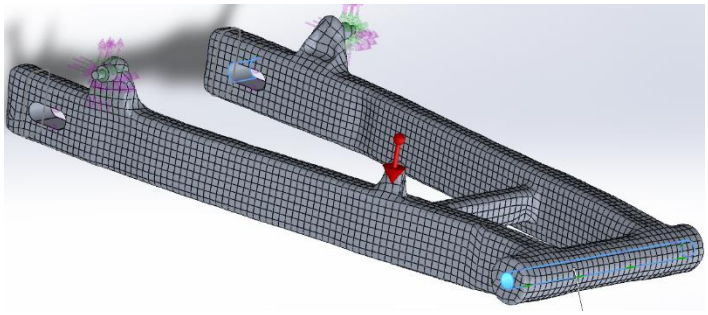


Figura 13 Escaneado importado a entorno CAD

El basculante, al ser un elemento estructural esencial fue simulado en diferentes escenarios de carga, siendo los principales la aceleración y el paso por curva. En el estado de aceleración se consideró tanto la carga estática como la fuerza longitudinal derivada de la transmisión del par motor mediante la cadena. En el caso de la curva, se introdujo la transferencia de carga lateral debida a la inclinación, estimando un reparto del 70 % en el lado interior y un 30 % en el exterior, con un ángulo de 40°. Para reproducir con fidelidad el comportamiento real, fue necesario definir adecuadamente las condiciones de contorno. Una vez definidos los materiales, cargas y restricciones, se generó la malla.

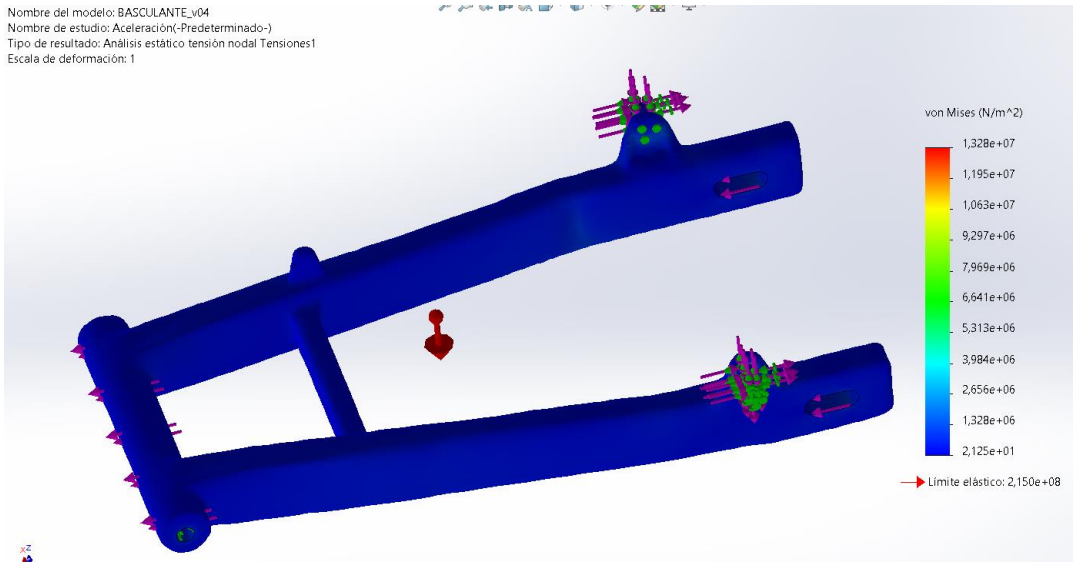


Figura 14 Estado de cargas de pieza original

El análisis de tensiones de Von Mises bajo el estado de aceleración mostró valores muy por debajo del límite elástico ($2{,}15 \cdot 10^8$ N/m²), lo que sugiere que el diseño está sobredimensionado y presenta un alto coeficiente de seguridad. Las zonas más solicitadas se concentraron en los puntos de unión con la suspensión trasera. En cuanto a los desplazamientos, se obtuvo un máximo de 7,5 mm, localizado principalmente en los extremos.

En el escenario de curva, los resultados confirmaron un comportamiento mucho menos exigente. Las tensiones alcanzaron un máximo de $5{,}85 \cdot 10^5$ N/m² frente al límite elástico del material ($2{,}75 \cdot 10^8$ N/m²), lo que representa un amplio margen de seguridad. El desplazamiento máximo fue del orden de $6{,}48 \cdot 10^{-4}$ mm, prácticamente despreciable en comparación con la aceleración. Esto permite concluir que la aceleración constituye el estado de carga más crítico y, por tanto, el que debe tomarse como referencia para la optimización topológica.

Estos resultados constituyen la base para iniciar iteraciones de diseño mediante métodos de optimización. A partir del modelo FEM se busca reducir masa en aquellas regiones de baja solicitación, garantizando que las zonas críticas conserven la rigidez y resistencia necesarias. Este proceso iterativo tiene en cuenta las propiedades del material, las restricciones impuestas y las cargas definidas, verificando en cada ciclo que las tensiones no superan el límite elástico

y que los desplazamientos se mantienen dentro de márgenes admisibles. De este modo, se orienta el diseño hacia un basculante más ligero y eficiente, sin comprometer la seguridad ni la estabilidad de la motocicleta.

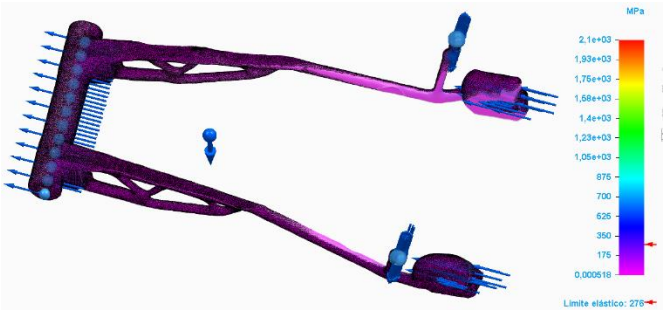


Figura 15 Estado de cargas de pieza actual

El empleo de PolyNURBS es imprescindible para convertir la geometría orgánica obtenida en la optimización topológica en un modelo CAD utilizable. De este modo, se consigue un modelo más cercano a un componente real, listo para ser ajustado y refinado en función de las necesidades técnicas y de fabricación. Finalmente, el modelo refinado se valida de nuevo mediante simulaciones FEM bajo las mismas condiciones de carga y contorno empleadas en los análisis previos.

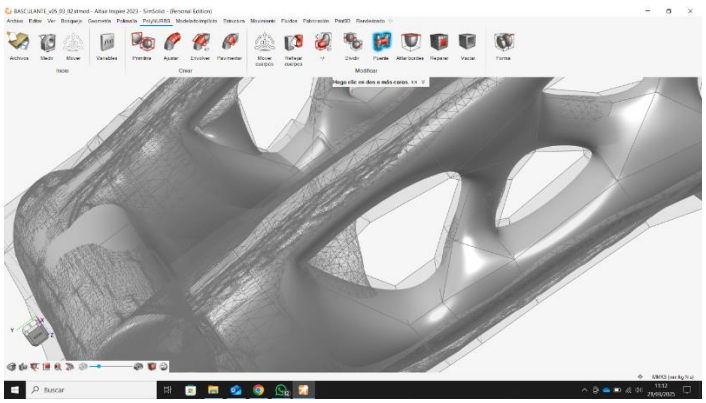


Figura 16 Suavizado de pieza mediante PolyNURBS

Para la fase de relleno interno del basculante se empleó el software Ntopology (nTop), especializado en la generación de estructuras lattice.

El flujo de trabajo comienza con la importación del modelo CAD optimizado y su conversión a un cuerpo implícito. Posteriormente, se aplica un bloque Shell que define una carcasa externa con un espesor concreto, vaciando el interior de la pieza y preparando el volumen para el relleno. A partir de ahí, se genera la red interna, se integran el contorno externo y el entramado.

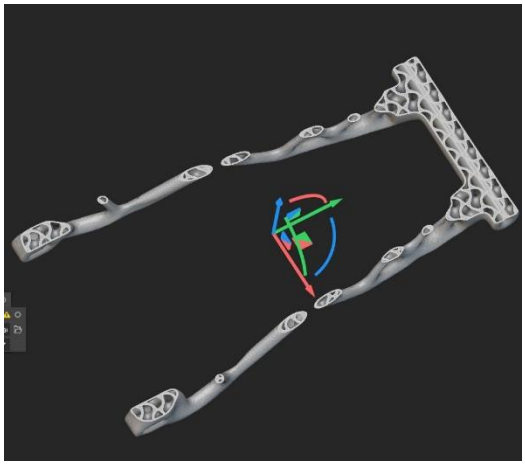


Figura 17 Pieza optimizada topológicamente y rellenada con lattice

Análisis de costes

En la fase final del proyecto se abordó un análisis de costes con el objetivo de cuantificar el impacto económico de las distintas versiones del basculante: el modelo inicial, el optimizado topológicamente y los prototipos con relleno lattice. Para ello, se seleccionó como método de fabricación la tecnología DMLS (Direct Metal Laser Sintering), dado que es la más adecuada para obtener piezas metálicas capaces de soportar elevadas exigencias mecánicas.

El estudio económico contempló tres bloques principales de costes: amortización de la máquina, material empleado y tiempo técnico asociado. Por último, se añadieron los costes de personal técnico vinculados a la preparación de los archivos y las tareas de postprocesado.

En el caso del prototipo optimizado topológicamente, se obtuvo un volumen de 972 cm³ (9.720 cm³ a escala real) y un tiempo estimado de fabricación de 50 horas para la pieza a tamaño real. Con estos valores se calcularon los costes finales, que incluyen tanto el consumo de material como las horas de impresión. Los modelos con relleno lattice, tanto el de tipo Body Centered Cubic como el TPMS Gyroid, mostraron ligeras reducciones de material frente al modelo optimizado, pero un incremento significativo en el tiempo de fabricación debido a la complejidad geométrica.

Conclusiones

Los resultados pusieron de manifiesto una tendencia clara: aunque la optimización topológica y el uso de estructuras lattice permiten una notable reducción de masa y una mejora en la relación resistencia/peso, desde el punto de vista económico no siempre resultan competitivas. El ahorro en material no compensa el aumento de horas de impresión lo que encarece el coste unitario. De este modo se concluye que estas tecnologías encuentran su mayor aplicación en prototipos únicos o en sectores donde la ligereza extrema justifica el sobrecoste, como en automoción de alto rendimiento o aeronáutica.

Relación con M2S

El trabajo de fin de máster se conecta de manera directa con varias asignaturas del programa de Motorsport, Movilidad y Seguridad, ya que en su desarrollo se aplicaron herramientas y metodologías trabajadas durante el curso. En primer lugar, la modelización estructural y las simulaciones realizadas en Solid Edge y Ansys guardan relación con Structural Modelling and FEA y con el bloque de Powertrain, donde aprendimos a generar mallas, definir condiciones de contorno y validar resultados bajo diferentes escenarios de carga.

Por otra parte, el proyecto se vinculó con Technologies and Methods, asignatura en la que se abordaron procesos de fabricación como la impresión 3D. En el TFM, este conocimiento resultó esencial tanto en la elección de DMLS como método de prototipado como en el análisis

de costes asociados. También fue clave el uso de escaneado 3D y el software de postprocesado, en Technologies and Methods. El empleo de VXmodel para limpiar y reconstruir la nube de puntos del basculante fue un paso imprescindible antes de importar el modelo a Solid Edge, y refleja la importancia de dominar herramientas de digitalización para integrar geometrías reales en un flujo de trabajo de simulación y optimización.

ANEXO

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

Autor: Arias Lezcano. Marco

Supervisor: Jiménez Calzado, Mariano.

Entidad colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO

1. Introducción

El proyecto consistió en el rediseño de un basculante de motocicleta mediante un proceso completo que incluyó el modelado inicial en SolidEdge, la optimización topológica en Altair y la posterior integración de estructuras lattice con nTopology. A lo largo del desarrollo se realizaron simulaciones FEM para evaluar desplazamientos y tensiones, además de un análisis económico comparando la pieza original, la optimizada y la rellena con lattice. El trabajo permitió validar las ventajas en reducción de peso y desempeño mecánico, así como identificar las limitaciones asociadas al coste computacional y a los tiempos de impresión.

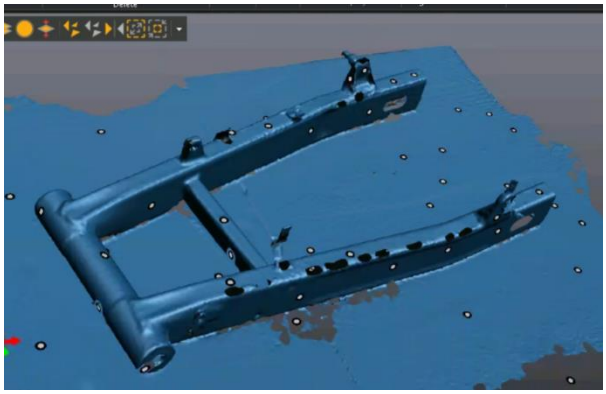
2. Objetivo

El proyecto tiene como objetivos aplicar técnicas de ingeniería inversa mediante escaneo 3D para digitalizar un basculante existente y obtener un modelo base, optimizar dicho modelo y su mallado con el software VX y, a partir de él, emplear optimización topológica para reducir

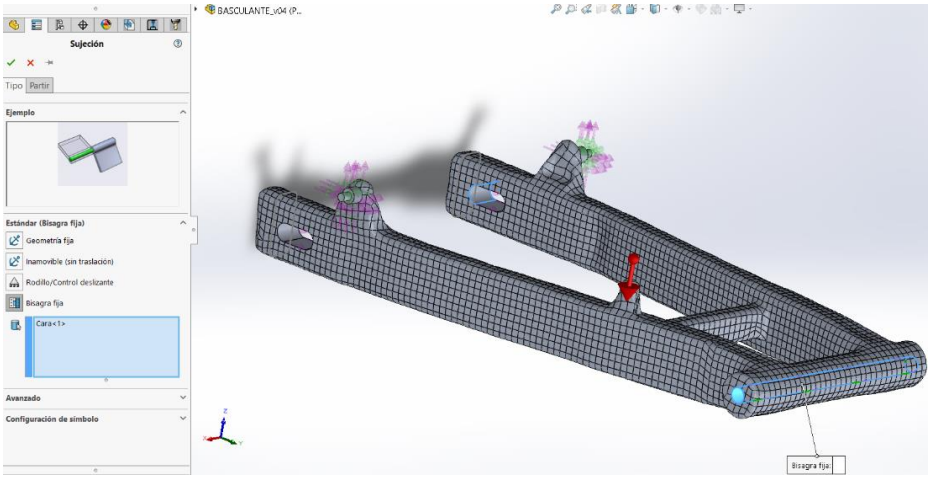
el peso manteniendo la rigidez y resistencia necesarias. Asimismo, se plantea utilizar diseño generativo para explorar nuevas geometrías que maximicen el rendimiento estructural e incorporar estructuras lattice con el fin de mejorar la relación peso-resistencia. Finalmente, se busca validar el diseño resultante mediante simulaciones de elementos finitos y pruebas de prototipado, utilizando la impresión 3D para la creación de prototipos físicos y evaluando la viabilidad del diseño.

3. Procedimiento

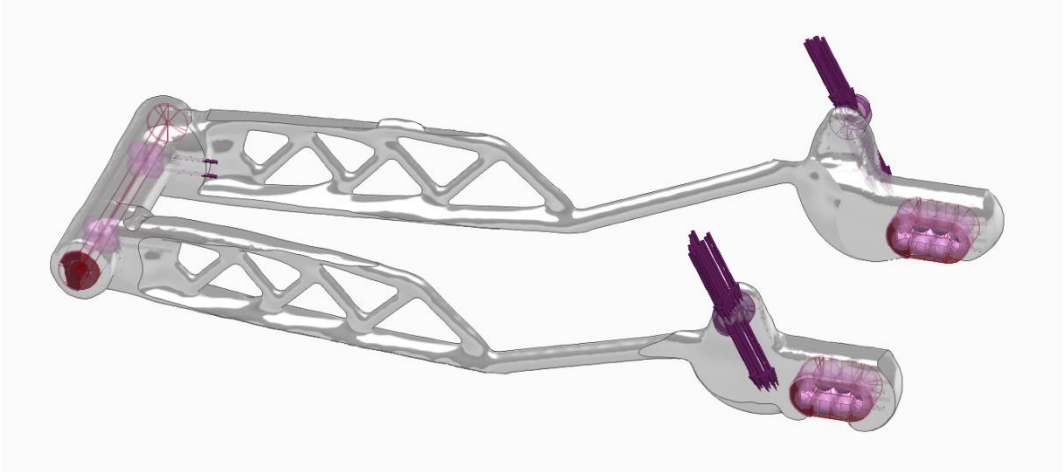
En primer lugar, se realiza el escaneo 3D del basculante original para obtener la geometría inicial y convertirla en un modelo digital.



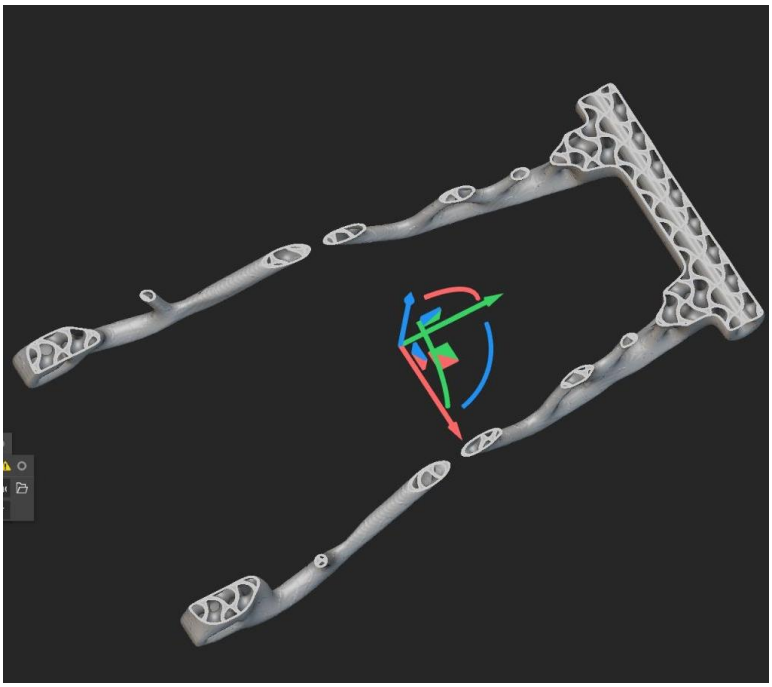
A continuación, este modelo se optimiza y se malla correctamente en VX, garantizando una base fiable para los análisis posteriores.



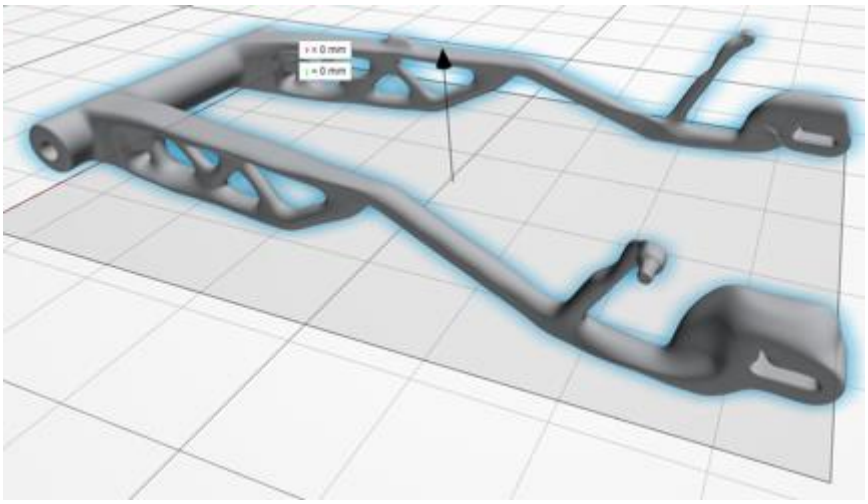
El siguiente paso consiste en aplicar optimización topológica con el fin de reducir el peso de la pieza manteniendo las condiciones de rigidez y resistencia necesarias.



Posteriormente, se emplea diseño generativo para explorar configuraciones geométricas alternativas y se incorporan estructuras lattice con el objetivo de mejorar la relación peso-resistencia.



Finalmente, el diseño resultante se valida mediante simulaciones de elementos finitos y se materializa a través de impresión 3D, creando prototipos físicos que permiten evaluar su viabilidad en la práctica.



4. Resultados

Los resultados obtenidos muestran que la aplicación de optimización topológica y estructuras lattice permite reducir de forma significativa el peso del basculante respecto al modelo original, mejorando la relación rigidez/peso. Sin embargo, el análisis económico evidencia que el ahorro en material conseguido no compensa el elevado tiempo y coste de impresión asociados a la fabricación aditiva, lo que hace que los métodos tradicionales sigan siendo más competitivos en producciones en serie. Además, las simulaciones FEM confirmaron que las piezas optimizadas mantienen un comportamiento estructural adecuado, aunque se detectaron limitaciones ligadas a defectos de malla, pérdidas de geometría al transferir modelos entre softwares y un alto coste computacional en los procesos de optimización.

5. Conclusiones

En conclusión, el estudio confirma que la optimización topológica y la incorporación de estructuras lattice permiten reducir de manera significativa el peso del basculante sin comprometer su rigidez, mejorando la eficiencia estructural respecto al modelo original. No obstante, los beneficios derivados del menor consumo de material no llegan a compensar los elevados costes y tiempos de impresión asociados a la fabricación aditiva, lo que hace que, salvo en aplicaciones unitarias o de alta exigencia en ligereza, los métodos convencionales resulten más rentables en producciones de mayor escala.

Por otra parte, el desarrollo del proyecto puso de manifiesto varias limitaciones, entre ellas los defectos de malla y la pérdida de geometría durante la transferencia de modelos entre programas, así como el elevado coste computacional de las simulaciones, que restringió el número de alternativas analizadas.

Por último, de cara a futuras investigaciones, se plantea ampliar el estudio a distintas configuraciones y densidades lattice mediante simulaciones FEM comparativas, con el objetivo de identificar diseños con mejor equilibrio entre resistencia, peso y viabilidad económica. También se recomienda validar los resultados con ensayos experimentales, explorar

tecnologías emergentes de fabricación aditiva y realizar análisis de ciclo de vida que permitan valorar no solo los costes y prestaciones, sino también el impacto ambiental y su alineación con los objetivos de desarrollo sostenible.

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

Author: Arias Lezcano. Marco

Supervisor: Jiménez Calzado, Mariano.

Collaborating entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

ABSTRACT

1. Introduction

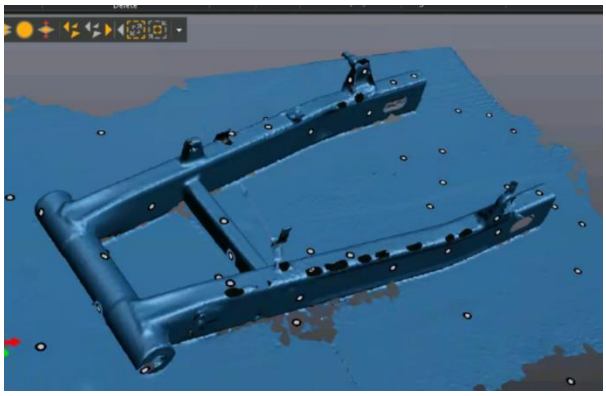
The project consisted of the redesign of a motorcycle swingarm through a complete process that included the initial modeling in SolidEdge, the topological optimization in Altair, and the subsequent integration of lattice structures with nTopology. Throughout the development, FEM simulations were carried out to evaluate displacements and stresses, along with an economic analysis comparing the original part, the optimized version, and the lattice-filled design. The work made it possible to validate the advantages in terms of weight reduction and mechanical performance, as well as to identify the limitations associated with computational cost and printing times.

2. Objectives

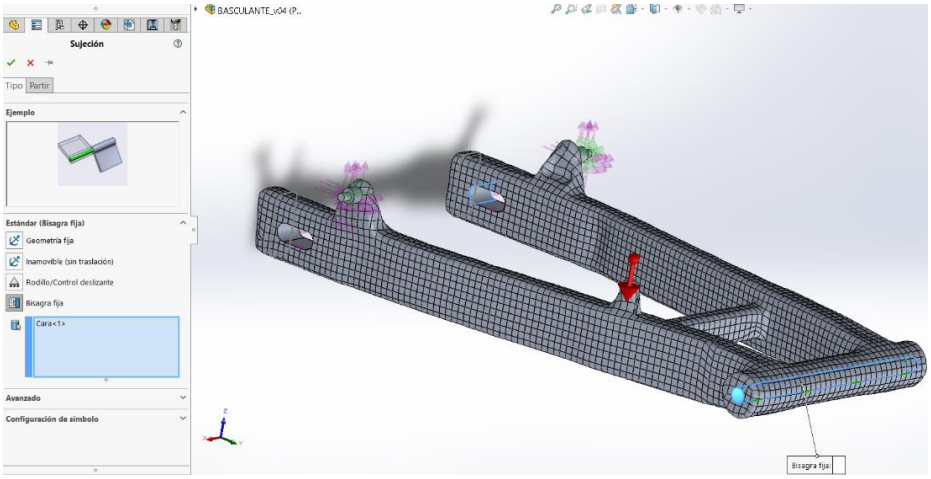
The project aims to apply reverse engineering techniques through 3D scanning to digitize an existing swingarm and obtain a base model, optimize this model and its meshing with VX software, and from it, employ topological optimization to reduce weight while maintaining the required stiffness and strength. Likewise, the project intends to use generative design to explore new geometries that maximize structural performance and incorporate lattice structures to improve the weight-to-strength ratio. Finally, the goal is to validate the resulting design through finite element simulations and prototyping tests, using 3D printing to create physical prototypes and assess the feasibility of the design.

3. Method

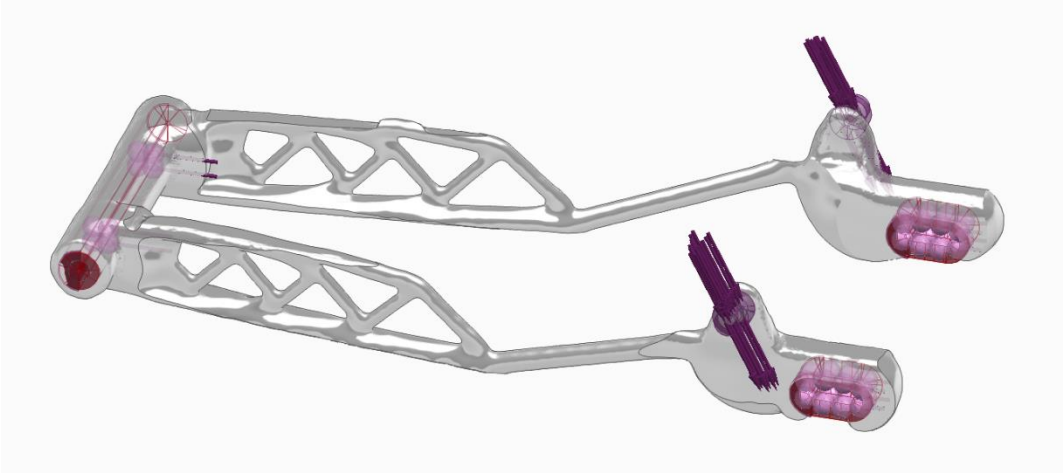
First, a 3D scan of the original swingarm is carried out to obtain the initial geometry and convert it into a digital model.



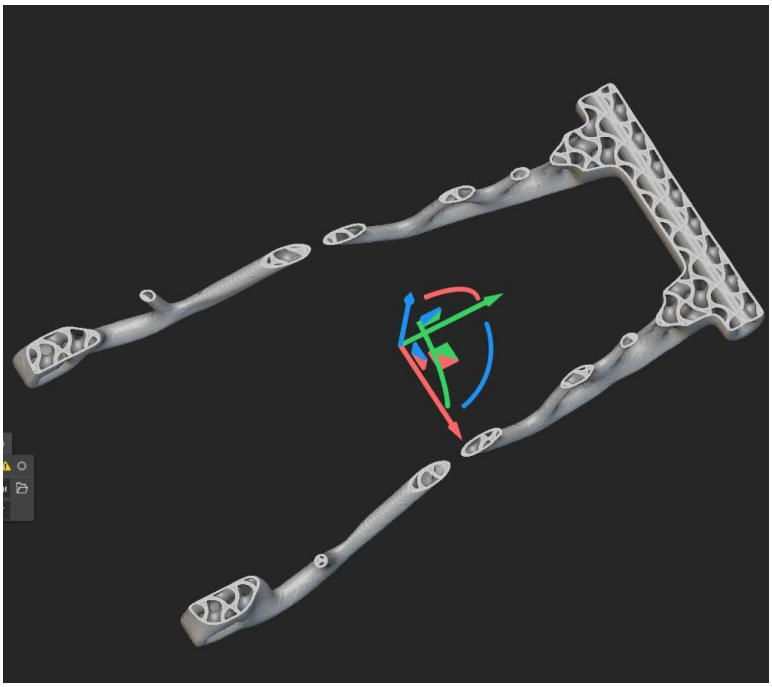
Next, this model is optimized and properly meshed in VX, ensuring a reliable basis for subsequent analyses.



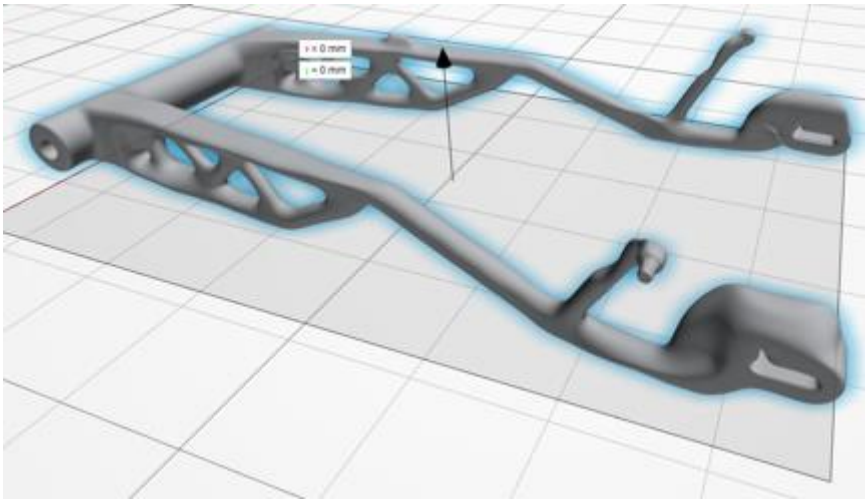
The following step consists of applying topological optimization in order to reduce the weight of the part while maintaining the required stiffness and strength conditions.



Subsequently, generative design is used to explore alternative geometric configurations, and lattice structures are incorporated with the aim of improving the weight-to-strength ratio.



Finally, the resulting design is validated through finite element simulations and materialized via 3D printing, producing physical prototypes that allow the evaluation of its practical feasibility.



4. Results

The results obtained show that the application of topological optimization and lattice structures allows a significant reduction in the swingarm's weight compared to the original model, improving the stiffness-to-weight ratio. However, the economic analysis reveals that the material savings achieved do not offset the high printing time and cost associated with additive manufacturing, making traditional methods more competitive for series production. In addition, FEM simulations confirmed that the optimized parts maintain an adequate structural behavior, although limitations were identified related to mesh defects, geometry loss during model transfer between software, and the high computational cost of the optimization processes.

5. Conclusion

In conclusion, the study confirms that topological optimization and the incorporation of lattice structures make it possible to significantly reduce the weight of the swingarm without compromising its stiffness, thus improving structural efficiency compared to the original model. Nevertheless, the benefits derived from lower material consumption do not offset the high costs and printing times associated with additive manufacturing, which means that, except for single-unit applications or cases requiring extreme lightweight performance, conventional methods remain more cost-effective for large-scale production.

On the other hand, the development of the project highlighted several limitations, including mesh defects and geometry loss during the transfer of models between software, as well as the high computational cost of simulations, which restricted the number of alternatives analyzed.

Finally, for future research, it is proposed to expand the study to different lattice configurations and densities through comparative FEM simulations, with the aim of identifying designs that

offer a better balance between strength, weight, and economic feasibility. It is also recommended to validate the results through experimental testing, explore emerging additive manufacturing technologies, and conduct life cycle analyses to assess not only costs and performance but also environmental impact and alignment with sustainable development goals.

ÍNDICE

Contenido

DISEÑO DE UN COMPONENTE INDUSTRIAL A PARTIR DE INGENIERÍA INVERSA, MEDIANTE LA COMBINACIÓN DE OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA, DISEÑO GENERATIVO Y ESTRUCTURAS LATTICE. 2

RESUMEN DEL PROYECTO 14

ABSTRACT 20

ÍNDICE 26

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES 27

1. INTRODUCCIÓN 31

1.1. Contexto y relevancia del estudio 31

1.2. Objetivos del proyecto 31

1.3. Alcance y limitaciones 32

1.4. ODS 33

2. ESTADO DEL ARTE 35

2.2. Ingeniería inversa en el sector automotriz 35

2.3. Impresión 3D: principios y tecnologías 42

2.4. Diseño generativo: conceptos y herramientas 44

2.5. Estructuras lattice en diseño mecánico 47

3. PROPUESTA DE ESTUDIO (MOTIVACIÓN) 52

3.1. Justificación del uso de ingeniería inversa y optimización 52

3.2. Desafíos actuales en el diseño de basculantes 53

3.3. Oportunidad de integración de estructuras lattice 53

3.4. Impacto potencial en la industria de la motocicleta 54

4. METODOLOGÍA 56

4.1. Definición del enfoque metodológico 56

4.2. Proceso de ingeniería inversa 56

4.3. Diseño generativo asistido por software 59
4.4. Impresión 3D de la pieza 60
5. IMPLANTACIÓN (DESARROLLO) 61
5.1. Ingeniería inversa y modelado 3D del basculante base 61
5.2. Análisis estructural de basculantes de motocicletas 76
5.3. Aplicación de optimización topológica para reducción de peso 86
5.4. Suavizado de la pieza optimizada 97
5.5 Proceso de fabricación aditiva (Selección de materiales y tecnologías) 103
5.6 Estudio FEM de las distintas estructuras lattice 118
6. ANÁLISIS DE COSTES 120
6.1 Prototipo optimizado topológicamente 122
6.2 Prototipo optimizado relleno de lattice Body Centered Cubic 124
6.4 Prototipo optimizado relleno de lattice TPMS Gyroid 124
.7. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS 125
7.1. Conclusiones del estudio 125
7.2. Limitaciones encontradas durante el desarrollo 125
7.3. Recomendaciones para futuras investigaciones 126
BIBLIOGRAFÍA 127
ANEXOS 128

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Objetivos de desarrollo sostenible 34
Ilustración 2 Ingeniería Inversa y Prototipado Rápido en el Proceso de Desarrollo de Prototipos. 36
Ilustración 3 Flujo de trabajo del escaneado 3D 37
Ilustración 4 Componentes de un escáner 3D 38
Ilustración 5 Proceso de escaneado de la pieza 39
Ilustración 6 Entorno de trabajo de VXmodel 40

Ilustración 7 Placa de calibración 41
Ilustración 8 García Orden, J. C., Gutiérrez Venturini, A., & Fernández Barroso, E. (2019). Diseño, optimización topológica e impresión 3D de férula de muñeca. Universidad Politécnica de Madrid. https://oa.upm.es/65320/1/INVE_MEM_2019_326493.pdf..... 45
Ilustración 9 Airbus IN3DTEC. (2022, mayo 14). Topology Optimization for 3D Printing. https://www.in3dtec.com/topology-optimization-for-3d-printing/ 46
Ilustración 10 Estructuras lattice 48
Ilustración 11 Brazo robótico con estructura lattice Batista et al. (2024)..... 50
Ilustración 12 Simulación brazo robótico con estructura lattice Batista et al. (2024)..... 50
Ilustración 13 Probetas lattice tras ensayo de tracción Kothandaraman (2024) 51
Ilustración 14 First 3D-printed Motorcycle by APWorks (Airbus Group) called Lightrider. https://www.altair.com.es/resource/apworks-light-rider-optimization-process..... 55
Ilustración 15 Diagrama de flujo ingeniería inversa 58
Ilustración 16 Diagrama de flujo diseño generativo..... 59
Ilustración 17 Diagrama de flujo impresión 3D 60
Ilustración 18 Escaneado sin procesar..... 61
Ilustración 19 Vista superior del escaneado 62
Ilustración 20 Malla del escaneado 2 62
Ilustración 21 Malla del escaneado 3 63
Ilustración 22 Uso de la herramienta “Connect” 64
Ilustración 23 Uso de la herramienta "Free form selection" 65
Ilustración 24 Uso de la herramienta "connect" 65
Ilustración 25 Eliminación de ruido en la malla..... 66
Ilustración 26 Herramienta de selección "Isolated patches" 67
Ilustración 27 Resultado final malla 1 68
Ilustración 28 Resultado final malla 2..... 68
Ilustración 29 Resultado final malla 3 69
Ilustración 30 Uso de la herramienta "Best fit"..... 70
Ilustración 31 Unión mallas 1 71
Ilustración 32 Unión mallas 2..... 71
Ilustración 33 Unión final de todas las mallas 72
Ilustración 34 Detección de errores en la fusión de mallas 73
Ilustración 35 Error de solape entre mallas 74
Ilustración 36 Uso de la herramienta "Fill holes" 74
Ilustración 37 Seleccion de "Isolated patches"..... 75
Ilustración 38 Ajuste de curvaturas..... 75

Ilustración 39 Importación de la malla a SolidWorks 76
Ilustración 40 Condición de contorno de bisagra 78
Ilustración 41 Condición de contorno de geometría fija 79
Ilustración 42 Condición de contorno de gravedad 80
Ilustración 43 Fuerzas externas sobre basculante 81
Ilustración 44 Descomposición del peso 82
Ilustración 45 Inspección del mallado 83
Ilustración 46 Tensiones de Von Mises 83
Ilustración 47 Análisis de desplazamientos 84
Ilustración 48 Tensiones en el paso por curva 85
Ilustración 49 Desplazamientos en el paso por curva 85
Ilustración 50 Parámetros de la optimización 87
Ilustración 51 Iteración 1 88
Ilustración 52 Iteración 2 89
Ilustración 53 iteración 3 90
Ilustración 54 Iteración 4 91
Ilustración 55 Diseño final de la optimización topológica 92
Ilustración 56 Estado de cargas para validación del nuevo diseño 93
Ilustración 57 Tensiones de Von-Mises de la nueva geometría 94
Ilustración 58 Análisis de desplazamientos 95
Ilustración 59 Ampliación del punto crítico 96
Ilustración 60 Importación de la geometría optimizada a Altair Inspire 97
Ilustración 61 Intento de conversión automática 98
Ilustración 62 PolyNURBS con herramientas manuales 99
Ilustración 63 Detección automática de discontinuidades 100
Ilustración 64 Uso de la herramienta "Puente" 101
Ilustración 65 Uso de la herramienta "puente" pt2 101
Ilustración 66 Error típico con grandes volúmenes 102
Ilustración 67 Solución dividiendo volúmenes 103
Ilustración 68 Tipos de estrucutras lattice en Ntop 104
Ilustración 69 Importación de la geometría a Ntop 105
Ilustración 70 Bloque Shell 106
Ilustración 71 Aplicación del bloque Shell para vaciar la pieza a partir de una malla importada 106
Ilustración 72 Aplicación del bloque shell 107
Ilustración 73 Definición de la estructura lattice 107

Ilustración 74 Distintas orientaciones de las células body centered cubic 108
Ilustración 75 Flujo de trabajo en nTop 110
Ilustración 76 Estructura lattice Body centered cubic de 2mm 111
Ilustración 77 Estructura lattice Body centered cubic de 3mm 112
Ilustración 78 Rectangular cell map relleno de estrucutras Gyroid 113
Ilustración 79 Unión booleana del shell y la estructura lattice 115
Ilustración 80 Bloque boolean unión 116
Ilustración 81 Flujo de trabajo final en nTop 117
Ilustración 82 Basculante en cama de impresión 120
Ilustración 83 Costes de la impresora 3D 121
Ilustración 84 Cálculo del volumen de material de impresión 122
Ilustración 85 Parámetros de impresión 123
Ilustración 86 Costes pieza optimizada topológicamente 123
Ilustración 87 Costes de pieza con relleno lattice BCC 124
Ilustración 88 Costes de pieza con relleno lattice Gyroid 124

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Contexto y relevancia del estudio

Hoy en día, el sector de la automoción, en concreto el de las motocicletas se encuentra en constante cambio, con el objetivo de optimizar el rendimiento, la seguridad y la eficacia de sus vehículos por tanto componentes. El basculante es una pieza esencial en la estructura de una motocicleta, ya que por un lado sostiene la rueda trasera y hace de punto de unión entre el tren trasero y el chasis. Es por ello que el basculante es vital para mantener la estabilidad y el comportamiento dinámico del vehículo. Históricamente, los basculantes se fabrican empleando técnicas tradicionales que se enfocan en la rigidez y la durabilidad. No obstante, la exigencia de disminuir peso sin poner en riesgo la integridad estructural ha impulsado la implementación de tecnologías de vanguardia como la optimización topológica, el diseño generativo y las estructuras lattice.

El uso de la ingeniería inversa facilita el análisis y perfeccionamiento de diseños ya existentes, brindando así un fundamento sólido para innovar en la reestructuración de componentes esenciales. En este escenario, la fusión de estas tecnologías ofrece una oportunidad importante para perfeccionar el diseño del basculante, consiguiendo disminuir su peso y potenciar su desempeño dinámico, particularmente en usos deportivas y competitivos.

1.2. Objetivos del proyecto

- Aplicar técnicas de ingeniería inversa (escaneo 3D) para analizar un basculante existente y obtener un modelo base.
- Optimizar el mallado y el modelo base mediante VX
- Utilizar optimización topológica para reducir el peso manteniendo la rigidez y resistencia necesarias.

- Emplear diseño generativo para explorar nuevas geometrías que maximicen el rendimiento estructural.
- Incorporar estructuras lattice para optimizar la relación peso-resistencia.
- Validar el diseño final mediante simulaciones de elementos finitos (FEA) y pruebas de prototipado.
- Utilizar la fabricación mediante impresión 3D para la creación de prototipos físicos, evaluando la viabilidad del diseño optimizado en materiales avanzados.

1.3. Alcance y limitaciones

El enfoque del proyecto se centrará en el diseño y estudio estructural del basculante para motocicleta, utilizando herramientas de software de diseño asistido por ordenador (CAD). El procedimiento de modelado y mejora se realizará con SolidWorks y VX para la creación de modelos 3D y simulaciones de elementos finitos (FEA). Estas plataformas ofrecen un entorno robusto para el tratamiento de mallas, la elaboración del diseño, la implementación de optimizaciones topológicas y la viabilidad estructural bajo diferentes condiciones de carga. No obstante, cabe señalar que estas herramientas también presentan restricciones, en particular cuando se incorporan estructuras complejas como los lattice.

Uno de los aspectos más innovadores de este proyecto será la implementación de este tipo ce estructuras con el fin de reducir el peso y mejorar la eficiencia de las estructuras sin comprometer su eficacia. Aunque estructuras como Voronoi, Gyroid, Kelvin, Octet y Primitive brindan beneficios considerables en cuanto a rigidez específica y absorción de energía, también representan diversos retos que se explorarán a lo largo del proyecto. Estas estructuras pueden resultar complicadas de replicar con exactitud mediante procesos de producción existentes.

Para validar el diseño optimizado, se empleará la impresión en 3D como técnica de prototipado. La Universidad Pontificia Comillas ofrece un amplio espectro de métodos para la producción aditiva. En este escenario, se utilizarán impresoras de filamento (FDM), de resina (SLA), en polvo (SLS) o la impresión de filamento reforzado con fibra de carbono, lo cual puede incrementar notablemente la resistencia estructural del prototipo, algo crucial en piezas de este

tipo. No obstante, las tecnologías de impresión disponibles en la universidad pueden tener limitaciones en cuanto a tamaño de fabricación y compatibilidad con materiales de alto rendimiento puesto que la pieza en cuestión ocupa 550 x 300 x 40. Por lo tanto, si bien el proyecto demostrará la viabilidad del diseño mediante prototipos a escala, la fabricación a tamaño real puede requerir tecnologías de fabricación adicionales.

Otro aspecto a tener en cuenta es el post-procesado de la pieza una vez imprimida. La fabricación aditiva requiere una etapa de limpieza y en ocasiones tratamientos adicionales de curado para mejorar las propiedades mecánicas o estéticas del material. Dependiendo de la estructura de la pieza es posible que haya huecos que no se puedan alcanzar con chorreo u otras técnicas de limpieza.

1.4. ODS

Este Trabajo Fin de Máster además de abordar la optimización topológica y la aplicación de estructuras lattice en el diseño de componentes industriales, también se alinea con varios de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) definidos por la Agenda 2030 de las Naciones Unidas. La contribución de este proyecto se enmarca especialmente en los siguientes objetivos:

Ilustración 1 Objetivos de desarrollo sostenible

Fuente: pactomundial.org

ODS 9: Industria, innovación e infraestructura.

El trabajo fomenta la innovación en el ámbito del diseño y la fabricación de componentes industriales, explorando nuevas metodologías como la optimización topológica, el diseño generativo y las estructuras lattice. Estas herramientas permiten mejorar la eficiencia de los procesos productivos y promover la creación de infraestructuras más sostenibles y resistentes, reforzando la capacidad de la industria para adaptarse a nuevas exigencias tecnológicas.

ODS 12: Producción y consumo responsables.

La reducción de material lograda mediante optimización topológica y el uso de estructuras lattice contribuye directamente a una producción más eficiente, disminuyendo el consumo de recursos sin comprometer las propiedades mecánicas de la pieza. Este enfoque ayuda a minimizar los residuos generados y a promover un modelo de consumo industrial más sostenible.

ODS 13: Acción por el clima.

El ahorro de material y peso en los componentes diseñados tiene un efecto indirecto en la disminución del impacto ambiental, ya que reduce el consumo energético asociado tanto a su fabricación como a su uso en sistemas industriales, especialmente en sectores como el transporte. Con ello se contribuye a mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero y avanzar hacia la descarbonización.

ODS 8: Trabajo decente y crecimiento económico.

El desarrollo de nuevas metodologías de diseño y fabricación aditiva impulsa la creación de empleo en sectores de alta especialización tecnológica. Además, fomenta el crecimiento económico basado en la innovación y en la transición hacia procesos productivos de mayor valor añadido, lo que repercute positivamente en la competitividad industrial.

2. ESTADO DEL ARTE

2.2. Ingeniería inversa en el sector automotriz

La ingeniería inversa se ha establecido como un instrumento crucial tanto en el sector de la automoción como en la ingeniería en general o la construcción, al simplificar la generación de modelos digitales a partir de productos físicos ya disponibles. En contraposición al método convencional de la ingeniería, que convierte ideas abstractas en productos físicos, la ingeniería inversa invierte este procedimiento al transformar un objeto físico en un modelo digital, usualmente en formato CAD. Esto resulta especialmente beneficioso en circunstancias donde no hay documentación técnica del producto original, el fabricante ha dejado de funcionar o se necesitan mejoras en los diseños actuales para mejorar su rendimiento.

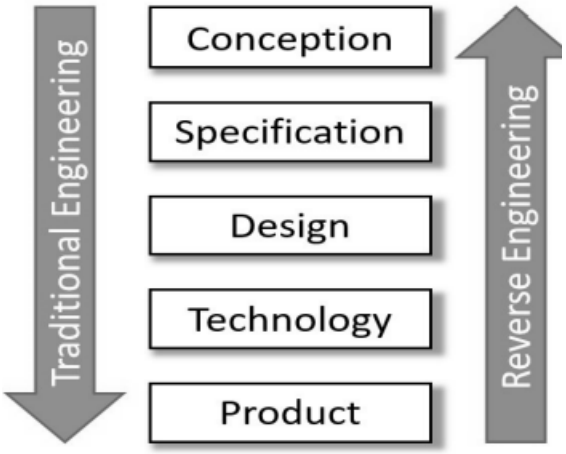


Ilustración 2 Ingeniería Inversa y Prototipado Rápido en el Proceso de Desarrollo de Prototipos.

La ingeniería inversa se emplea para duplicar componentes que ya no se producen, examinar componentes con geometrías complejas o efectuar controles de calidad mediante modelos CAD exactos. Las técnicas convencionales, como las mediciones manuales, aunque son efectivas en productos sencillos, tienen restricciones al lidiar con superficies no planas y curvas de mayor complejidad. No obstante, el progreso de tecnologías como las máquinas de medición por coordenadas (CMM) y el escaneo en tres dimensiones ha facilitado la superación de estos obstáculos, incrementando la exactitud en la recopilación de medidas físicas.

La implementación de estas tecnologías no solo acelera la reproducción de componentes anticuados, sino que también posibilita la actualización de diseños, facilitando un enfoque rápido y eficaz en la mejora de productos ya existentes. Esto, por consiguiente, promueve la innovación en la producción y conservación de automóviles, particularmente en un escenario donde la digitalización y la exactitud son esenciales para asegurar la calidad y eficacia del producto final.

En el ámbito de la industria del automóvil en concreto, se emplea la ingeniería inversa tanto en la creación de vehículos nuevos como en la optimización de modelos ya existentes. Por ejemplo, se ha utilizado para actualizar componentes de vehículos tradicionales o clásicos que ya no se producen, además de rediseñar componentes en vehículos de alto rendimiento. Un ejemplo destacado es el proyecto de rediseño de motocicletas de Cohn Racers, en el que se

emplearon métodos de escaneo 3D para digitalizar elementos originarios de Harley Davidson para diseñar una motocicleta que posteriormente se fabricó en línea. Mediante este procedimiento, se elaboraron modelos CAD minuciosos que facilitaron la modificación y personalización de componentes estructurales y estéticos de la motocicleta, consiguiendo de esta manera un balance entre funcionalidad y diseño.

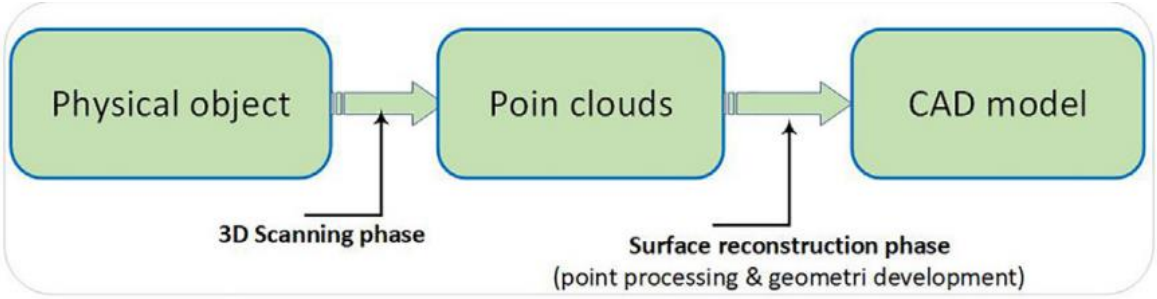


Ilustración 3 Flujo de trabajo del escaneado 3D

Actualmente, la universidad cuenta con los escáneres Go!SCAN 3D. Este escáner destaca por su capacidad para capturar geometrías complejas y texturas en alta resolución, lo cual ofrece una solución rápida y precisa para el rediseño y estudio de piezas. La tecnología de este dispositivo se basa en la emisión de un patrón de luz blanca sobre el objeto que se quiere escanear. Este patrón, al interactuar con la superficie del objeto, se deforma, y dichas deformaciones son registradas por dos cámaras que capturan la información necesaria para reconstruir la superficie en tiempo real. Este sistema permite generar modelos digitales detallados que pueden ser empleados en procesos de diseño, optimización o manufactura.

Ilustración 4 Componentes de un escáner 3D

Una de las características más importantes del escáner es su tecnología de posicionamiento híbrido inteligente. Esta combina el uso de pegatinas de posicionamiento, que se colocan en o alrededor del objeto, con información geométrica natural del objeto mismo. Este enfoque asegura una alta precisión en la adquisición de datos, incluso en superficies que presentan dificultades, como aquellas con grandes áreas planas o reflectivas. Además, el escáner cuenta con una cámara especifica con la que capturar texturas, permitiendo adquirir datos y detalles visuales como colores o marcas. Esto es especialmente útil en aplicaciones donde estos detalles tienen relevancia, como la identificación de defectos visuales o el análisis de acabados superficiales.

Ilustración 5 Proceso de escaneado de la pieza

Durante el proceso de escaneo, el usuario debe seguir un flujo de trabajo preestablecido. Comienza con la conexión del dispositivo a un ordenador equipado con el software VXelements, necesario para controlar el escáner y procesar los datos. Antes de iniciar la captura, se deben ajustar parámetros como la exposición de las cámaras según las características del material a escanear. Por ejemplo, superficies oscuras o reflectantes requieren tiempos de obturación más altos para garantizar una correcta detección. Por otro lado, se debe inspeccionar la pieza que se va a escanear y posteriormente lavarla y aplicar spray antirreflejos si se requiere. A continuación, el escáner se utiliza de manera manual, moviéndolo sobre la pieza mientras proyecta la luz blanca y captura las deformaciones del patrón. Para obtener una malla bien detallada, es crucial mantener una distancia y ángulo correcto para que la luz incide bien sobre la pieza. Este proceso se realiza en tiempo real, y los datos recopilados se visualizan

directamente en el software, lo que permite al usuario corregir errores de posicionamiento o ajustar parámetros en el momento.

El programa vinculado al Go!SCAN 3D, VXelements, tiene un rol esencial en el manejo y mejora de los datos recolectados. Después de finalizar el escaneo, la información se convierte en una malla optimizada que puede ser exportada en formatos estándar como STL, OBJ o TXT. Estas mallas tienen múltiples usos, desde el diseño CAD hasta la impresión en 3D. El programa también proporciona herramientas extra, como la posibilidad de cubrir fisuras en la malla, mejorar los contornos o disminuir el tamaño de los archivos para simplificar su gestión.

Ilustración 6 Entorno de trabajo de VXmodel

A pesar de sus ventajas, el escáner presenta algunas limitaciones inherentes a su tecnología. La visibilidad del patrón de luz proyectado puede verse afectada por las propiedades del material a escanear. Superficies negras, altamente reflectantes o transparentes tienden a dificultar la adquisición de datos, aunque esto puede mitigarse ajustando los parámetros de exposición o utilizando productos como polvos de contraste o cintas de enmascarar. Asimismo, la precisión del escáner está influida por la cantidad de información geométrica o de objetivos de posicionamiento disponibles. Si bien el dispositivo puede alcanzar precisiones de hasta 100

micras, esta disminuye proporcionalmente al tamaño del modelo escaneado, con una precisión volumétrica de 300 micras por metro.

Otro aspecto importante es la calibración del dispositivo, un paso esencial para garantizar resultados precisos. El escáner debe ser calibrado regularmente, especialmente si ha sido sometido a impactos. Este proceso implica el uso de una placa de calibración específica como la mostrada a continuación que permite ajustar la orientación y posición del escáner de manera óptima. Además, el usuario debe asegurarse de que no haya objetos reflectantes cerca de la placa durante la calibración para evitar interferencias.

Ilustración 7 Placa de calibración

En cuanto a las características del entorno de trabajo, es fundamental mantener una distancia adecuada entre el escáner y el objeto, así como un ángulo correcto durante la captura. El escáner cuenta con indicadores visuales que ayudan al usuario a mantener estas condiciones, mejorando así la calidad del resultado. También es posible utilizar objetivos virtuales creados a partir de características naturales del objeto, como colores o texturas, lo que facilita el escaneo de piezas complejas o con geometrías desafiantes.

2.3. Impresión 3D: principios y tecnologías

La impresión en 3D, también llamada fabricación aditiva, se ha vuelto una tecnología esencial en la producción contemporánea. Facilita la generación de objetos tridimensionales a través de la incorporación sucesiva de material de capa en capa, conforme a un modelo digital elaborado por computadora (CAD). Esta tecnología, que ha experimentado una evolución significativa desde sus comienzos en los años 80, brinda beneficios como la habilidad de crear geometrías complejas, la disminución de residuos de material y la oportunidad de personalización a gran escala. A continuación, se detallan las metodologías de impresión 3D más relevantes, los materiales utilizados y sus usos.

La tecnología de impresión en 3D agrupa diversas técnicas, cada una con características particulares que determinan su capacidad para diferentes materiales y usos. Un método frecuentemente utilizado es el Modelado por Deposición Fundida (FDM), que emplea filamentos de materiales termoplásticos como el ABS (acrilonitrilo butadieno estireno) y el PLA (ácido poliláctico). En este procedimiento, el filamento se calienta hasta llegar a un estado semilíquido y se extruye mediante una boquilla que coloca el material de una capa a otra sobre una plataforma de edificación. El FDM se utiliza extensamente debido a su coste reducido, sencillez de manejo y compatibilidad con una diversidad de materiales. Resulta particularmente beneficioso para prototipos veloces y componentes funcionales sencillos (Shahrubudin et al., 2019).

Otra técnica relevante es la Sinterización Selectiva por Láser (SLS), la cual utiliza un láser de gran potencia para combinar partículas de polvo de materiales como polímeros, metales y cerámicos. En comparativa con el FDM, el SLS posibilita la producción de componentes con geometrías más complejas sin la necesidad de estructuras de apoyo, dado que el polvo no sinterizado desempeña el papel de soporte durante la producción. Esta tecnología es perfecta para la fabricación de elementos mecánicos y componentes livianos con elevada resistencia estructural, tal como las empleadas en la industria aeroespacial y de automóviles (Karakurt & Lin, 2020).

El uso principal de la Fusión Selectiva por Láser (SLM) y la Fusión por Haz de Electrones (EBM) es principalmente para metales. Estas técnicas son capaces de generar elementos metálicos de gran densidad y resistencia, resultando esencial en usos como la producción de implantes biomédicos, turbinas y componentes aeroespaciales. En contraposición, la Fotopolimerización en Cubeta (SLA) emplea un láser o una fuente de luz ultravioleta para consolidar estratos de resina líquida que son sensibles a la luz. Este procedimiento proporciona una resolución y calidad superior en la superficie, lo que lo convierte en perfecto para modelos minuciosos y elementos decorativos.

Respecto a los materiales utilizados en la impresión 3D, hay una extensa gama que abarca polímeros, metales, cerámicas y compuestos. Los polímeros son los materiales más empleados, destacando entre ellos el ABS y el PLA. El ABS es un termoplástico que resiste el impacto, comúnmente empleado en usos industriales y de consumo, tales como carcasas de aparatos electrónicos, componentes de vehículos y juguetes. En contraposición, el PLA, proveniente del almidón de maíz, es un material biodegradable y de fácil impresión, lo que lo convierte en idóneo para prototipos rápidos, empaques y productos de uso único (Shahrubudin et al., 2019).

Otros polímeros, tales como el polietileno (PE) y el polipropileno (PP), se emplean en contextos que demandan una elevada resistencia química y flexibilidad. Adicionalmente, materiales de mayor complejidad como el PEEK (polieteretercetona) y el PMMA (polimetacrilato de metilo) se utilizan en aplicaciones biomédicas y de alto rendimiento, atribuibles a sus propiedades mecánicas superiores y su biocompatibilidad. Dentro del ámbito metalúrgico, el titanio y sus respectivas aleaciones son extensivamente empleados debido a su resistencia, ligereza y biocompatibilidad, siendo idóneos para la fabricación de implantes y componentes aeronáuticos. Otros metales, tales como el aluminio, el acero inoxidable y las aleaciones de cobalto-cromo, también hallan uso en ámbitos industriales y de consumo (Karakurt & Lin, 2020).

A pesar de su menor prevalencia, las cerámicas desempeñan un papel crucial en aplicaciones especializadas como componentes dentales, ópticos y estructuras resistentes al calor. Por ejemplo, se emplea el óxido de zirconio en la manufactura de coronas dentales y componentes de reactores nucleares debido a su resistencia al desgaste y propiedades térmicas. Los

materiales compuestos, que amalgaman polímeros con fibras de refuerzo como el carbono o el vidrio, han generado una revolución en áreas de alto rendimiento como la aeroespacial y la automoción, proporcionando una combinación singular de ligereza, resistencia y rigidez. Desde una perspectiva de aplicaciones, la impresión tridimensional se ha consolidado como un instrumento esencial para la innovación en una variedad de sectores. Dentro del sector aeroespacial, facilita la producción de componentes ligeros y complejos, tales como álabes de turbinas y componentes estructurales. Dentro del campo biomédico, se emplea para la fabricación de implantes personalizados, prótesis y modelos quirúrgicos que optimizan los resultados clínicos y disminuyen los periodos de recuperación. La industria automotriz también obtiene ventajas de esta tecnología, empleándola en la creación de prototipos, herramientas y componentes funcionales.

Además de estas aplicaciones convencionales, la impresión tridimensional está generando nuevas oportunidades en áreas emergentes como la robótica blanda, en la que se emplean materiales flexibles como los hidrogeles para la creación de actuadores y sensores de vanguardia. Además, se está investigando su aplicación en la producción de alimentos, textiles a medida y estructuras arquitectónicas sostenibles. Por ejemplo, se han desarrollado técnicas para la impresión de viviendas mediante el uso de concreto, lo cual podría generar una revolución en el sector constructivo al disminuir costos y plazos de construcción. No obstante, a pesar de sus múltiples beneficios, la impresión tridimensional enfrenta diversos retos. Estos factores incluyen restricciones en la velocidad de producción, la necesidad de un postratamiento para optimizar la calidad de la superficie y la ausencia de normas uniformes para los materiales y procesos. Adicionalmente, la impresión de metales y otros materiales de vanguardia puede implicar costos elevados y la necesidad de equipos especializados, factores que restringen su accesibilidad para pequeñas y medianas empresas.

2.4. Diseño generativo: conceptos y herramientas

El diseño generativo representa un enfoque innovador en el proceso de diseño que emplea algoritmos avanzados para la generación, evaluación y optimización de soluciones, fundamentándose en criterios previamente establecidos. Contrariamente a los métodos tradicionales, en los que el diseñador configura manualmente la geometría del producto, el diseño generativo evalúa múltiples alternativas simultáneamente, estableciendo las configuraciones óptimas fundamentadas en el rendimiento estructural, la eficiencia de los materiales y las restricciones de producción.

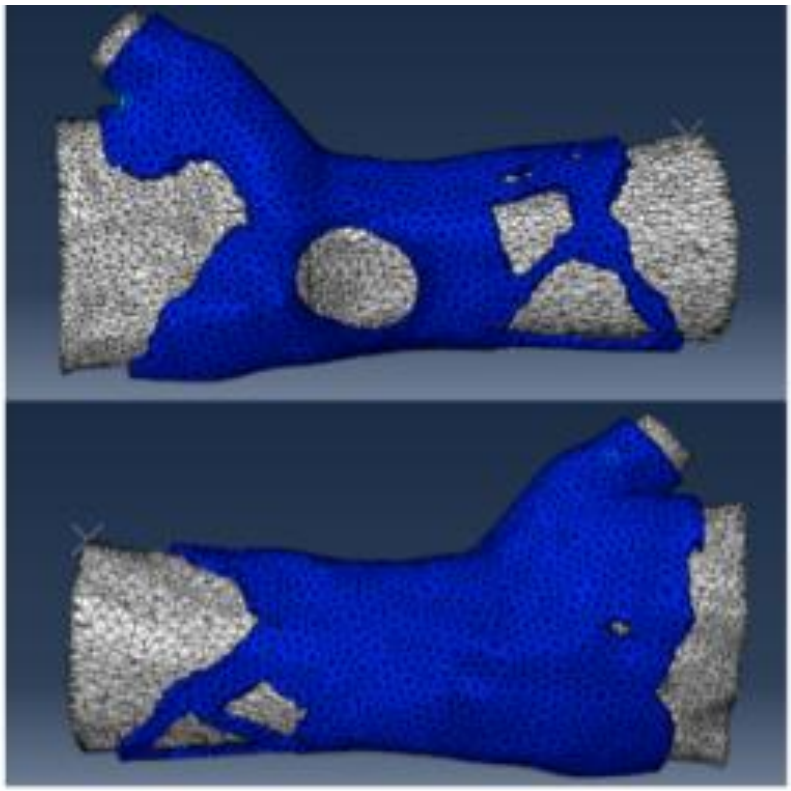


Ilustración 8 García Orden, J. C., Gutiérrez Venturini, A., & Fernández Barroso, E. (2019). Diseño, optimización topológica e impresión 3D de férula de muñeca. Universidad Politécnica de Madrid. https://oa.upm.es/65320/1/INVE_MEM_2019_326493.pdf

Una de las principales ventajas del diseño generativo radica en su capacidad para optimizar estructuras y reducir el uso de material sin comprometer la resistencia. Esta tecnología promueve la producción de componentes más ligeros y eficaces, particularmente ventajosos en sectores como el automovilístico y el aeroespacial, donde la reducción de peso incide directamente en el rendimiento y la utilización de energía. Adicionalmente, este enfoque

fomenta la creatividad mediante la generación de soluciones innovadoras que podrían no haber sido consideradas mediante técnicas convencionales.

Una ventaja fundamental radica en la incorporación de tecnologías de vanguardia, tales como la inteligencia artificial y el modelado paramétrico, lo que posibilita la ejecución de iteraciones de diseño en tiempo real. Esto agiliza el proceso de desarrollo de productos y optimiza la toma de decisiones, al ofrecer una variedad de alternativas optimizadas que satisfacen los requisitos de manufactura y rendimiento.

Ilustración 9 Airbus IN3DTEC. (2022, mayo 14). Topology Optimization for 3D Printing. https://www.in3dtec.com/topology-optimization-for-3d-printing/

El diseño generativo ha demostrado su utilidad en diversos sectores industriales. En el sector aeroespacial previamente mencionado, entidades como Airbus han implementado esta tecnología con el objetivo de optimizar componentes estructurales, logrando reducciones de peso de hasta un 45%. Dentro del ámbito automovilístico, empresas como General Motors han desarrollado componentes de mayor ligereza y durabilidad a través de este procedimiento. El diseño generativo también se manifiesta en la arquitectura y la edificación, especialmente en la optimización de estructuras complejas y en la eficiencia energética de los edificios. Dentro del campo de la ingeniería mecánica, el diseño generativo ha sido implementado en la producción de componentes con geometrías sofisticadas a través de la impresión tridimensional. Esto facilita un incremento en la libertad de diseño y posibilita la creación de

estructuras optimizadas que resultarían inviables de desarrollar mediante métodos convencionales.

Pese a sus múltiples beneficios, el diseño generativo plantea ciertas dificultades, particularmente en el sector manufacturero. Numerosas soluciones producidas pueden presentar dificultades para su fabricación mediante métodos convencionales, lo que demanda procesos de manufactura aditiva o técnicas de mecanizado avanzadas. Adicionalmente, la verificación de los diseños puede demandar simulaciones adicionales para garantizar su cumplimiento con las exigencias estructurales y normativas.

Un desafío adicional radica en la incorporación de estos procesos en los flujos de trabajo actuales. Pese al progreso en el desarrollo de software de diseño generativo, la implementación de dichas herramientas demanda una curva de aprendizaje y una adaptación de las metodologías de desarrollo de productos.

En el ámbito del diseño generativo, Solid Edge proporciona funcionalidades que habilitan a los ingenieros para establecer limitaciones de diseño y optimizar la geometría de los componentes basándose en criterios como peso, rigidez y condiciones de carga. El módulo de diseño generativo utiliza algoritmos de optimización topológica con el objetivo de disminuir el material en áreas de baja tensión, preservando la resistencia estructural requerida. Mediante su aplicación en las simulaciones de elementos finitos (FEA), los diseñadores tienen la capacidad de validar los modelos generados y efectuar modificaciones en tiempo real previo a la etapa de fabricación.

2.5. Estructuras lattice en diseño mecánico

Las estructuras de celosía, también conocidas como lattice, constituyen una táctica avanzada en el diseño mecánico en el ámbito de la fabricación aditiva (AM). Estas estructuras se constituyen por patrones periódicos de vigas o nodos interconectados, los cuales pueden ser organizados en configuraciones bidimensionales o tridimensionales, y cuya geometría puede ser altamente personalizada en función del comportamiento estructural exigido. El principal valor de estas configuraciones se encuentra en su habilidad para optimizar la relación

resistencia-peso del componente, disminuir de manera significativa el consumo de material, y facilitar la generación de formas complejas que resultarían inviables a través de procesos de fabricación tradicionales.

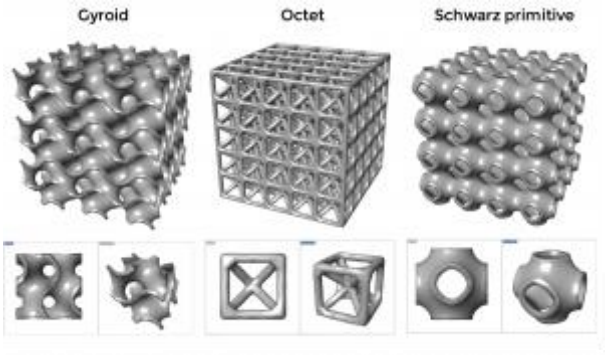


Ilustración 10 Estructuras lattice

Dentro del marco de la fabricación a través de la Modelización Fused Deposición (FDM), la aplicación de estructuras lattice ha evidenciado una mejora significativa en las características mecánicas de los componentes. La tecnología FDM, ampliamente empleada debido a su accesibilidad y versatilidad, facilita la integración de estructuras lattice en el proceso de impresión de capa a capa, particularmente con materiales como el ácido poliláctico (PLA), un polímero biodegradable de alta resistencia y facilidad de impresión. Trabajos de investigación contemporáneos han utilizado métodos de diseño de experimentos y optimización de tipo Taguchi para modificar parámetros fundamentales de impresión (altura de capa, velocidad y temperatura de extrusión) y optimizar la resistencia mecánica de componentes fabricados con lattice. Se ha corroborado que una combinación adecuada de parámetros puede aumentar la resistencia a tracción en más del 25% en comparación con estructuras no optimizadas.

Además, la utilización de lattices en combinación con instrumentos de optimización topológica y simulaciones por elementos finitos (FEA) posibilita una exploración más detallada del comportamiento estructural. En estudios enfocados en el diseño mecánico avanzado, como la optimización estructural de brazos robóticos, se ha evidenciado que la incorporación de

estructuras lattice con escalas apropiadas puede disminuir la masa de un componente hasta en un 29%, con deformaciones reguladas y aceptables en contextos de carga operativa. Este método híbrido (optimización topológica y estructuras lattice) facilita la identificación de áreas críticas en las que se puede eliminar material sin poner en riesgo la integridad estructural, alcanzando un equilibrio entre el desempeño mecánico y el ahorro de peso.

Adicionalmente al ahorro de material, las estructuras lattice proporcionan ventajas adicionales tales como la optimización en la disipación térmica, el comportamiento acústico y la resistencia al impacto. Estas características han sido explotadas en ámbitos como la aeroespacial, la automoción y el biomédico, donde la producción aditiva facilita la creación de implantes personalizados, estructuras internas de ligereza y componentes con geometrías libres. La capacidad de modificar parámetros geométricos tales como la densidad, la orientación y la forma de las celdas lattice facilita una alineación precisa del diseño con las exigencias funcionales del producto.

Desde un enfoque de sostenibilidad, las estructuras lattice fomentan una producción más sustentable al disminuir el volumen total de material empleado. Esta medida se alinea con la creciente demanda de reducir el uso de recursos vírgenes y facilitar la impresión con materiales reciclados. En síntesis, la implementación de estructuras lattice constituye una solución de diseño de alto rendimiento en el ámbito de la producción aditiva, particularmente cuando se integra con técnicas sofisticadas de simulación y optimización computacional.

Un caso claro de la aplicación de estructuras lattice en la optimización de las propiedades de un componente es el estudio de Batista et al. (2024), en el que se emplea la fabricación aditiva en conjunción con técnicas de optimización topológica y estructuras de celosía para optimizar el diseño estructural de un brazo robótico. El propósito fundamental de la investigación consistió en incrementar la relación resistencia-peso del componente, minimizando su masa sin poner en riesgo su integridad estructural. Este proceso implicó el diseño de modelos CAD, la

implementación de estructuras lattice de escalas 0.4 y 0.5, y el análisis del comportamiento mecánico de los diseños mediante simulaciones por elementos finitos (FEA) en el software.

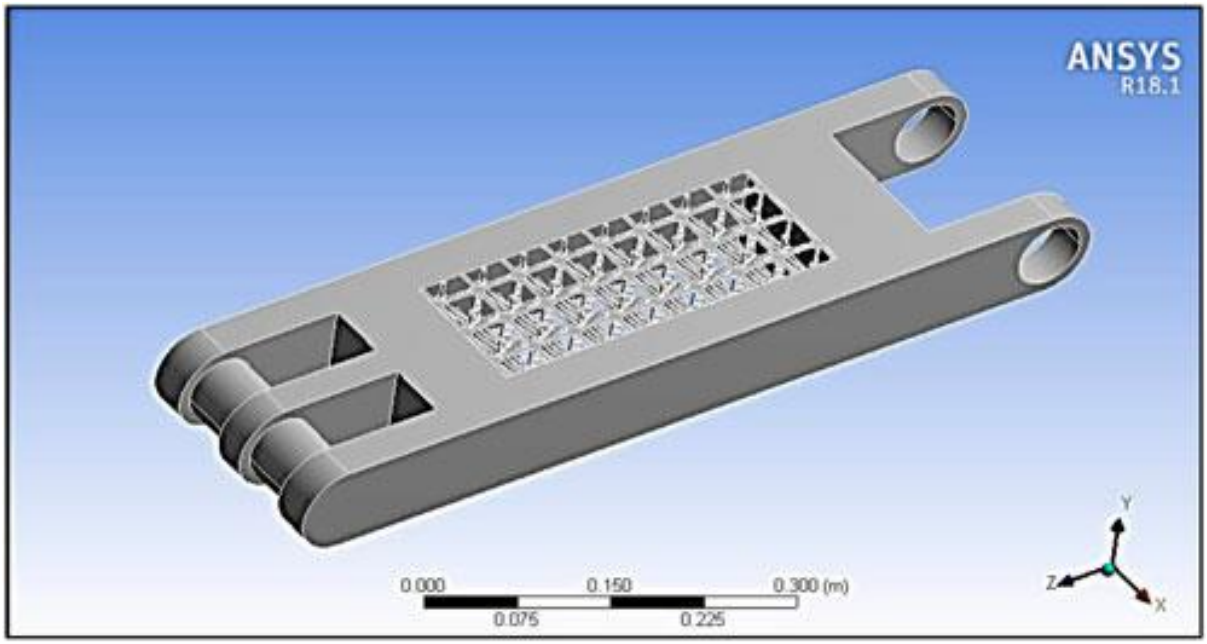


Ilustración 11 Brazo robótico con estructura lattice Batista et al. (2024)

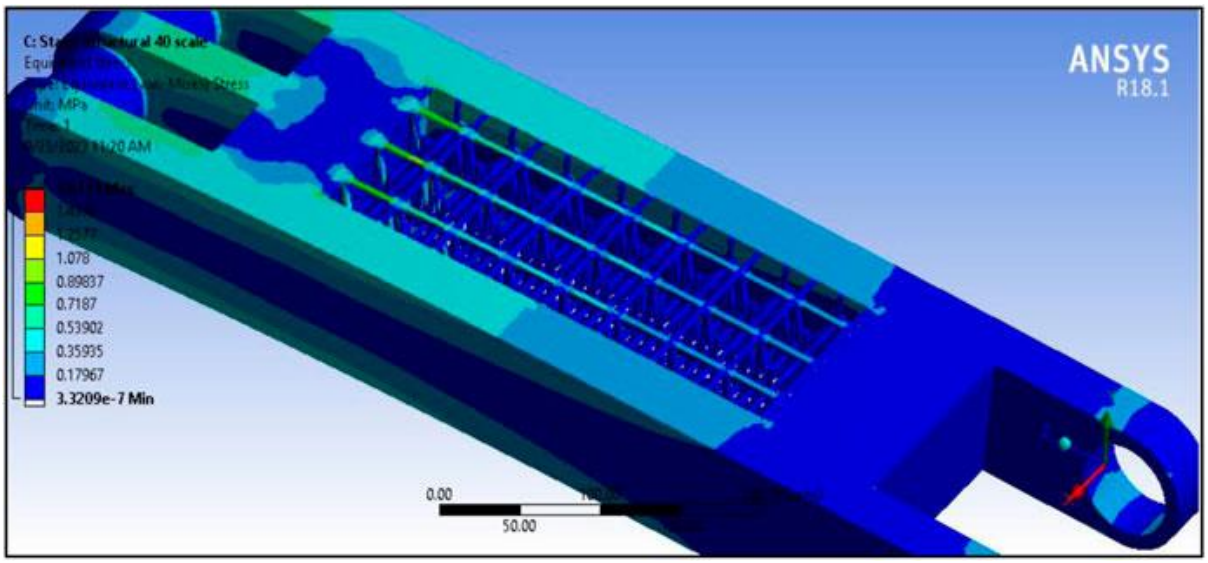


Ilustración 12 Simulación brazo robótico con estructura lattice Batista et al. (2024)

Los hallazgos indicaron que, a pesar de que las estructuras lattice generaban una deformación superior en comparación con el diseño genérico (0.01453 mm frente a 0.01043 mm), también facilitaban una reducción considerable de masa (hasta un 29.3%). No obstante, esta reducción de peso implicaba un aumento del esfuerzo equivalente, particularmente en el diseño con escala lattice 0.5, que exhibió un incremento del 31.08% en la tensión en comparación con el diseño original. Estos descubrimientos evidencian la capacidad de las estructuras lattice para la optimización de componentes mecánicos en contextos industriales, especialmente cuando se persigue eficiencia energética y reducción de peso, como en las industrias aeroespacial o robótica. La investigación concluye que la integración de la optimización topológica con lattices puede proporcionar soluciones de diseño ligeras, robustas y adaptables. Sin embargo, señala la necesidad de validaciones experimentales bajo condiciones prácticas.

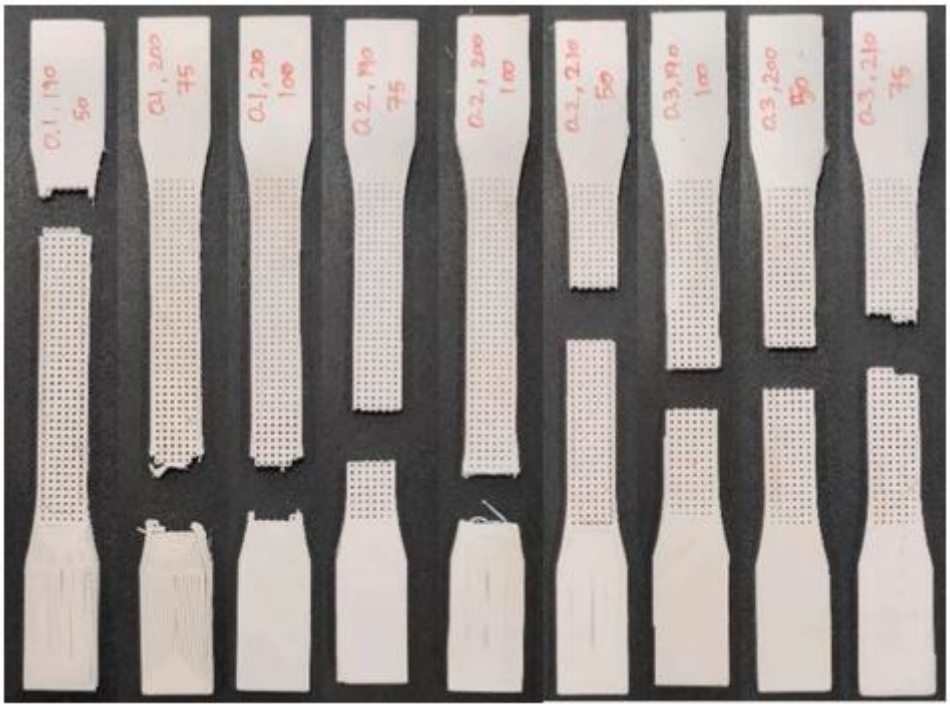


Ilustración 13 Probetas lattice tras ensayo de tracción Kothandaraman (2024)

Otro ejemplo claro del uso de estructuras lattice para mejorar las propiedades de una pieza es el estudio de Kothandaraman (2024), en el cual se investigó el impacto de distintos parámetros de impresión sobre la resistencia a tracción de probetas en PLA diseñadas con una estructura lattice cuadrada, fabricadas mediante Fused Deposition Modeling (FDM). El objetivo principal fue optimizar esta geometría interna para maximizar la relación entre peso y resistencia mecánica. Para ello, se evaluaron tres factores clave (altura de capa, velocidad y temperatura de impresión) en tres niveles cada uno. A lo largo del estudio se fabricaron probetas con diseño tipo "hueso de perro", que posteriormente fueron sometidas a ensayos de tracción.

Los resultados revelaron que la altura de capa es el parámetro con mayor influencia sobre la resistencia mecánica (87,46 % de contribución), seguida por la temperatura (8,89 %) y la velocidad de impresión (1,44 %). La combinación óptima para maximizar la resistencia a tracción incluyó una altura de capa de 0.1 mm, una temperatura de 190 °C y una velocidad de 100 mm/s, con un incremento del 25,4 % en la resistencia respecto a otras configuraciones. Este estudio subraya la importancia de ajustar los parámetros de impresión no solo en función de la calidad superficial o tiempo de fabricación, sino también para alcanzar propiedades mecánicas superiores en estructuras impresas con celosías.

3. PROPUESTA DE ESTUDIO (MOTIVACIÓN)

3.1. Justificación del uso de ingeniería inversa y optimización

La importancia de la ingeniería inversa y la optimización en la creación de componentes se incrementa progresivamente en la industria contemporánea, particularmente en áreas como la automoción y el motociclismo. La ingeniería inversa posibilita la obtención de una ilustración minuciosa de un objeto físico mediante su escaneo y modelado en 3D, lo que resulta crucial al manipular componentes complejos como los basculantes de motos. Este método ofrece un método eficaz para estudiar y replicar geometrías, facilitando la realización de mejoras en el diseño sin la necesidad de comenzar de nuevo.

La optimización es un procedimiento crucial para potenciar el desempeño de los elementos, disminuyendo el peso, incrementando la resistencia y perfeccionando la disposición de los materiales. Para los basculantes, mejorar su diseño no solo influye en la eficiencia de la motocicleta, sino también en la seguridad, manejabilidad y durabilidad del elemento. Mediante la combinación de ingeniería inversa con métodos de optimización, se pueden lograr diseños más leves y duraderos, ajustados a las demandas particulares del rendimiento en motociclismo y rally.

3.2. Desafíos actuales en el diseño de basculantes

El diseño de basculantes para motocicletas se topa con varios retos significativos. Uno de los desafíos más significativos es la armonía entre la resistencia y el peso. Los basculantes deben tener la fortaleza necesaria para resistir las fuerzas producidas durante la conducción, pero también la ligereza necesaria para no afectar la agilidad y el desempeño de la moto. Este reto se intensifica por la exigencia de acatar las regulaciones de seguridad y las elevadas demandas de los aficionados a las motos de competición, tales como los rallyes y otras competencias de motociclismo.

Otro reto importante es la resistencia bajo circunstancias extremas. Los basculantes necesitan soportar impactos, vibraciones y variaciones de temperatura, lo que demanda un diseño sólido y materiales de excelente calidad. Además, la aerodinámica y la mejora de las propiedades de suspensión también tienen un rol vital en el diseño de basculantes, dado que influyen en la estabilidad y el manejo de la moto en circunstancias de alta velocidad o terrenos complicados.

3.3. Oportunidad de integración de estructuras lattice

La incorporación de estructuras lattice en el diseño de basculantes proporciona nuevas oportunidades para enfrentar los retos previamente citados. Las estructuras lattice constituyen un método de diseño avanzado que posibilita la fabricación de componentes con una

distribución óptima de material, lo que resulta en una reducción de peso sin poner en riesgo la resistencia. Estas estructuras poseen la capacidad de ajustarse a las exigencias particulares de cada componente, optimizando la utilización de material en áreas que demandan mayor resistencia y minimizando el uso de material en áreas menos críticas.
La implementación de estructuras lattice en los basculantes puede conducir a diseños considerablemente más ligeros y con propiedades mecánicas superiores, factores que ejercen una influencia directa sobre el desempeño de las motocicletas. Adicionalmente, estas estructuras pueden ser perfeccionadas a través de instrumentos de diseño generativo y optimización topológica, que posibilitan la generación de geometrías complejas que optimizan el comportamiento del basculante bajo diversas circunstancias.

3.4. Impacto potencial en la industria de la motocicleta

La influencia de la incorporación de ingeniería inversa, optimización y estructuras lattice en el sector de la motocicleta es considerable. Este método posibilita la optimización de la eficiencia y el desempeño de los vehículos, posibilitando la fabricación de componentes más ligeros y robustos, un aspecto crucial para el sector de las motocicletas de competencia. La minimización del peso no solo optimiza el desempeño, sino que también puede afectar el consumo de combustible o energía, particularmente en las motocicletas eléctricas, un campo de creciente interés en el sector industrial.

Ilustración 14 First 3D-printed Motorcycle by APWorks (Airbus Group) called Lightrider. https://www.altair.com.es/resource/apworks-light-rider-optimization-process

Adicionalmente, la capacidad de adaptación a las necesidades particulares de los pilotos constituye otro beneficio esencial. La habilidad para personalizar los diseños mediante el uso de herramientas de optimización y estructuras lattice permite la creación de basculantes que se adecúen de manera óptima a las exigencias del piloto, optimizando así la ergonomía, la seguridad y la gestión de la motocicleta. A largo plazo, esto podría derivar en un progreso tecnológico que habilite a los productores para proporcionar motocicletas de alto rendimiento más seguras, eficaces y ajustadas a las exigencias del mercado.
La integración de estas tecnologías también constituye una ventaja competitiva para las marcas de motocicletas, posibilitándoles la innovación en el diseño de sus productos y mantener una posición preeminente en un mercado de alta competencia. Esta metodología tiene el potencial no solo de mejorar los componentes actuales, sino también de introducir nuevos tipos de motocicletas, optimizando su desempeño, eficiencia y costo de producción.

4. METODOLOGÍA

4.1. Definición del enfoque metodológico

El presente Trabajo Fin de Máster utiliza un enfoque metodológico que combina ingeniería inversa, optimización topológica, diseño generativo y estructuras lattice. El objetivo es desarrollar un basculante de motocicleta que esté optimizado tanto en estructura como en función. La metodología se organiza en fases que se repiten y siguen un orden. Estas fases van desde digitalizar el modelo físico hasta validarlo a través de simulaciones y prototipos. Este enfoque no solo quiere replicar una forma ya existente, sino transformarla en un nuevo componente usando herramientas avanzadas de diseño por computadora (CAD), análisis por elementos finitos (FEA) y fabricación aditiva.

El proceso sigue el siguiente flujo de trabajo: primero, se crea la geometría base usando ingeniería inversa, que se utiliza como referencia para la optimización topológica y el diseño generativo. A partir de ese punto, se utiliza la estructura lattice como una forma de hacer más ligero el material y mejorar su rendimiento mecánico. Finalmente, se usan herramientas de simulación para comprobar las propuestas antes de fabricarlas con impresión 3D o prototipado. Este enfoque ayuda a tomar decisiones informadas en cada etapa, basándose en criterios estructurales y de fabricación.

4.2. Proceso de ingeniería inversa

La fase de ingeniería inversa constituye el punto de partida del proyecto y tiene como objetivo la obtención precisa de la geometría 3D del basculante original. Esta etapa se desarrolla a través del escaneado 3D del componente físico, utilizando un escáner óptico de luz estructurada o láser, según disponibilidad. Los datos obtenidos se exportan en forma de nube de puntos, que posteriormente se transforman en una malla poligonal (STL). A partir de dicha malla, se lleva

a cabo el proceso de reconstrucción de superficies CAD, utilizando herramientas como SolidWorks y VXmodel.

Este modelo digital sirve como base para el análisis dimensional, la comparación con el diseño final optimizado y la implementación de los posteriores procesos de simulación estructural. La precisión geométrica obtenida en esta etapa es crítica para garantizar que el nuevo diseño conserve las restricciones funcionales del original (puntos de anclaje, espacio disponible, interferencias mecánicas) y pueda ser integrado sin necesidad de modificaciones adicionales.

El flujo de trabajo es el siguiente:

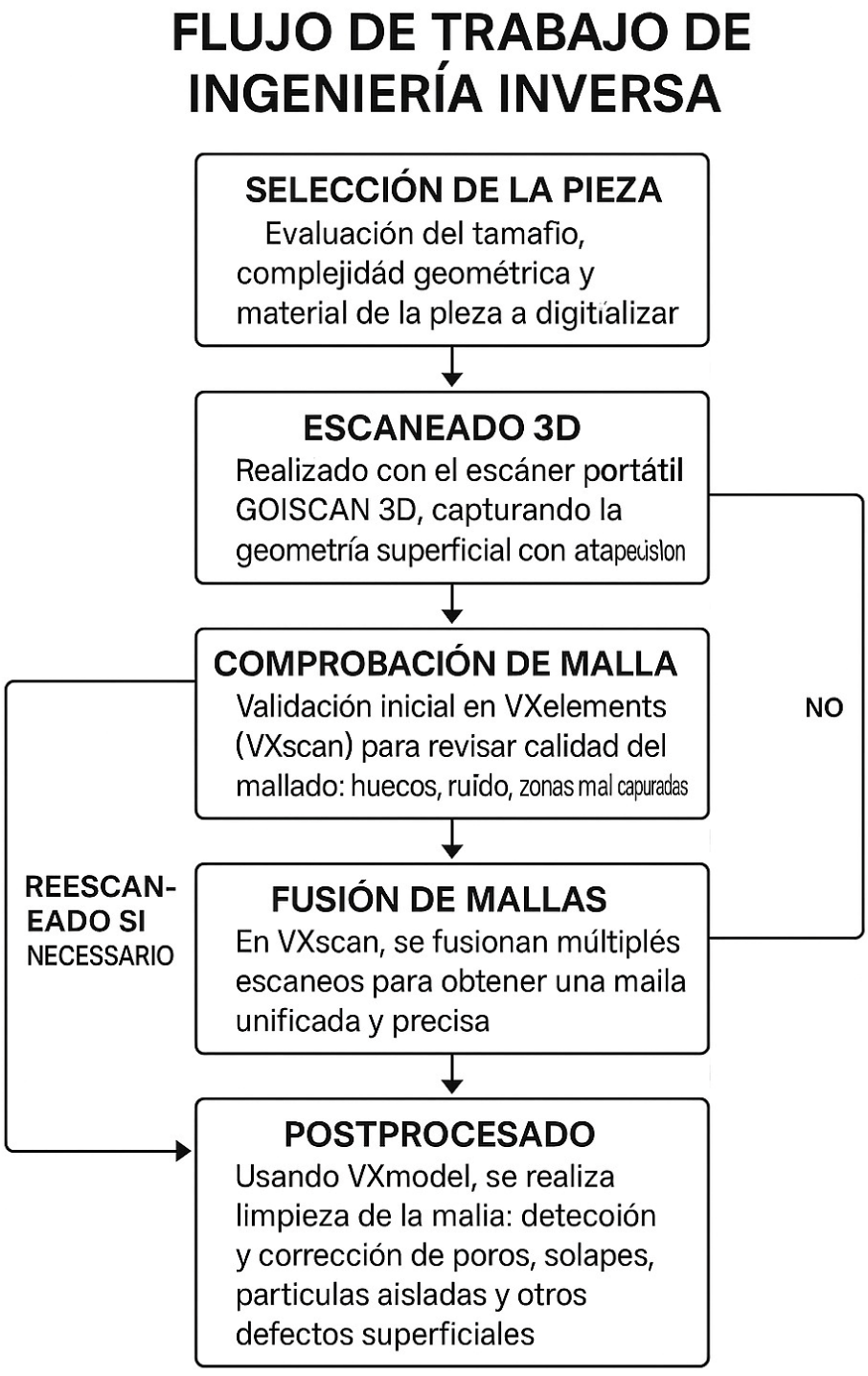


Ilustración 15 Diagrama de flujo ingeniería inversa

4.3. Diseño generativo asistido por software

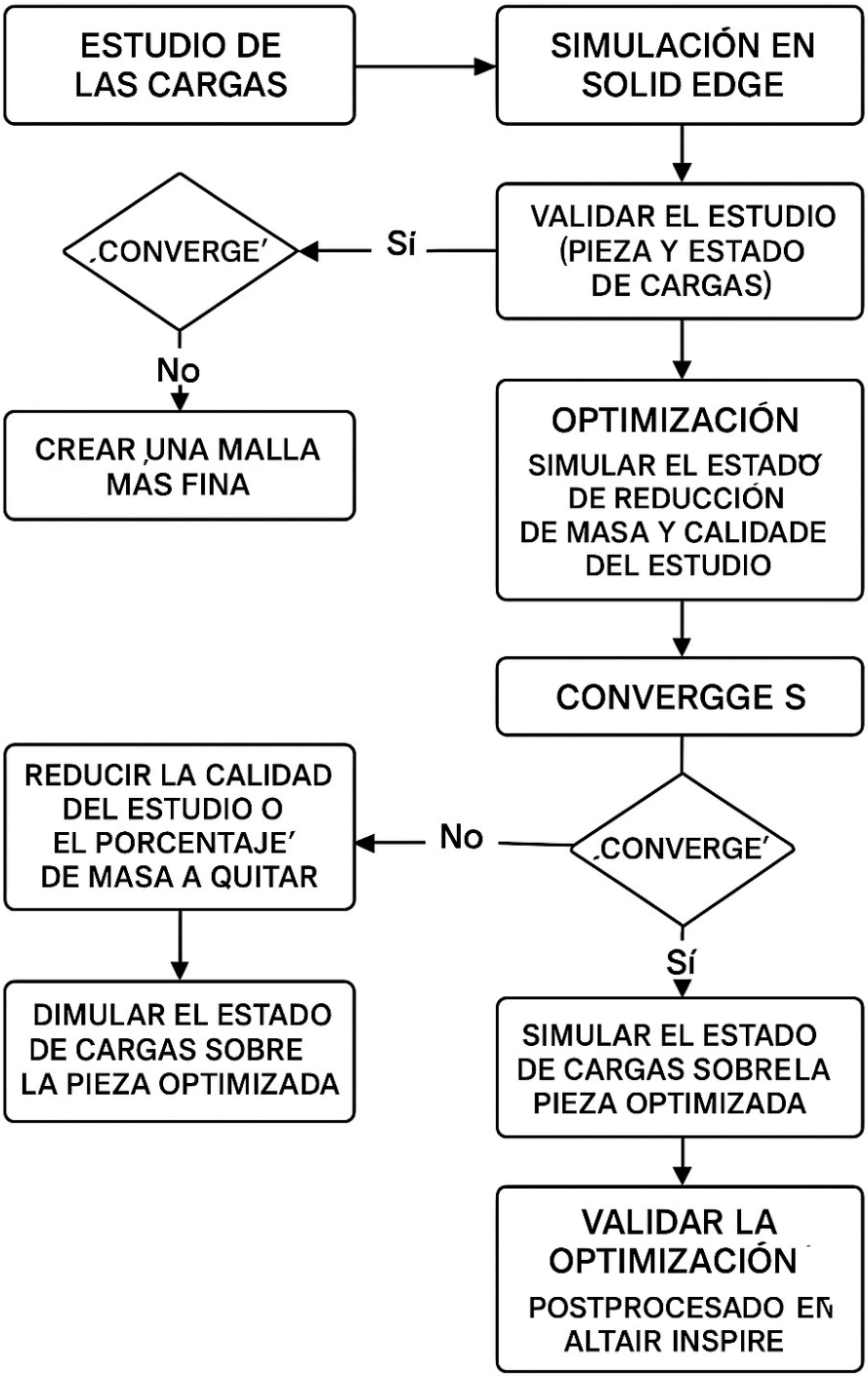


Ilustración 16 Diagrama de flujo diseño generativo

4.4. Impresión 3D de la pieza

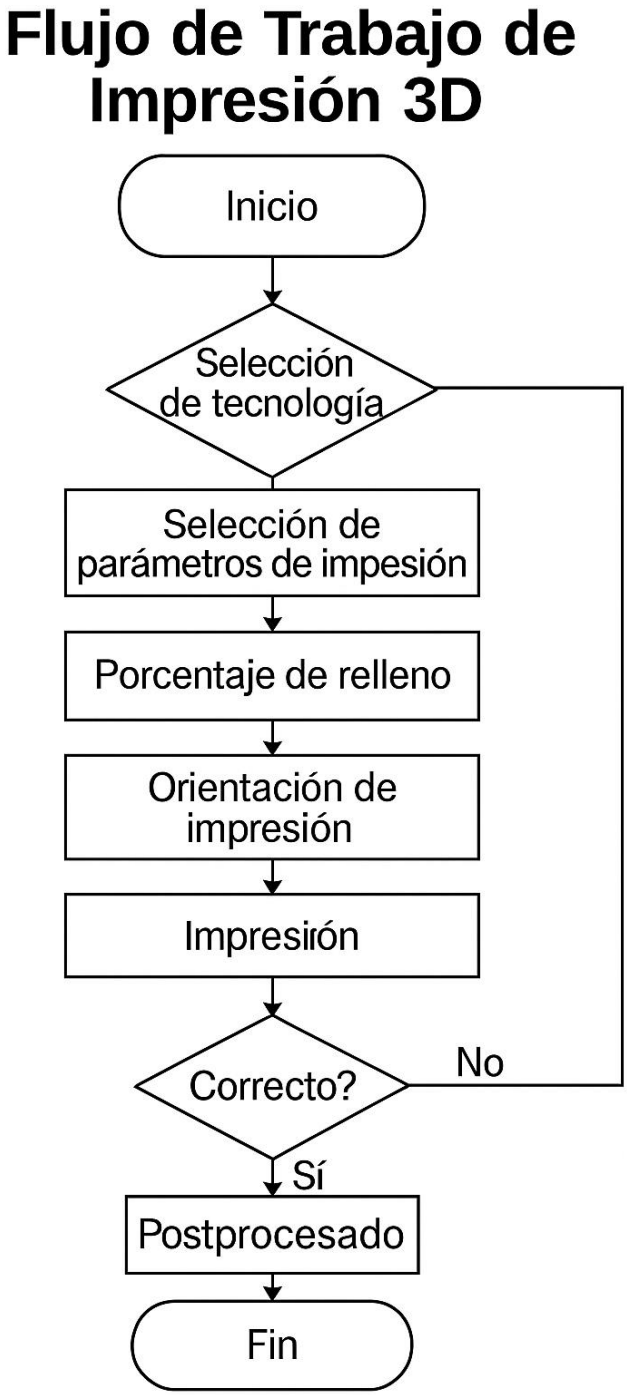


Ilustración 17 Diagrama de flujo impresión 3D

5. IMPLANTACIÓN (DESARROLLO)

5.1. Ingeniería inversa y modelado 3D del basculante base

El procedimiento inicial para la creación del basculante optimizado se inició con la ingeniería inversa del componente original. Para este fin, se empleó un escáner 3D GO!SCAN 50, accesible en la universidad, escogido entre las dos alternativas disponibles (GO!SCAN 20 y GO!SCAN 50). El GO!SCAN 50 fue seleccionado por su superior habilidad para escanear componentes de gran tamaño, resultando particularmente apropiado para las dimensiones del basculante.

El escaneo 3D posibilitó la captura de la geometría integral del basculante, creando una serie de nubes de puntos minuciosos que detallan su exterior. Para asegurar la máxima exactitud posible, se llevaron a cabo cuatro escaneos desde diferentes ángulos:

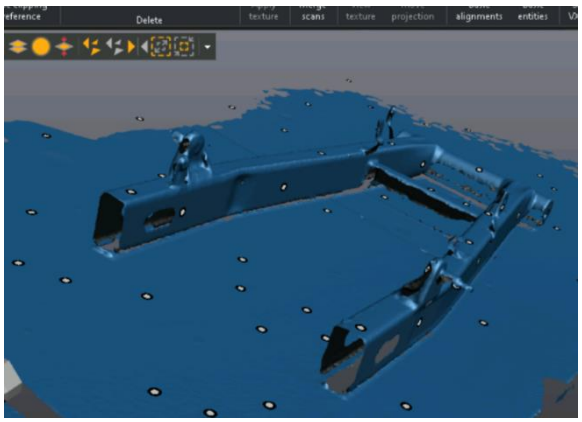


Ilustración 18 Escaneado sin procesar

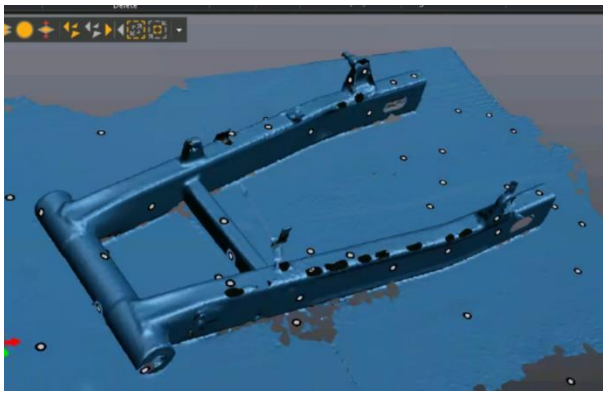


Ilustración 19 Vista superior del escaneado

Ilustración 20 Malla del escaneado 2

Ilustración 21 Malla del escaneado 3

Primero, empleando el programa VXmodel, se llevó a cabo un proceso de limpieza de las mallas con la finalidad de eliminar el ruido y maximizar su suavización. El primer paso implicó eliminar la nube de puntos relacionada con la plataforma que sustentaba el basculante durante el proceso de escaneo. En un principio, se utilizó la herramienta Connect, que facilita la identificación y elección automática de las superficies interconectadas, en este caso, la nube de puntos vinculada al suelo.

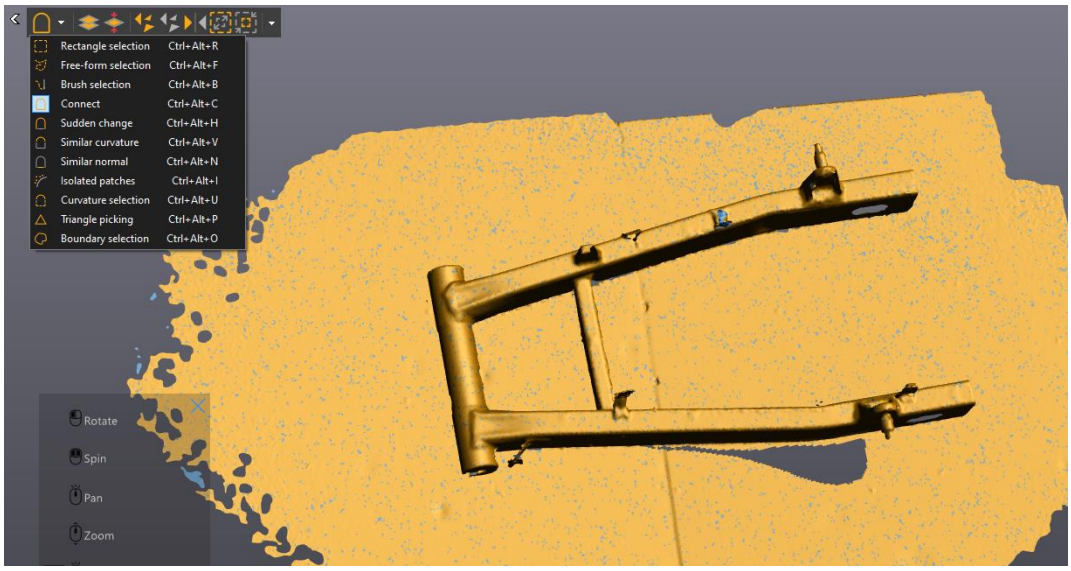


Ilustración 22 Uso de la herramienta "Connect"

Como se puede apreciar en la fotografía, la herramienta Connect no consiguió distinguir adecuadamente el componente del basculante desde la plataforma. Por lo tanto, se decidió llevar a cabo la separación de manera manual empleando la herramienta de selección Free Form Selection. Este procedimiento facilitó la identificación con mayor exactitud de los puntos vinculados a la plataforma y su eliminación, consiguiendo de esta manera separar totalmente el terreno del modelo del basculante.

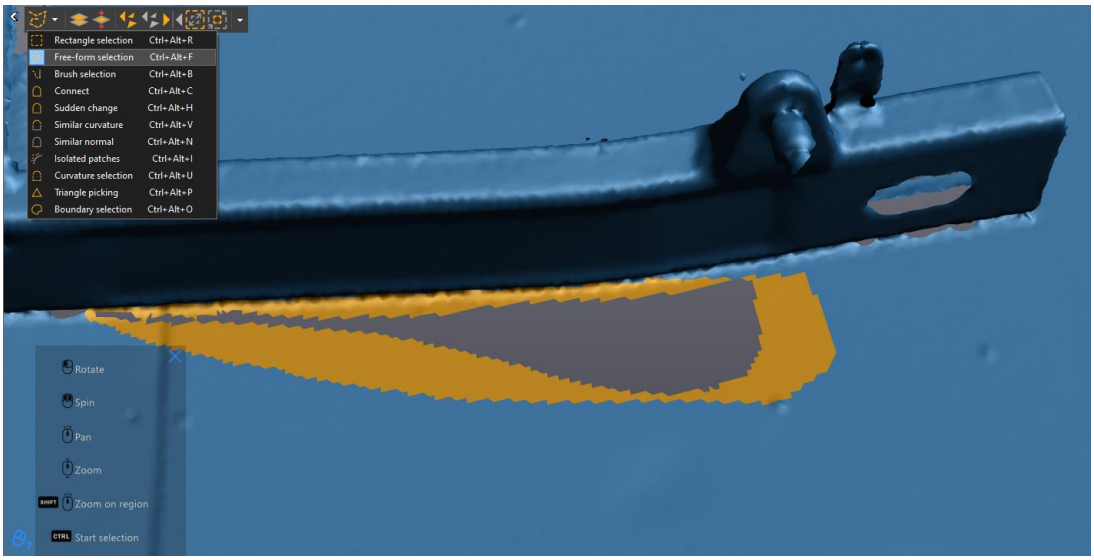


Ilustración 23 Uso de la herramienta "Free form selection"

Después de separar manualmente la nube de puntos relacionada con la plataforma, se recurrió a la herramienta Connect para comprobar si el software ahora podía diferenciar adecuadamente entre el basculante y su ambiente. Como se puede observar en la fotografía, VXmodel consiguió distinguir las dos nubes de puntos: el ambiente quedó adornando en naranja, mientras que la pieza del basculante se representó en azul, lo que señala una separación exitosa.

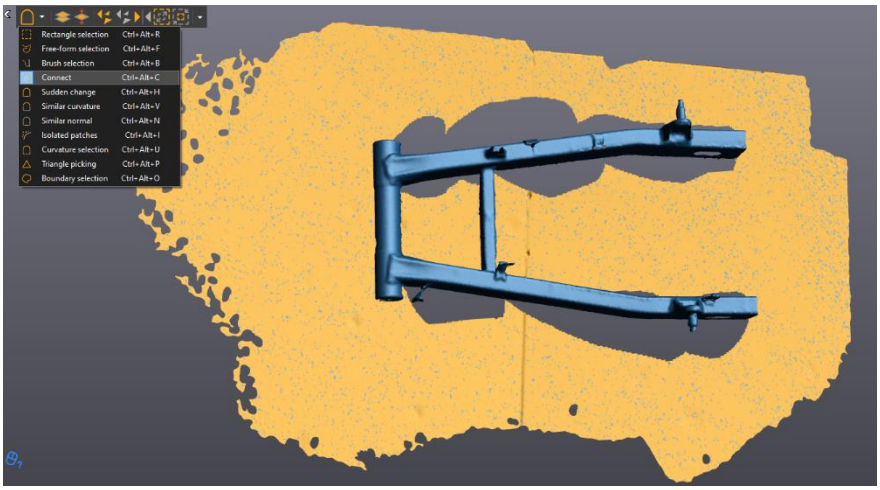


Ilustración 24 Uso de la herramienta "connect"

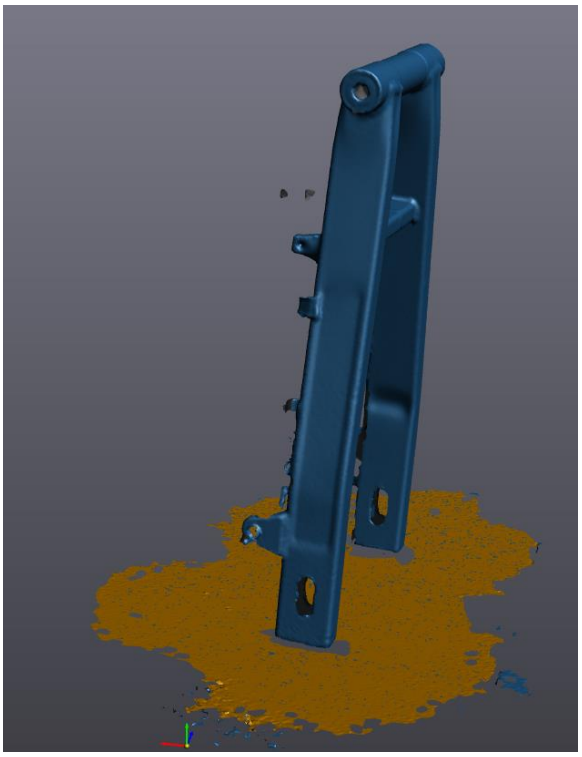


Ilustración 25 Eliminación de ruido en la malla

Una vez eliminado el ruido vinculado al suelo o plataforma, el paso siguiente consistió en limpiar los puntos aislados que se mantenían alejados de la pieza de interés. Estos puntos generalmente se producen por fallos habituales en el procedimiento de escaneo, tales como reflejos de la superficie del objeto, interferencias externas o áreas con escasa densidad de puntos. Estas anomalías no proporcionan datos valiosos al modelo y pueden impactar de manera adversa en las etapas subsiguientes del proyecto, como la optimización topológica o el diseño generativo.

Para resolverlo, se empleó la herramienta Isolated Patches, diseñada específicamente para identificar y eliminar automáticamente nubes de puntos pequeñas y desconectadas. Ajustando un tamaño límite definido por el usuario, el software detecta y elimina todos los fragmentos no deseados, dejando una malla más limpia, precisa y libre de ruido.

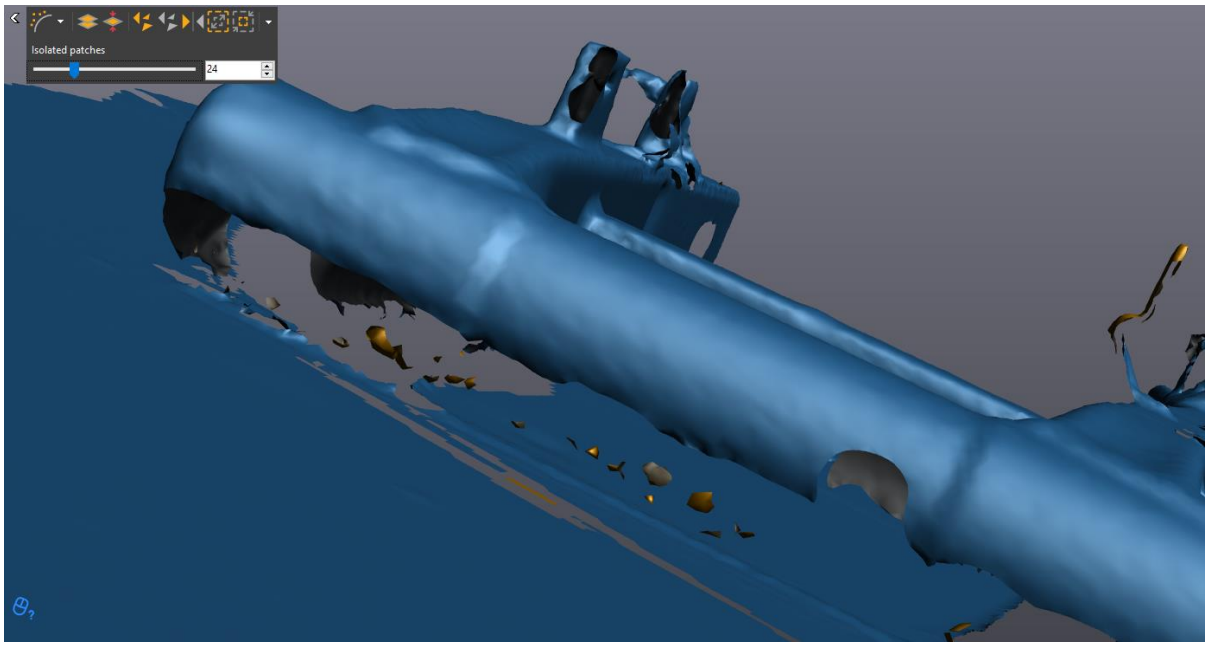


Ilustración 26 Herramienta de selección "Isolated patches"

Tras haber eliminado el ruido generado por la plataforma sobre la que se apoyaba el basculante, utilizando las herramientas Connect y Free Form Selection para intentar separar automáticamente la nube de puntos del suelo, y acto seguido eliminar el ruido adicional generado por puntos aislados desconectados de la pieza utilizando la herramienta Isolated Patches, las mallas resultantes quedaron completamente limpiadas y listas para ser fusionadas, con una representación precisa y libre de artefactos, tal como se muestra en las imágenes siguientes.

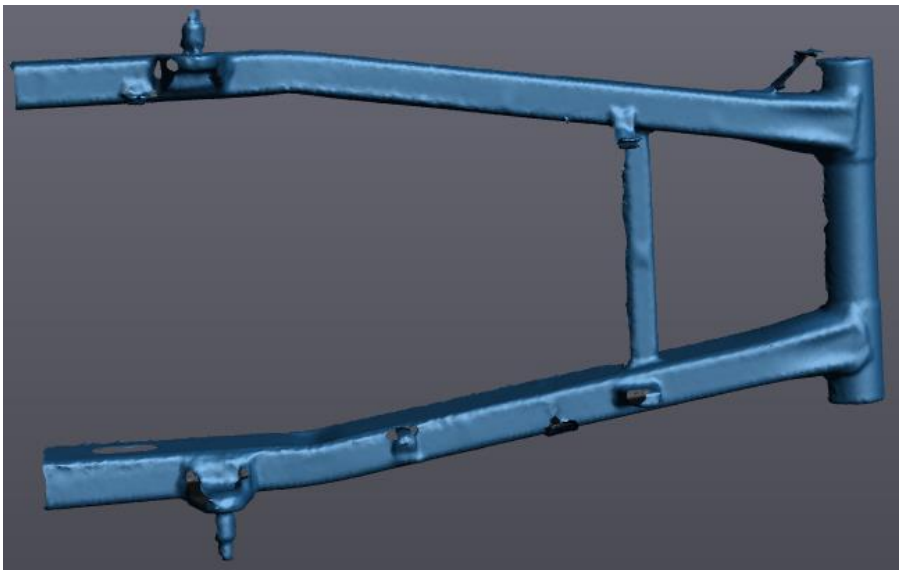


Ilustración 27 Resultado final malla 1

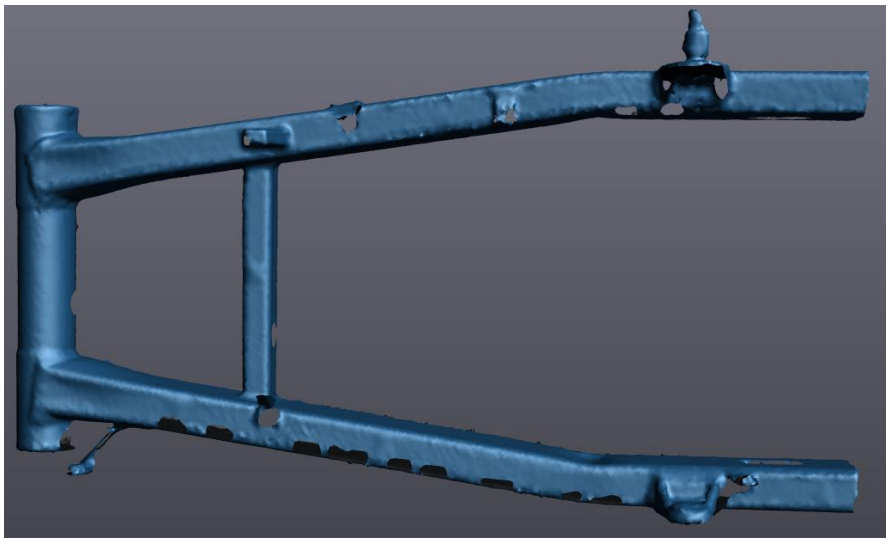


Ilustración 28 Resultado final malla 2

Ilustración 29 Resultado final malla 3

A continuación, se alinean cuidadosamente las mallas para que estén correctamente posicionadas en el espacio y facilite al programa identificar identidades similares entre sí. Durante este proceso, también se verifica la coherencia de las zonas de contacto entre mallas, eliminando posibles bordes superpuestos, y se optimiza la densidad de los polígonos si es necesario.

Con la herramienta “Best Fit”, se pre alinean las mallas una a una de manera automática en este caso, aunque a veces se deben alinear manualmente seleccionando e identificando puntos en común entre las dos mallas que se quieren alinear.

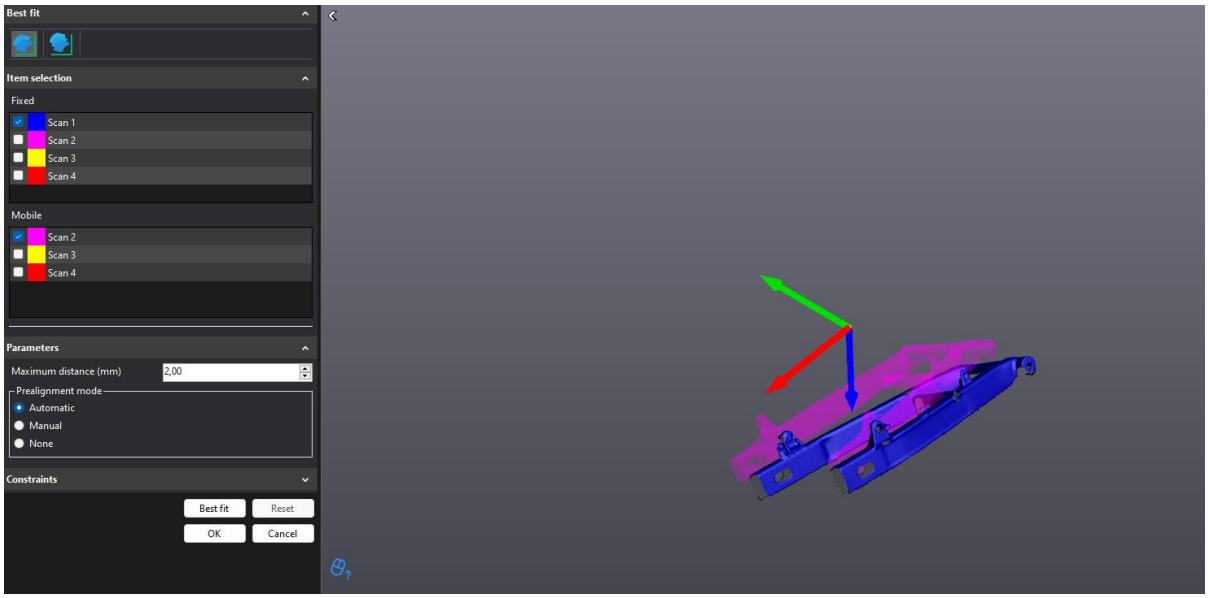


Ilustración 30 Uso de la herramienta "Best fit"

El siguiente paso implica unir las cuatro mallas independientes en un solo modelo tridimensional empleando VXmodel. Este procedimiento posibilita fusionar los datos recolectados desde los distintos ángulos de escaneo para crear una representación integral y constante del basculante. Esto se realiza de forma gradual, incorporando una malla simultáneamente con el modelo principal. Para lograrlo, se establece un límite máximo de desviación permisible, asegurando que las áreas entrelazadas entre mallas se fusionen con exactitud y sin generar alteraciones en el modelo final. En este proceso, automáticamente se cubren los pequeños espacios que puedan surgir en las zonas de unión, garantizando una superficie uniforme y continua.

Este paso es muy importante pues ofrece varias ventajas. Primero, se consigue un modelo integral y consistente que representa con exactitud toda la geometría del componente, incluso en las zonas que no lograron ser capturadas desde un solo punto de vista. Adicionalmente, este procedimiento suprime duplicados y mejora la densidad del modelo, disminuyendo el ruido en las áreas aisladas sin comprometer el detalle.

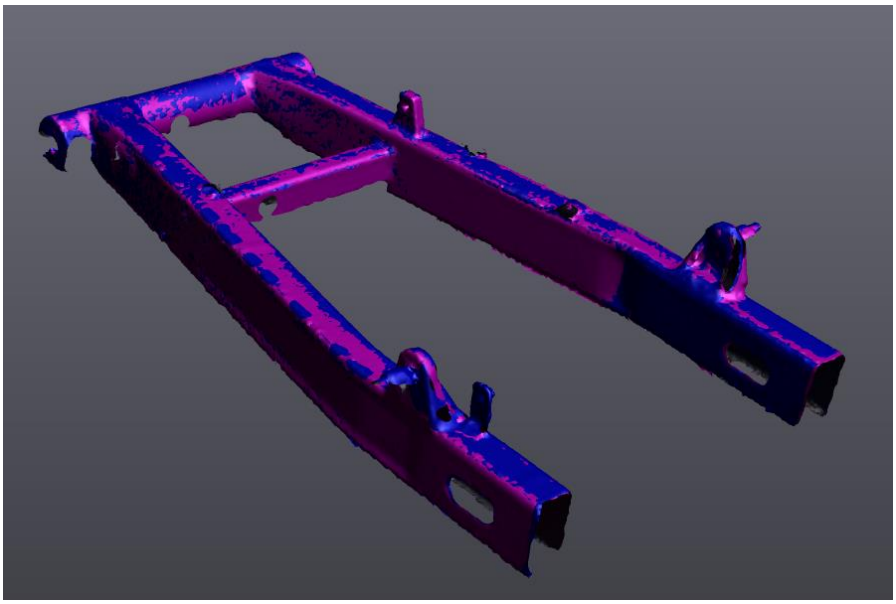


Ilustración 31 Unión mallas 1

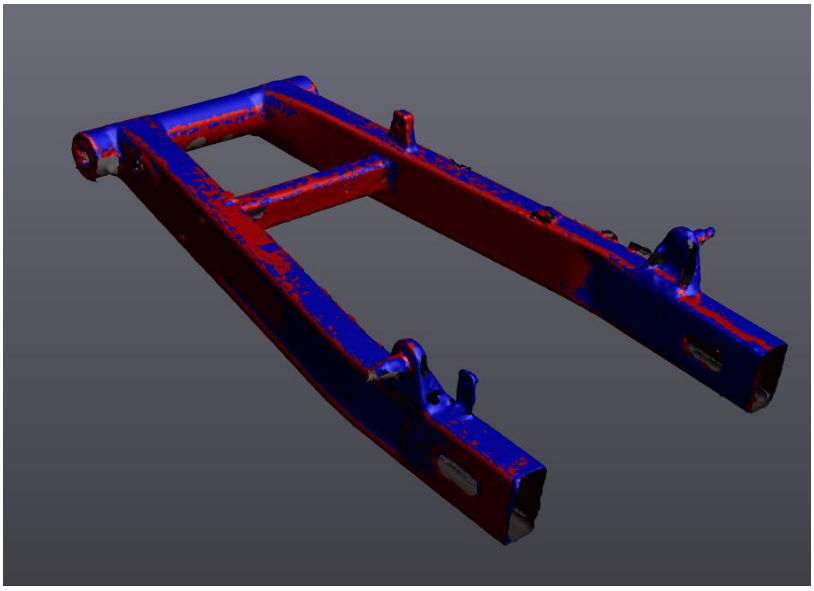


Ilustración 32 Unión mallas 2

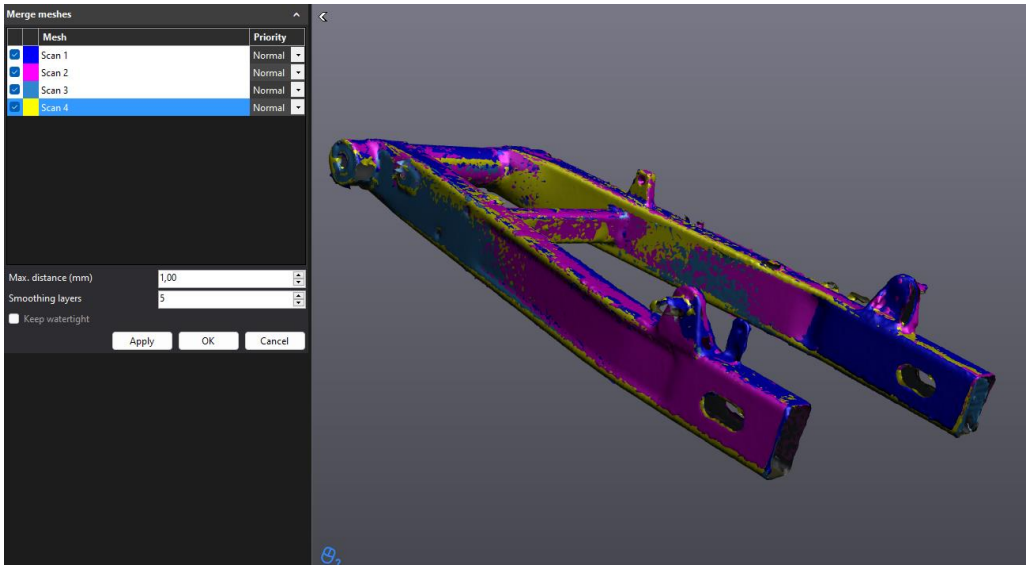


Ilustración 33 Unión final de todas las mallas

A pesar de que la herramienta de fusión en VXmodel garantiza una integración exacta, es común que ocurran pequeños fallos, como vacíos o discontinuidades en las áreas donde las mallas se entrelazan o se fusionan. Para resolver estos inconvenientes, el programa VXmodel ofrece una herramienta conocida como Fill Holes, creada específicamente para detectar y rectificar automáticamente estas anomalías. Esta aplicación identifica las lagunas existentes en el modelo, usualmente visibles como círculos abiertos o anomalías en la superficie. Una vez detectados, el usuario tiene la posibilidad de establecer los parámetros de relleno, lo que permite al software llenar estos espacios de forma exacta y sin modificar la geometría global del modelo.

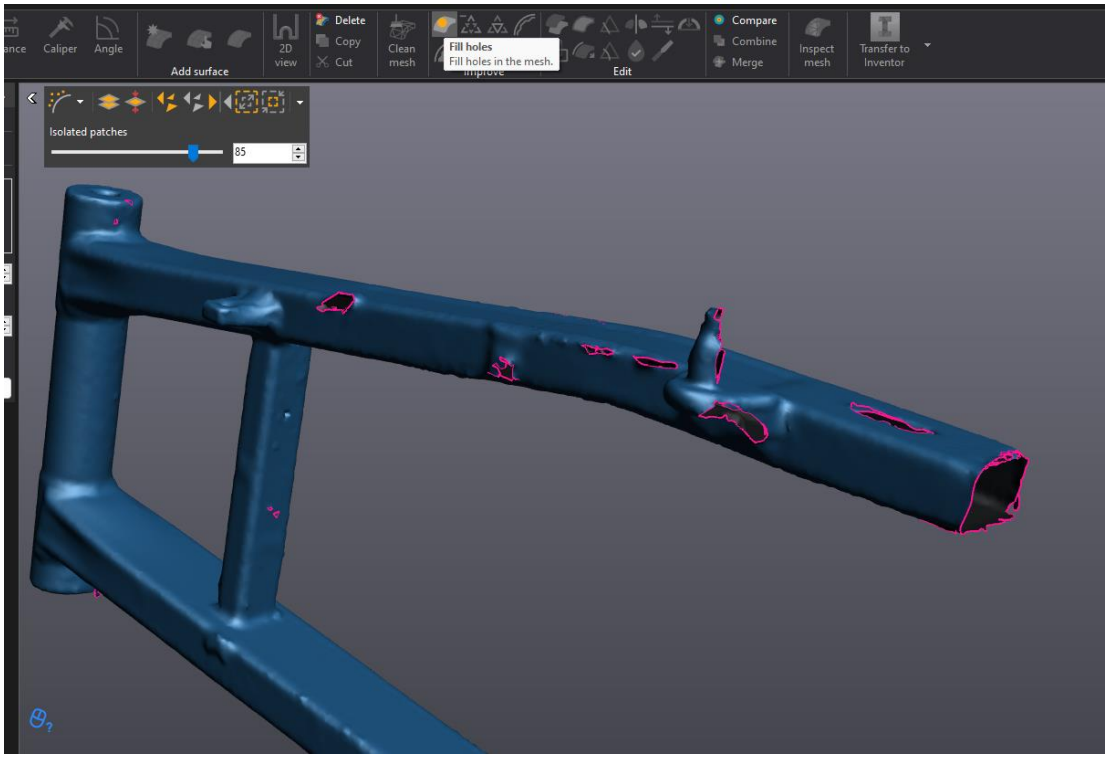


Ilustración 34 Detección de errores en la fusión de mallas

En ocasiones cuando las mallas no se han fusionado perfectamente hay zonas donde se superponen con cierta distancia entre ellas. Esto lo detecta VX como si se tratase de un agujero por lo que lo intenta rellanar creando superficies extrañas y erróneas como es el siguiente ejemplo:

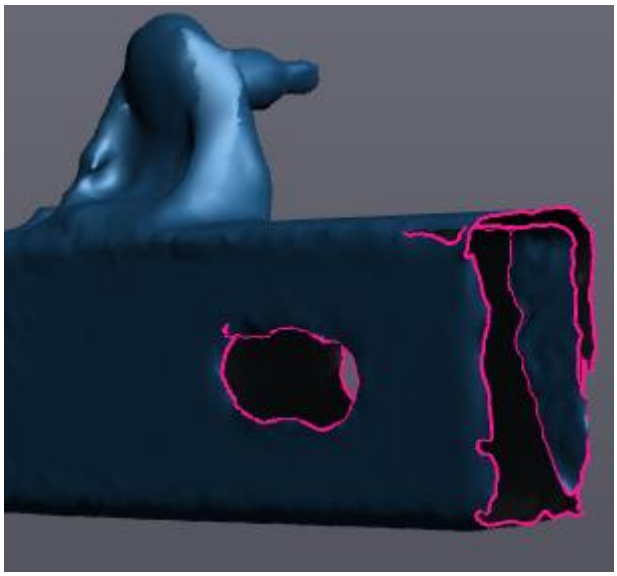


Ilustración 35 Error de solape entre mallas

En esta ocasión, VXmodel crea la superficie mostrada a continuación. Como se puede apreciar VX intenta cerrar un agujero compuesto por el final de la pieza y el hueco entre las mallas.

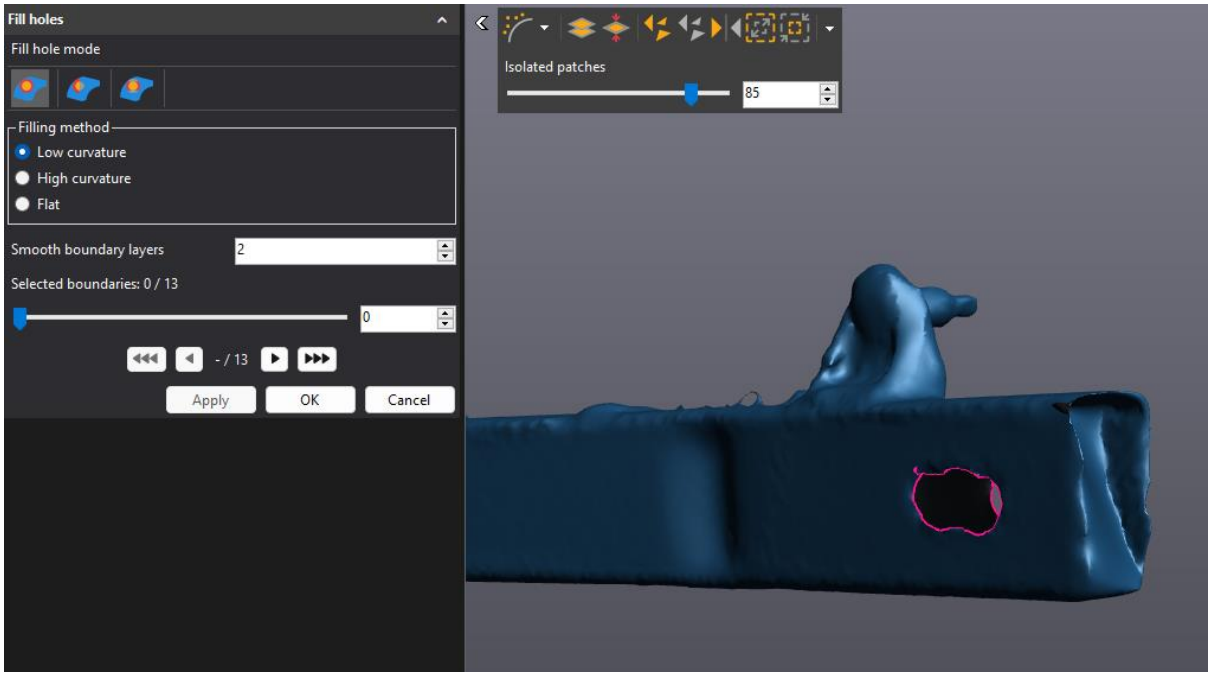


Ilustración 36 Uso de la herramienta "Fill holes"

Para solucionar este problema se vuelve a hacer uso de la herramienta free-form selection. Se comienza recortando la conexión entre la malla principal y los trozos residuales y se suprime. Una vez limpiada la malla de nuevo, se vuelve a intentar cerrar el agujero con Fill holes.

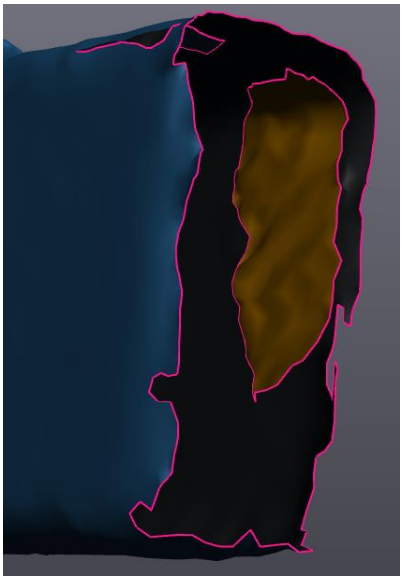


Ilustración 37 Seleccion de "Isolated patches"

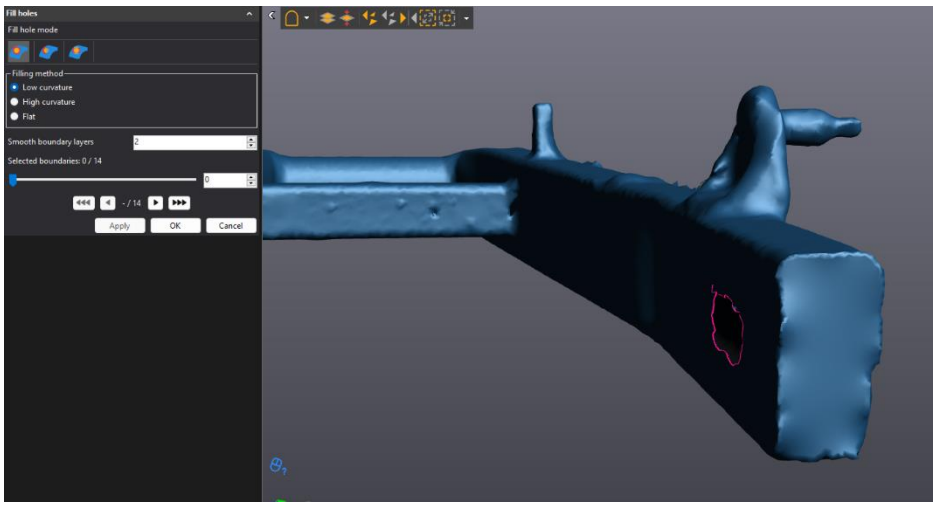


Ilustración 38 Ajuste de curvaturas

En la siguiente imagen se muestra otro fallo del programa a la hora de fusionar las mallas.

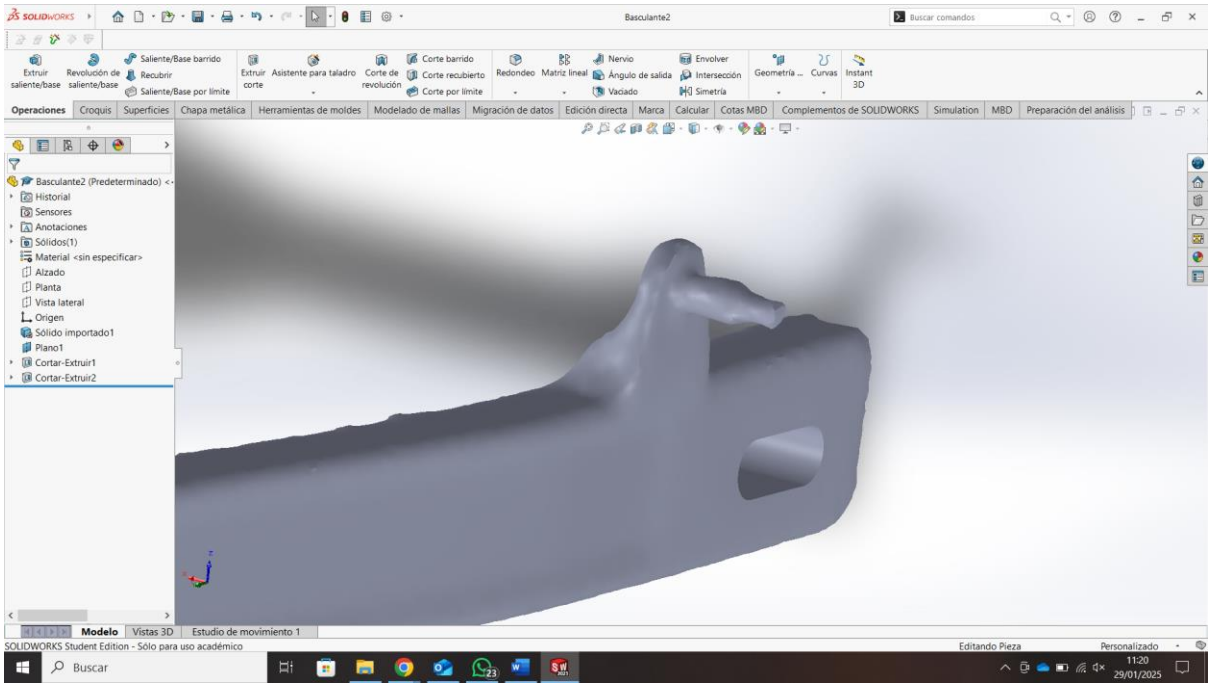


Ilustración 39 Importación de la malla a SolidWorks

5.2. Análisis estructural de basculantes de motocicletas

El basculante es un elemento esencial en la suspensión trasera de una motocicleta debido a que une la rueda trasera con el chasis y posibilita su desplazamiento vertical para absorber impactos y obtener estabilidad. Por lo tanto, su estructura debe asegurar un balance entre rigidez y peso. Para lograrlo, se utilizarán métodos de diseño generativo y análisis estático de la estructura, analizando su reacción en diferentes estados de carga. En este estudio se examinan dos circunstancias fundamentales: aceleración y paso por curva:

Aceleración

En condiciones de carga estática, el basculante soporta la distribución del peso combinado de la motocicleta y el piloto. Se estima que aproximadamente el 62% del peso total recae sobre la rueda trasera, dependiendo de la geometría de suspensión. En el caso de una motocicleta de

referencia con un peso total de 273 kg, esto se traduce en una fuerza de 1658.75 N aplicada en el punto de anclaje del amortiguador, con una inclinación de 60°.

Durante la aceleración, el basculante experimenta una fuerza adicional debido a la reacción del par motor transmitido a la rueda trasera mediante la cadena. Esta fuerza se calcula mediante la segunda ley de Newton donde la masa total de la motocicleta y el piloto es de 273 kg y la aceleración de cero a cien registrada es de 2.32 m/s² según la ficha técnica. De este modo se obtiene una fuerza longitudinal de 633.36 N. Este esfuerzo adicional se concentra en las zonas de fijación del eje trasero y del pivote del basculante.

Curva

Por otro lado, el comportamiento del basculante en curva es otro factor determinante en su diseño ya que cuando la motocicleta se inclina, la carga sobre cada lado del basculante varía significativamente. Se considera que el 70% del peso total se transfiere al lado interior de la curva, mientras que el 30% recae en el lado exterior, suponiendo un ángulo de inclinación de 40°. En una curva a la derecha, la carga en el eje derecho es de 2675.4 N y en el eje izquierdo de 802.62 N, generando una tensión máxima de 120.6 MPa y un factor de seguridad de 2.852.

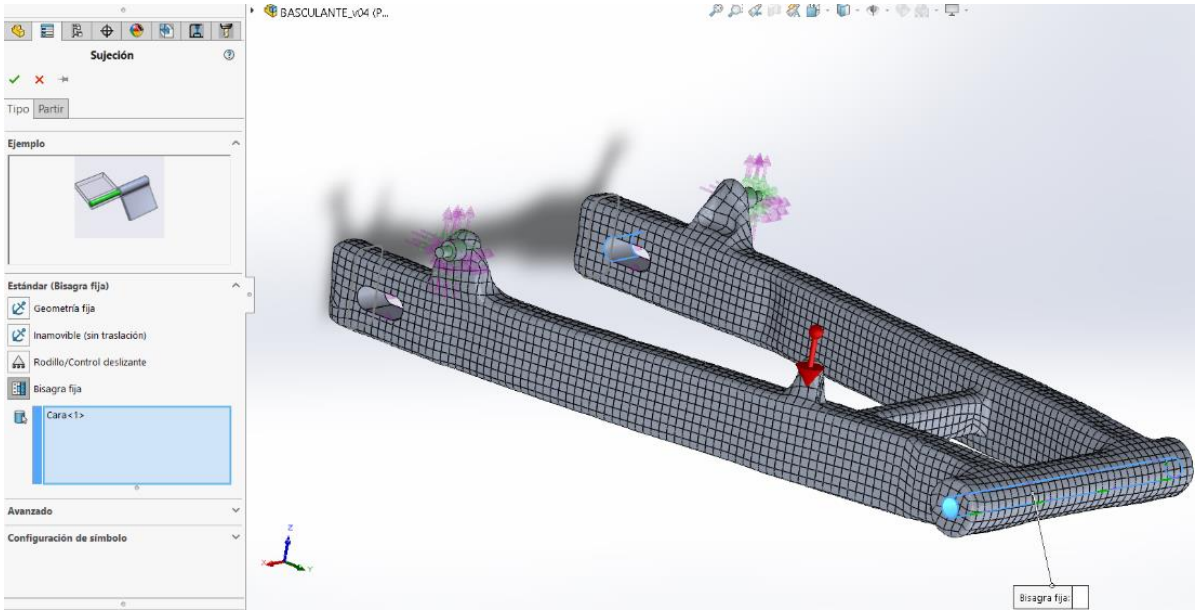


Ilustración 40 Condición de contorno de bisagra

En esta primera imagen se muestra la asignación de una condición de contorno denominada "Bisagra fija" a una de las superficies del modelo. Esta limitación se implementa en la región correspondiente al eje de rotación del basculante, donde éste se conecta al chasis de la motocicleta. Esta condición posibilita la rotación libre en torno al eje, no obstante, restringe el desplazamiento en las tres direcciones del espacio, emulando de esta manera el comportamiento auténtico de dicha unión.

Esta condición asegura que el modelo represente adecuadamente las condiciones de sujeción reales durante el proceso de simulación estructural. La utilización de una bisagra, en vez de una geometría completamente fija, tiene en cuenta el movimiento articulado del basculante, proporcionando una mayor fidelidad al análisis.

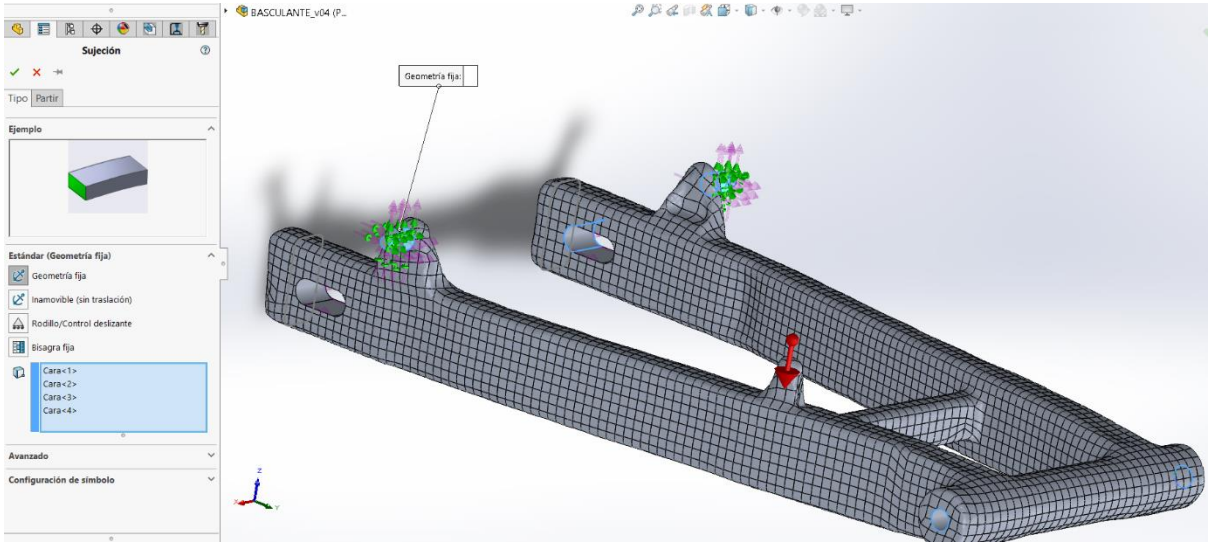


Ilustración 41 Condición de contorno de geometría fija

En esta imagen se observa la aplicación de una condición de "Geometría fija" sobre varias superficies del modelo, correspondientes a los puntos de anclaje del sistema de suspensión trasera. Esta condición de contorno obstaculiza cualquier desplazamiento o rotación en estas áreas, emulando el efecto de sujeción que la suspensión ejerce en dichos puntos. La sujeción de estas superficies facilita la obtención de un análisis estructural controlado, en el que las cargas se distribuyen de manera adecuada entre los apoyos.

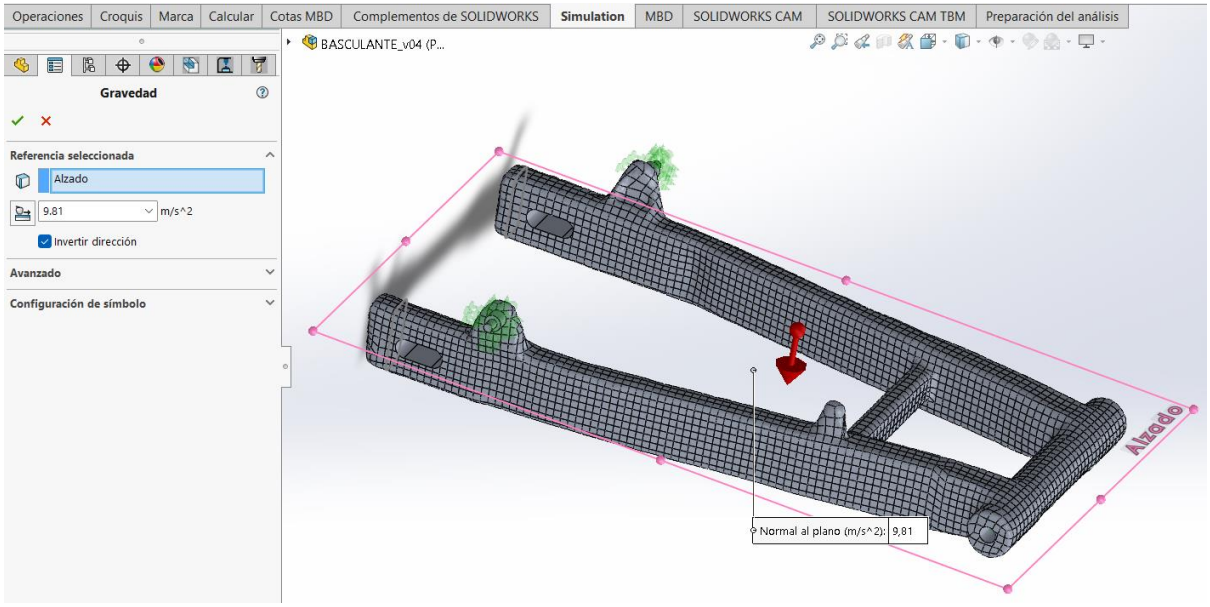


Ilustración 42 Condición de contorno de gravedad

En esta imagen se ha aplicado una carga de tipo “Gravedad” al conjunto del modelo. La dirección de la aceleración gravitatoria se define a partir del plano de referencia “Alzado” y se asigna un valor de 9,81 m/s². Además, se indica la inversión de dirección para que la fuerza actúe correctamente hacia abajo, en el eje Z negativo. De esta manera se representa el peso propio del basculante y de los componentes que soporta durante su funcionamiento.

A continuación, se representa la aplicación de una fuerza externa sobre la zona del eje de rueda trasera del basculante, correspondiente a las superficies de contacto del portaeje. Esta carga representa las fuerzas de reacción transmitidas por la rueda trasera al basculante durante el funcionamiento dinámico de la motocicleta. La fuerza aplicada tiene una magnitud total de 700 N, dirigida según el plano de referencia "Planta", y orientada normal a las superficies seleccionadas.

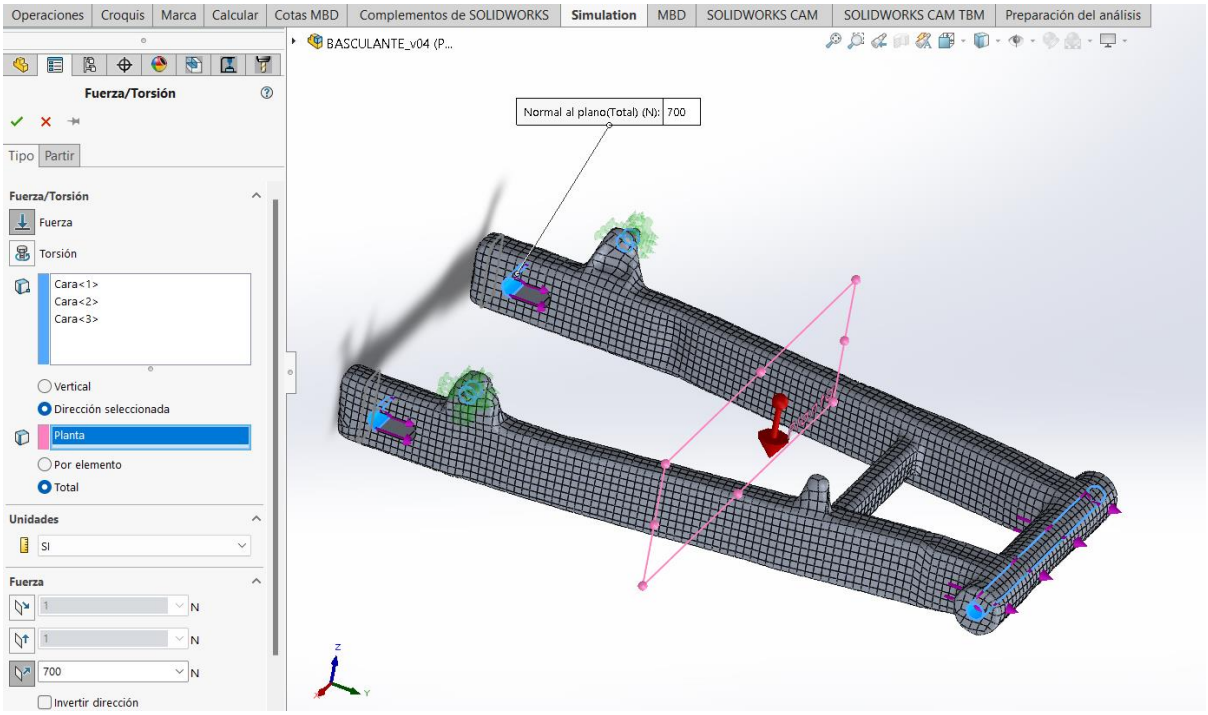


Ilustración 43 Fuerzas externas sobre basculante

Por último, se representa la aplicación del peso transmitido en el eje trasero, descompuesto en dos componentes vectoriales según la orientación del ángulo de la suspensión trasera. La fuerza total se distribuye en una componente normal al plano de aplicación de aproximadamente –1523,86 N, y una componente en la dirección Z de –487,70 N. En lugar de aplicar una única carga vertical, se tiene en cuenta la geometría del conjunto para reflejar con mayor precisión las condiciones reales de funcionamiento de la motocicleta durante la compresión del amortiguador o la carga estática.

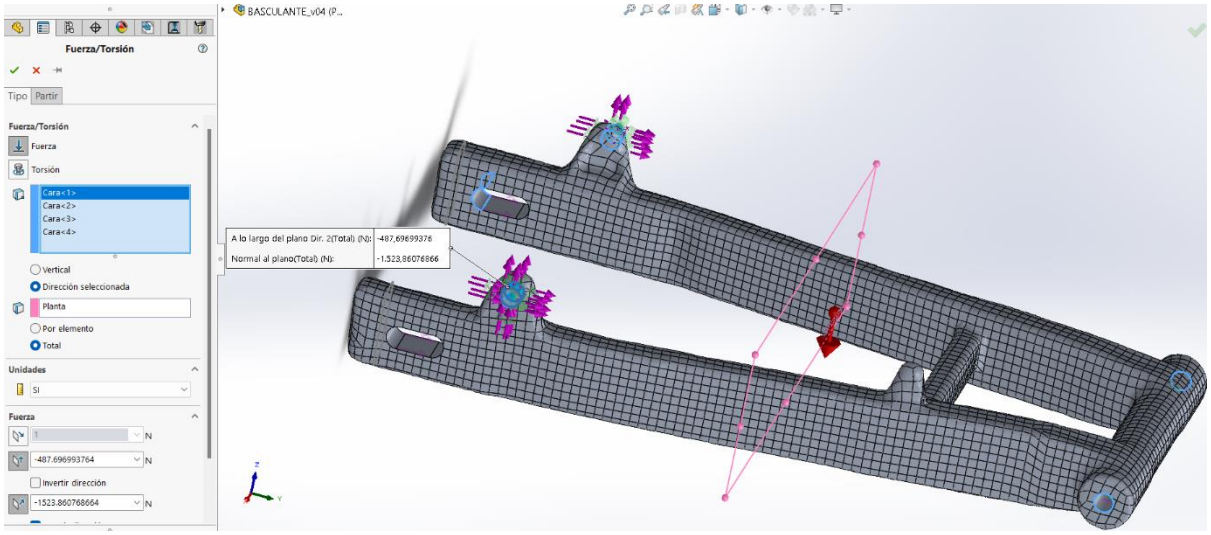


Ilustración 44 Descomposición del peso

Una vez se determinan todas las cargas y condiciones de contorno, se procede a generar una malla como se muestra en esta vista general del modelo mallado y todas las condiciones de contorno y cargas aplicadas.

Este paso sirve como validación visual previa a la ejecución de la simulación. Asegura que todas las condiciones físicas han sido correctamente establecidas, y que el modelo está listo para ser sometido a los cálculos de análisis estructural por elementos finitos.

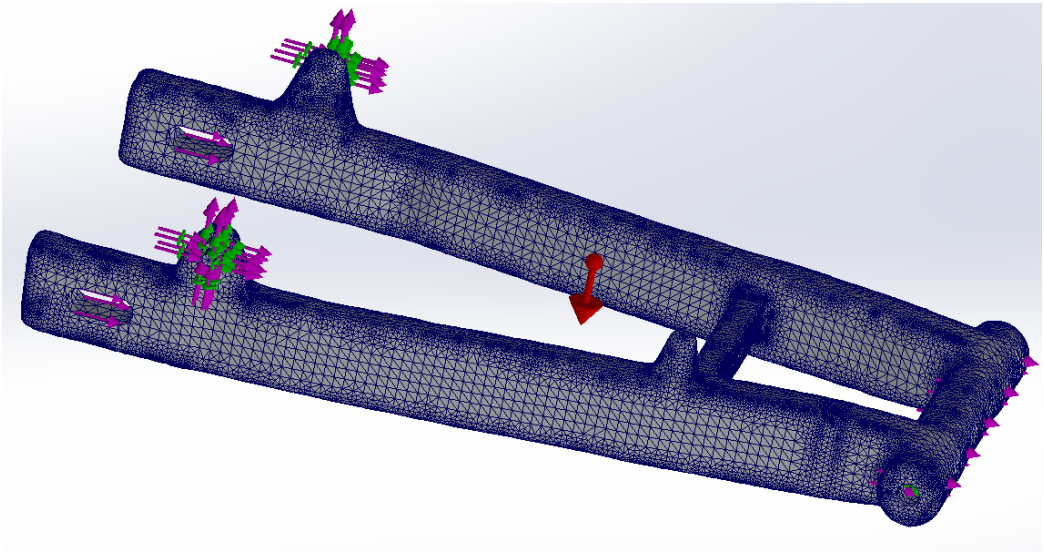


Ilustración 45 Inspección del mallado

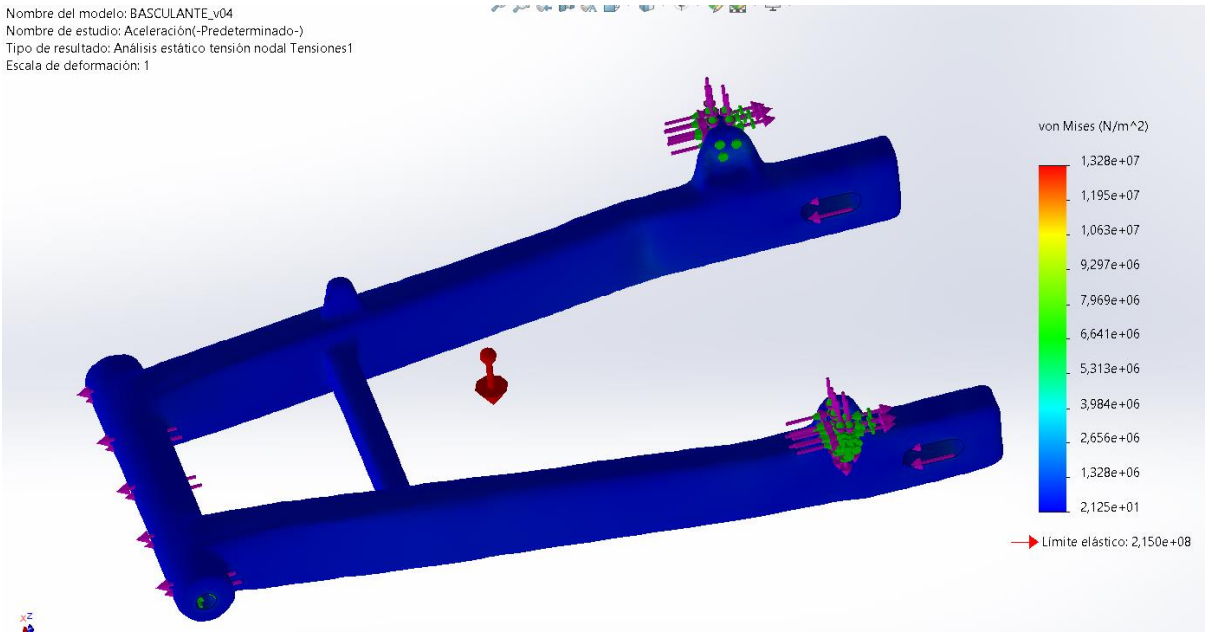


Ilustración 46 Tensiones de Von Mises

En esta figura se muestra el análisis de tensiones de Von Mises bajo las condiciones de carga en el momento crítico de aceleración. Los colores indican la magnitud de la tensión, con valores bajos en azul y más altos hacia el rojo y como se puede observar, las tensiones se mantienen

muy por debajo del límite elástico indicado (2,15e+08 N/m²), lo cual sugiere que el diseño esta sobredimensionado y soporta esta carga con un coeficiente de seguridad muy alto. Como también se puede observar en esta imagen, las zonas más solicitadas están cerca de los puntos de sujeción de la suspensión trasera.

La siguiente imagen, también perteneciente a la simulación del estado de aceleración, representa los desplazamientos totales del modelo. Aquí también se emplea una escala de colores donde el rojo indica mayores desplazamientos y el azul valores despreciables. Se observa un máximo desplazamiento de aproximadamente 7,5 mm. La deformación parece razonable y está concentrada en los extremos, lo cual tiene sentido.

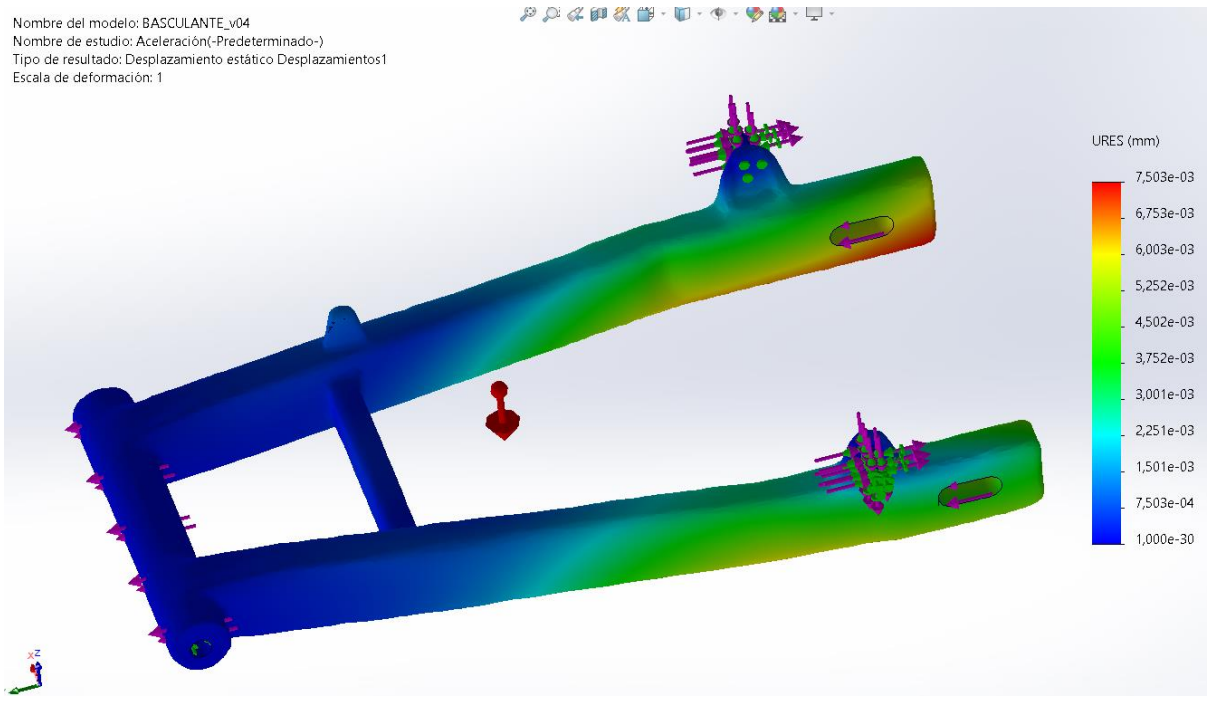


Ilustración 47 Análisis de desplazamientos

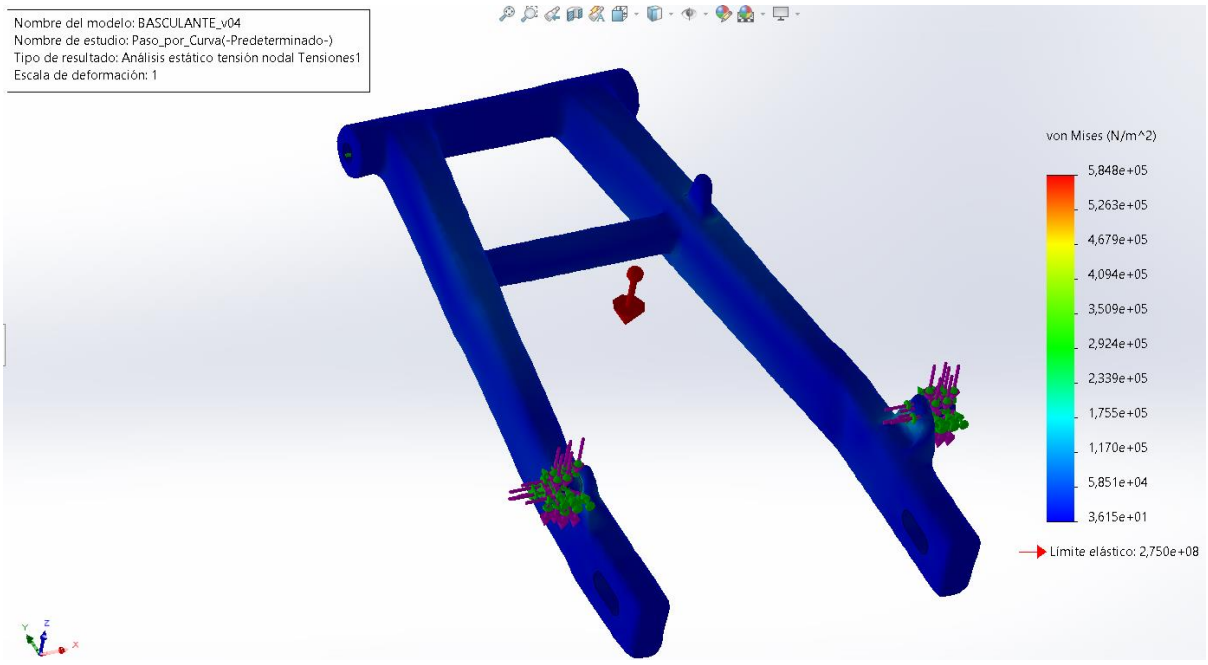


Ilustración 48 Tensiones en el paso por curva

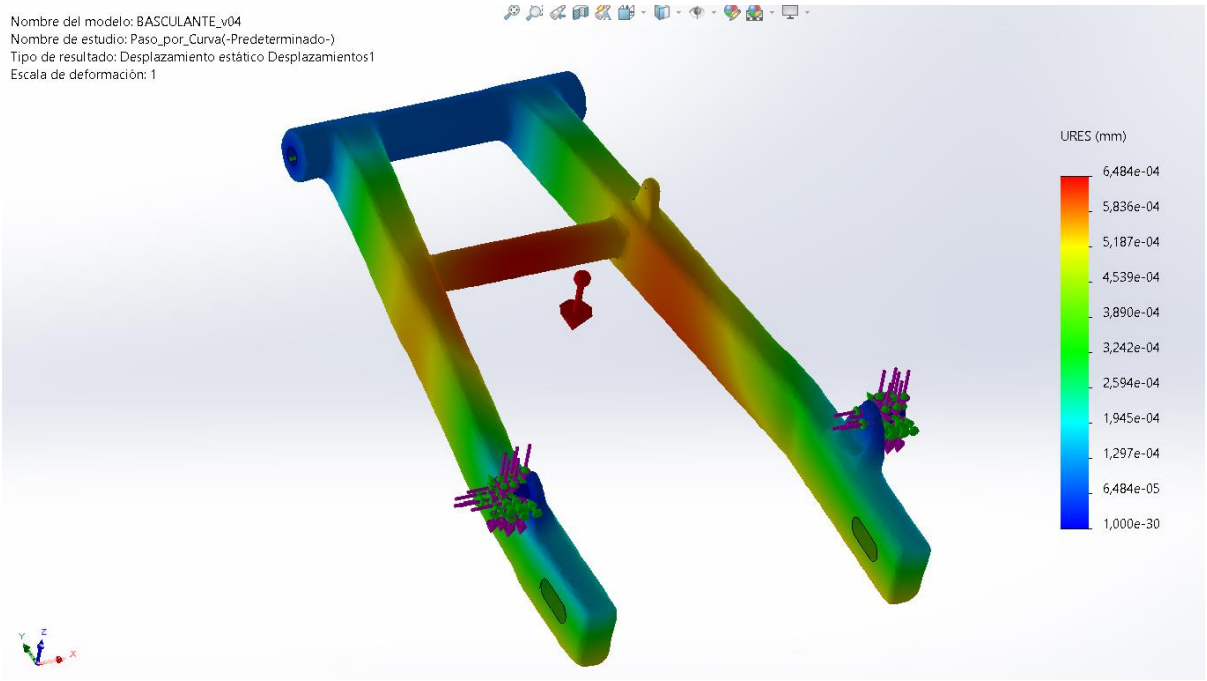


Ilustración 49 Desplazamientos en el paso por curva

Las dos imágenes de arriba corresponden al análisis por elementos finitos (FEA) del basculante bajo un escenario de carga que representa el paso por curva. Al igual que en el caso anterior de aceleración, se ha realizado un doble análisis: la primera imagen muestra el resultado en términos de tensiones de Von-Mises, mientras que la segunda representa los desplazamientos totales.

En el caso de tensiones (Ilustración 47), los valores alcanzan un máximo de aproximadamente 5,85e+05 N/m², muy por debajo del límite elástico del material, que se encuentra en 2,75e+08 N/m², lo que indica un comportamiento estructural holgado. Respecto al desplazamiento (ilustración 48), el valor máximo es de 6,48e-04 mm, lo cual es prácticamente despreciable.

Comparando este escenario con el caso de aceleración mostrado anteriormente, es evidente que el paso por curva representa una situación menos crítica tanto en términos de tensiones como de deformaciones. En el análisis de aceleración se alcanzaban tensiones diez veces mayores y desplazamientos de mayor orden. Por lo tanto, el estado de carga por aceleración impone condiciones estructurales más exigentes y se considerar como el caso de diseño más crítico de cara a la realización de la optimización topológica.

5.3. Aplicación de optimización topológica para reducción de peso

Tras el análisis estructural del basculante y la validación de su comportamiento frente a los distintos escenarios de carga, se procede a aplicar técnicas de optimización topológica con el objetivo de reducir su masa manteniendo los niveles de rigidez y resistencia necesarios. Esta fase del estudio busca obtener una geometría más eficiente desde el punto de vista estructural y más ligera, optimizando el uso de material sin comprometer la seguridad y funcionalidad del componente.

En la imagen se muestra la ventana de configuración del estudio de optimización. Se comienza por una reducción de masa pequeña para estudiar el comportamiento de la malla y el programa. A continuación, se itera con los parámetros hasta obtener una configuración de los mismos que reduzca el peso al máximo. En el caso de esta imagen se establece una reducción de masa del

50 %, pasando de una masa original de 6,340 kg a una masa objetivo de 3,170 kg. El tamaño de vóxel utilizado es de 2,25 mm, lo que ofrece una resolución adecuada para capturar detalles relevantes sin generar un coste computacional excesivo. Aunque no se ha especificado un factor de seguridad adicional, el análisis considera como esfuerzo límite el límite elástico del material, 275,790 MPa, garantizando que la solución propuesta no supere la resistencia admisible.

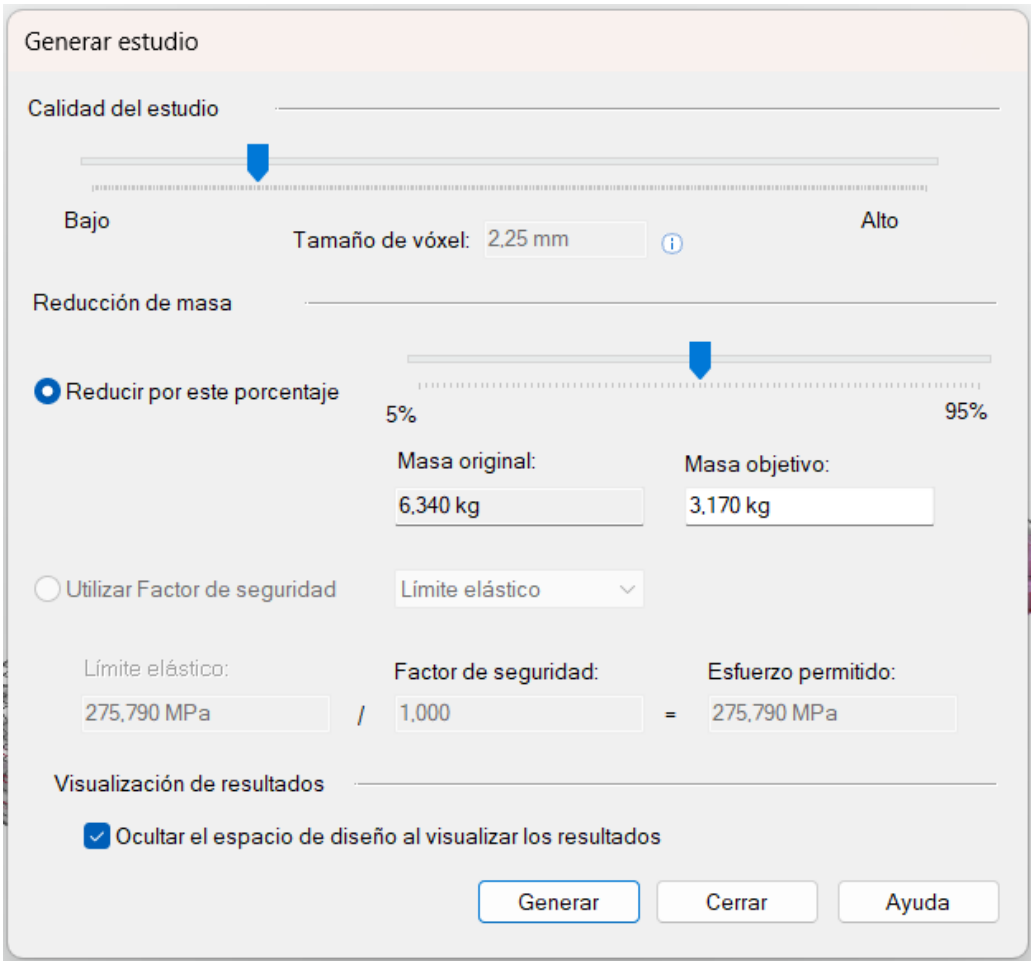


Ilustración 50 Parámetros de la optimización

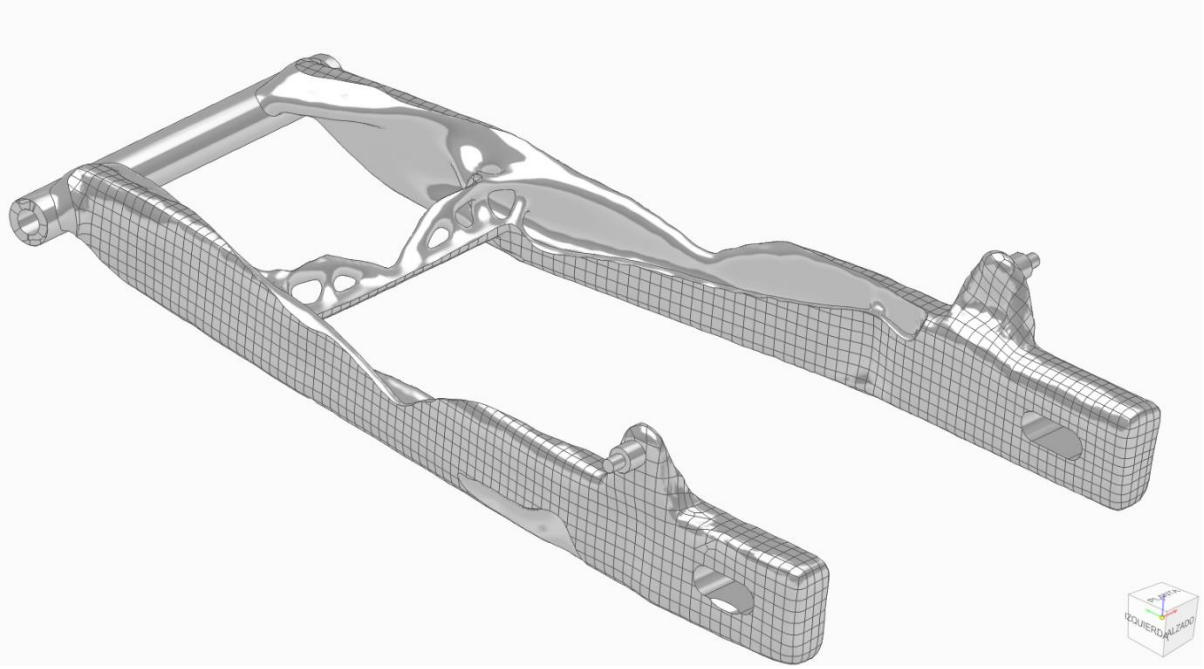


Ilustración 51 Iteración 1

Una vez configurado el estudio y tras una primera fase exploratoria con objetivos de reducción de masa conservadores, se procede a realizar múltiples iteraciones con distintas condiciones de contorno y ajustes geométricos. En la imagen superior se muestra una de las primeras soluciones propuestas por el algoritmo generativo. A pesar de cumplir con los objetivos de aligeramiento, el diseño presenta irregularidades en la zona superior del brazo que invaden parcialmente regiones que deben preservarse por motivos funcionales, como el paso de elementos de suspensión o el recorrido de la cadena.

En la segunda iteración, representada en la imagen inferior, se aprecia una solución mucho más afinada. El algoritmo respeta adecuadamente las regiones no modificables (como los anclajes y los alojamientos de ejes. El material se concentra únicamente donde se requiere para resistir cargas y transmitir esfuerzos, y las cavidades internas y formas orgánicas propuestas podrían ser fácilmente adaptadas para procesos de fabricación aditiva o incluso mediante mecanizado CNC.

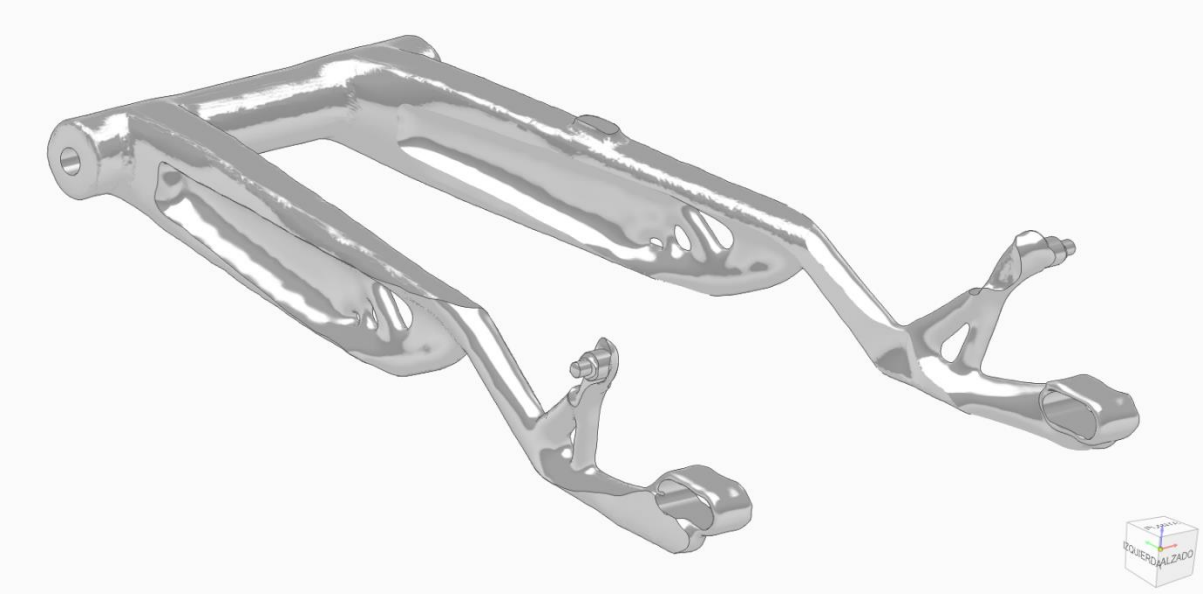


Ilustración 52 Iteración 2

En las siguientes iteraciones del proceso generativo se aprecia una evolución clara hacia geometrías más refinadas y funcionales. En la tercera imagen se observa una propuesta con una estructura interna reticulada más definida, que mejora la distribución de material en zonas clave, especialmente en los brazos laterales. Sin embargo, a pesar de su eficiencia estructural, este diseño presenta volúmenes flotantes y zonas poco conectadas que dificultan su fabricación, por lo que tampoco fue seleccionado como versión final.

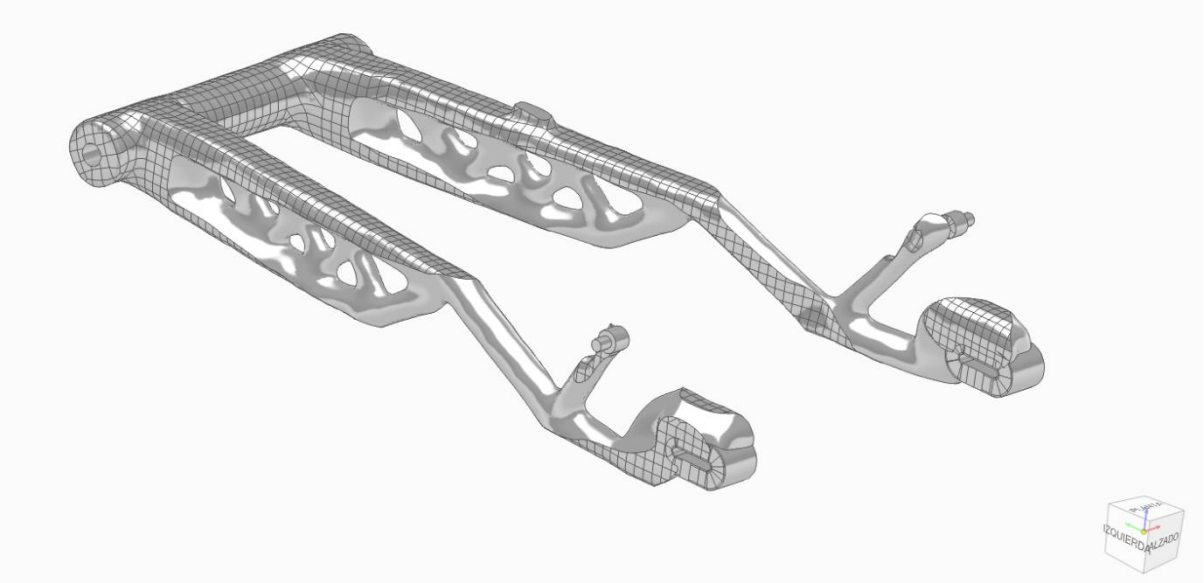


Ilustración 53 iteración 3

Finalmente, en la cuarta iteración se alcanza una solución que representa el compromiso óptimo entre aligeramiento de masa, funcionalidad y factibilidad de fabricación. En esta versión, el diseño respeta de manera estricta las regiones a preservar, mantiene una geometría continua y bien conectada, y presenta una distribución de material muy eficiente. Se observan estructuras trianguladas internas que aportan rigidez sin añadir peso innecesario, y el diseño general se adapta de forma coherente a las cargas previstas.

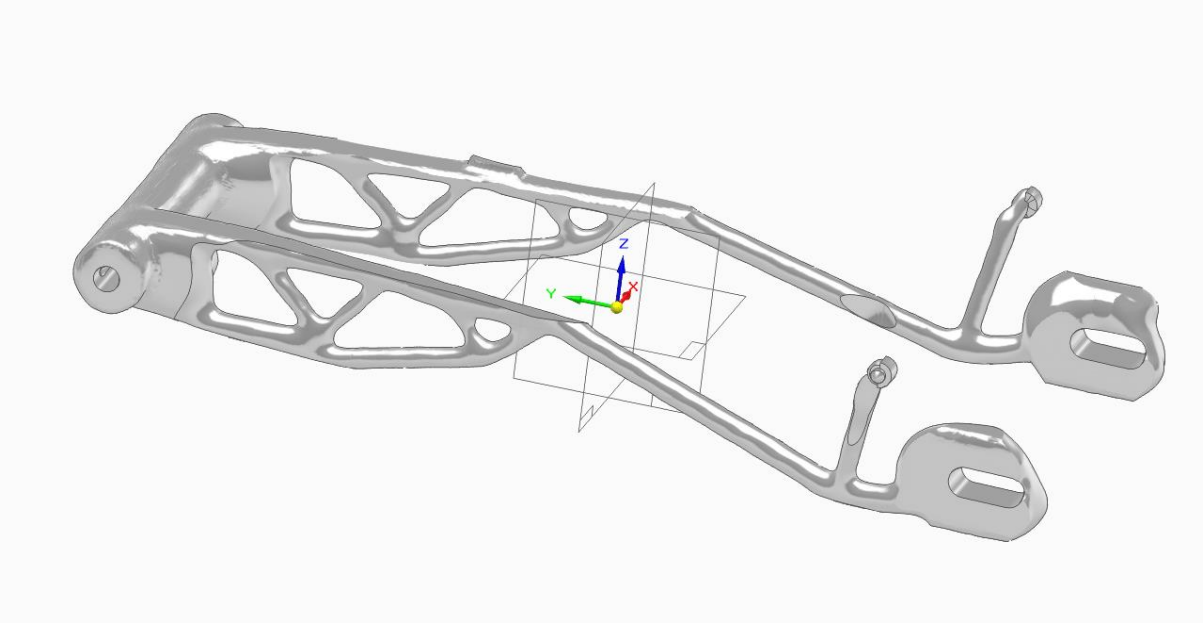


Ilustración 54 Iteración 4

Cabe destacar que, tras esta cuarta iteración, las siguientes configuraciones empiezan a mostrar un comportamiento errático. Las geometrías generadas tienden a perder continuidad estructural o a invadir zonas que deben permanecer libres, lo que indica que se ha alcanzado un límite funcional en la optimización bajo las condiciones impuestas.

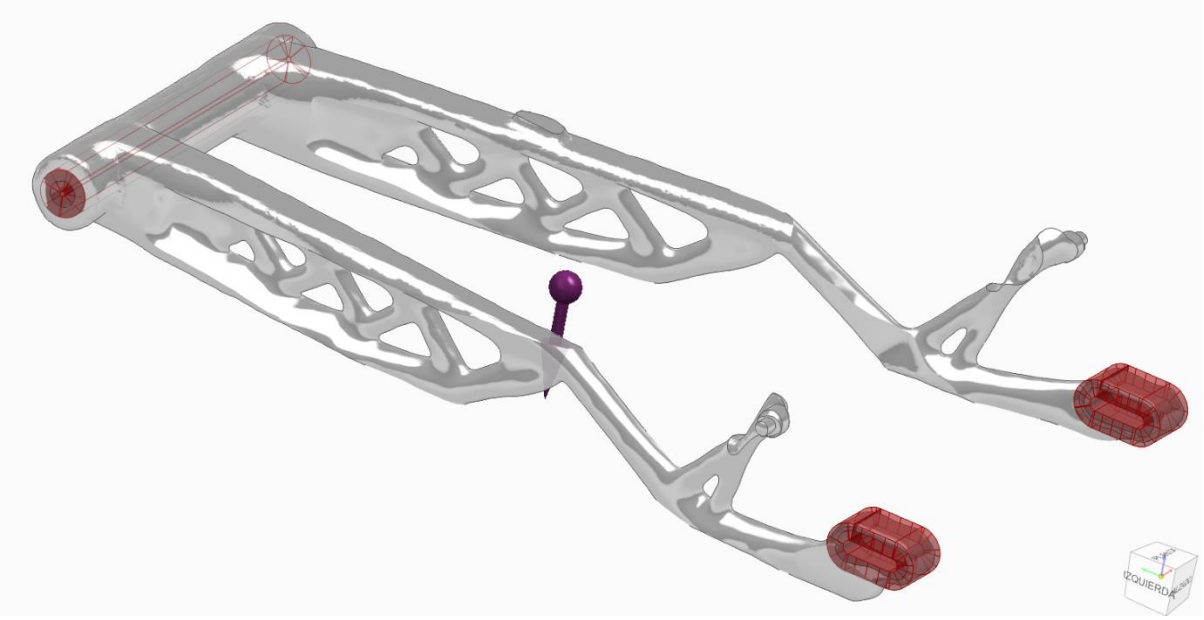


Ilustración 55 Diseño final de la optimización topológica

Una vez identificado el diseño óptimo, se procede a validar su comportamiento estructural utilizando exactamente la misma configuración de simulación que fue aplicada previamente al modelo original. De este modo, es posible comparar directamente las tensiones, desplazamientos y concentraciones de carga, verificando si la geometría optimizada mantiene (o incluso mejora) los niveles de seguridad y rigidez exigidos. Este paso resulta fundamental para asegurar que el modelo generado no solo es más ligero, sino que sigue cumpliendo con todos los requisitos funcionales del basculante.

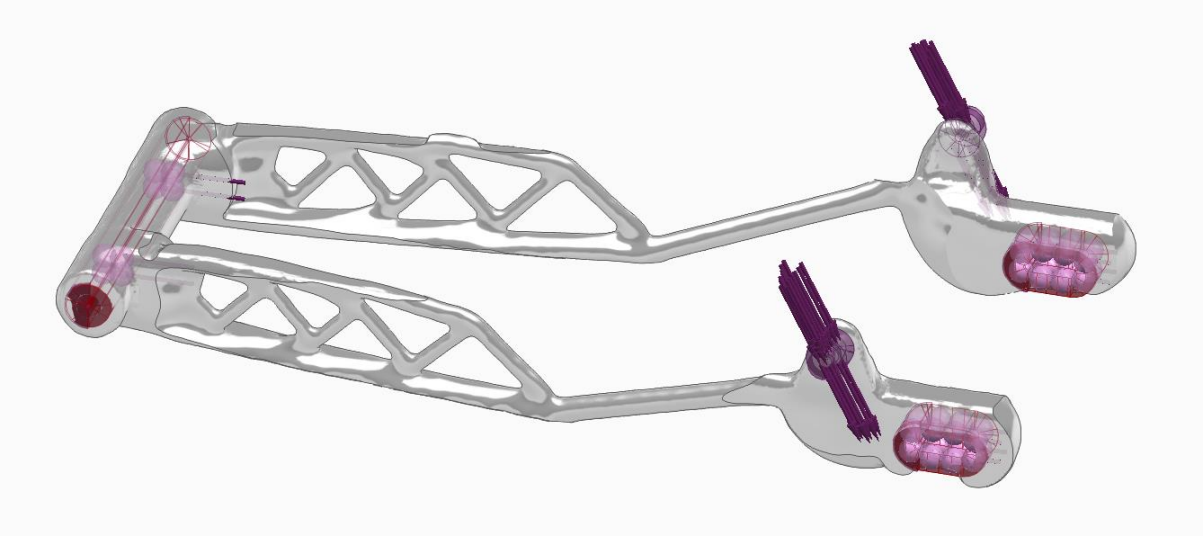


Ilustración 56 Estado de cargas para validación del nuevo diseño

5.4. Validación estructural mediante análisis FEA (Finite Element Analysis)

Una vez definida la geometría final obtenida mediante la cuarta iteración del proceso de optimización topológica, se procede a su validación estructural bajo las mismas condiciones de contorno, materiales y cargas utilizadas en el modelo original. De este modo se evalúa si el nuevo diseño cumple con los requisitos mecánicos sin comprometer su integridad estructural ni funcionalidad.

En la primera imagen se representa el estado tensional del modelo optimizado bajo carga vertical. La escala de colores muestra que las tensiones máximas se concentran en la zona inferior del alojamiento del eje trasero. El valor más alto registrado es de 276 MPa, exactamente en el límite elástico del material, lo cual indica que el diseño ha sido llevado al máximo de su capacidad sin superar el umbral admisible, lo que denota un uso extremadamente eficiente del material.

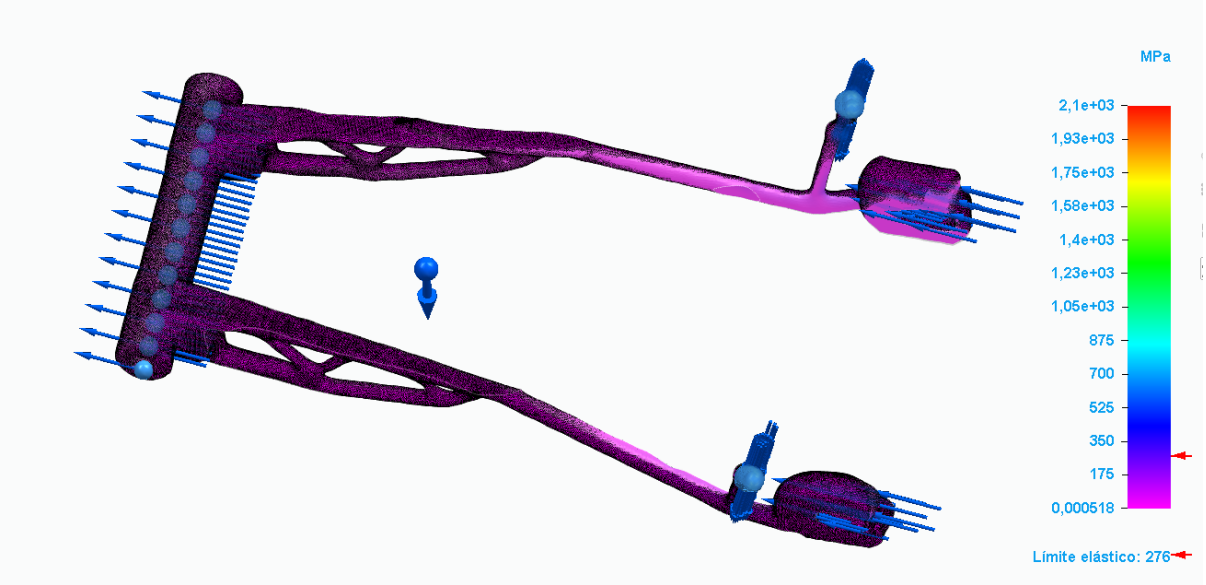


Ilustración 57 Tensiones de Von-Mises de la nueva geometría

La segunda imagen corresponde al mapa de desplazamientos. El valor máximo de desplazamiento vertical es de aproximadamente 1,7 mm, lo que se encuentra dentro de los límites aceptables y es comparable al comportamiento del modelo original, confirmando que la rigidez estructural no se ha visto comprometida pese a la considerable reducción de masa.

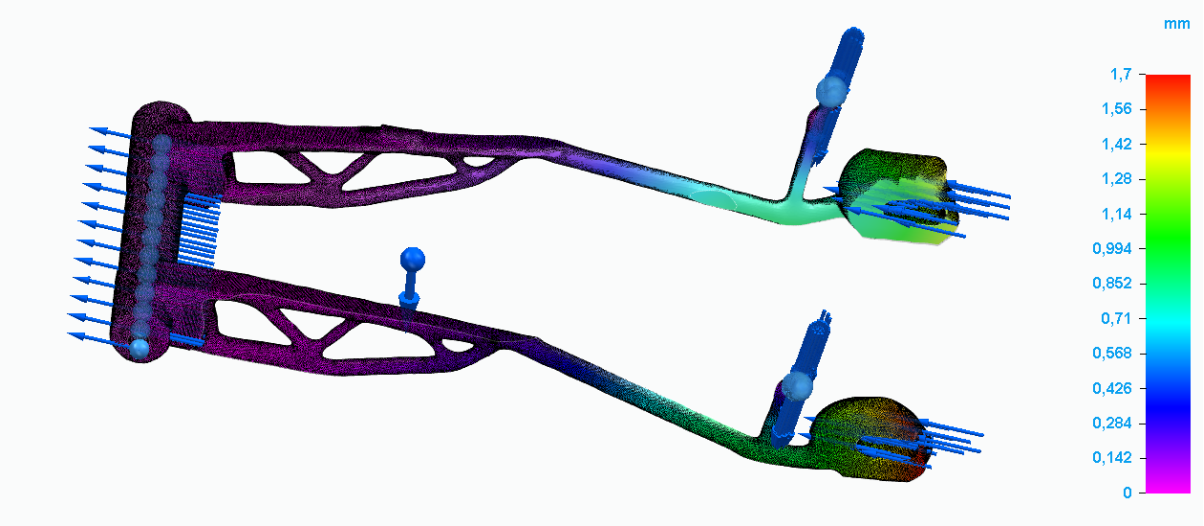


Ilustración 58 Análisis de desplazamientos

Por último, en la tercera imagen se realiza una ampliación en la zona crítica donde se localiza la máxima tensión. Esta vista detallada permite confirmar que, aunque se alcanza el límite elástico, no se superan valores peligrosos y la tensión se distribuye de forma progresiva, sin concentraciones abruptas que pudieran derivar en una falla prematura. La forma orgánica generada por la optimización contribuye a esta distribución favorable.

En conjunto, la simulación confirma que el diseño optimizado mantiene las prestaciones estructurales del modelo original, permitiendo una reducción del 50 % de la masa sin comprometer la seguridad. Esto valida el uso de la optimización topológica como herramienta eficaz para el rediseño de componentes estructurales en motocicletas.

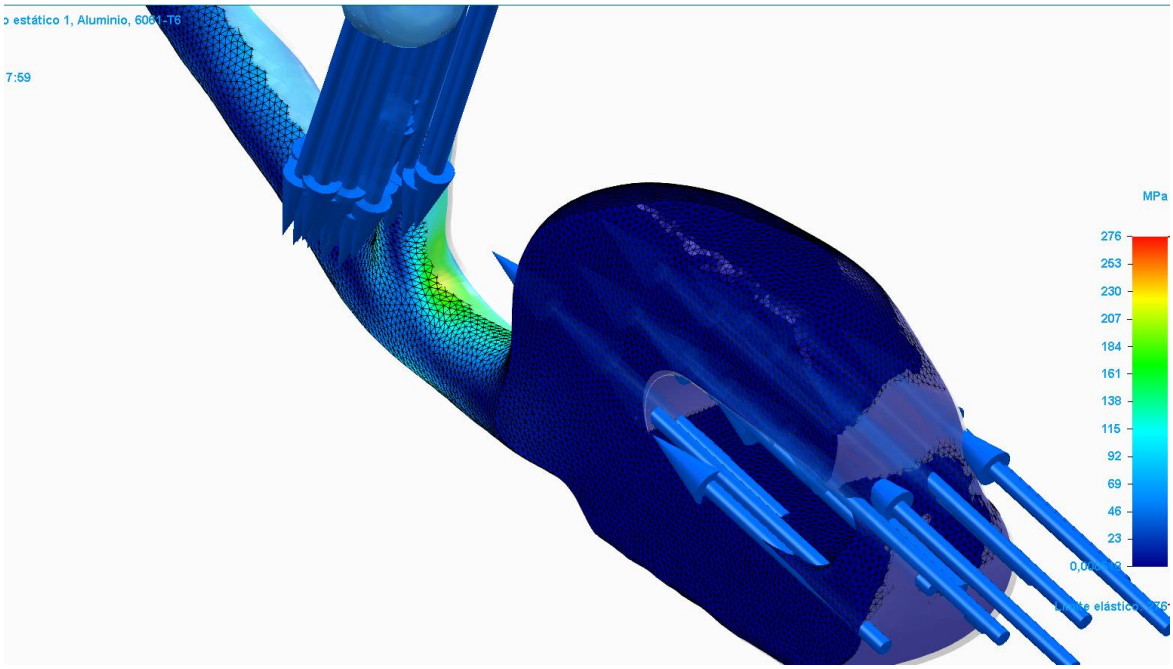


Ilustración 59 Ampliación del punto crítico

5.5. Postprocesado de la geometría mediante Altair

Una vez finalizado el proceso de optimización topológica y obtenida la geometría resultante, es necesario llevar a cabo un postprocesado que permita transformar dicha geometría en un modelo viable desde el punto de vista del diseño técnico y de su fabricación. Las geometrías optimizadas generadas por algoritmos CAD como SolidEdge están compuestas por mallas irregulares de aspecto orgánico, difíciles de modificar o utilizar directamente en entornos CAD. En este contexto, Altair Inspire ofrece una herramienta específica denominada PolyNURBS, que permite reconstruir la forma optimizada mediante superficies suaves y editables basadas en tecnología NURBS (Non-Uniform Rational B-Splines).

5.4. Suavizado de la pieza optimizada

El siguiente apartado describe el procedimiento seguido para convertir la geometría generada en el proceso de optimización topológica en un modelo CAD funcional mediante el uso de PolyNURBS de manera automática y manual en Altair Inspire.

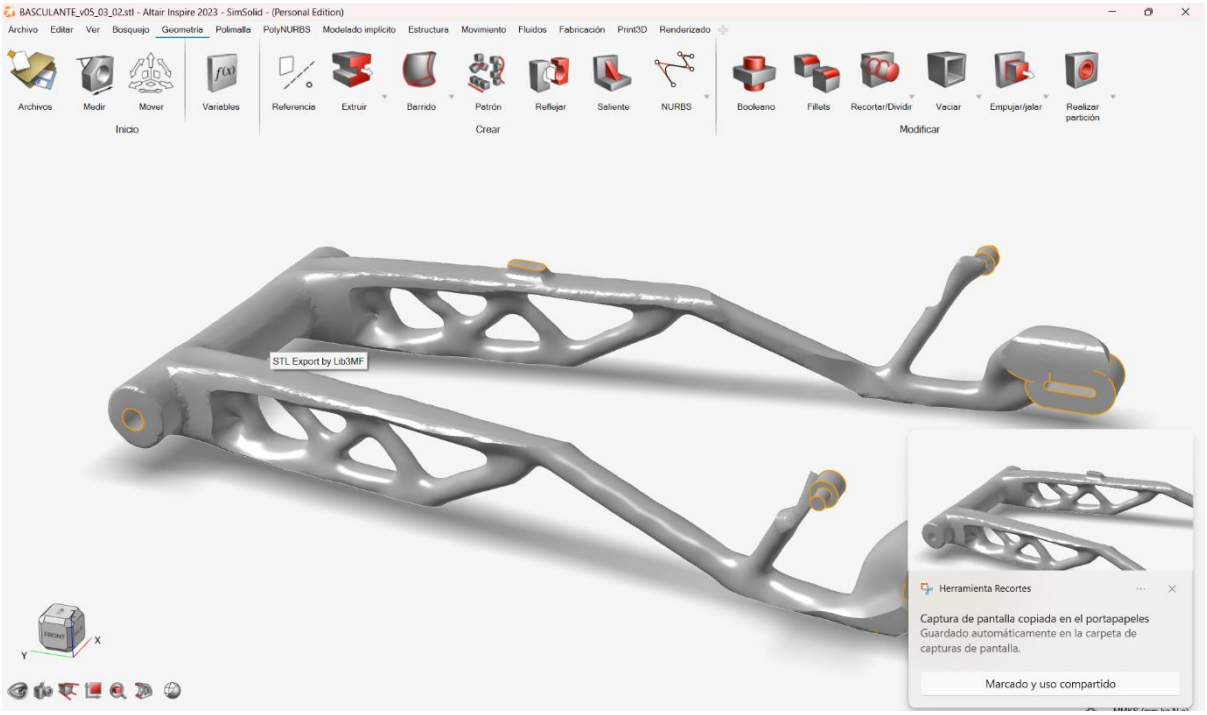


Ilustración 60 Importación de la geometría optimizada a Altair Inspire

En primer lugar, se importa el archivo en formato .STEP a Altair Inspire como se muestra en la imagen superior. En ella se puede apreciar que la geometría tiene un aspecto orgánico, compuesta por aristas irregulares y superficies rugosas. Esta geometría refleja la distribución ideal resultante del análisis estructural y de la optimización topológica. En contrapartida esta no es válida para su uso directo en procesos de fabricación.

A continuación, se intenta realizar una conversión automática a directa de la malla optimizada a geometría PolyNURBS. Sin embargo, como se puede apreciar en la imagen, el proceso no es exitoso. El resultado es una geometría que presenta múltiples esquinas angulosas y bordes afilados que no corresponden al diseño previsto.

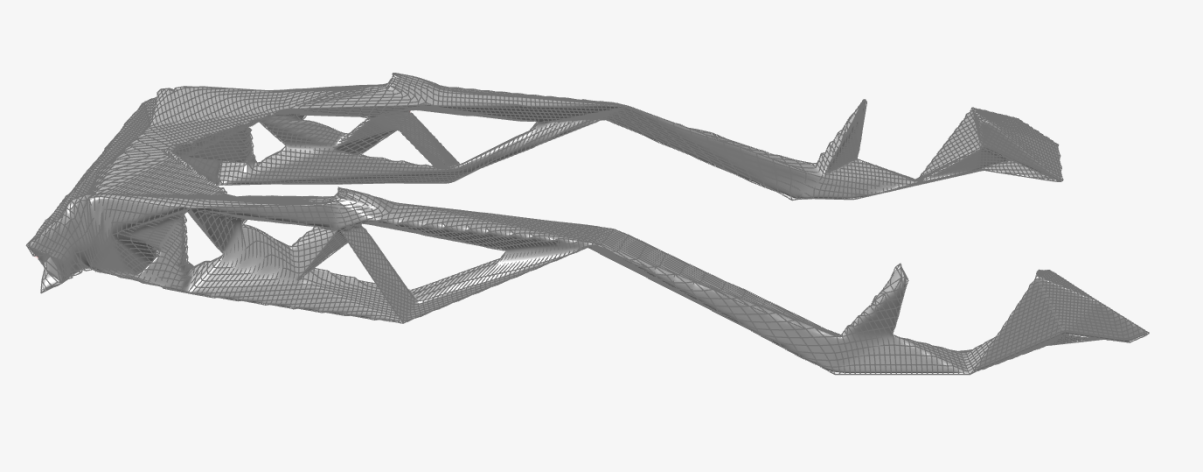


Ilustración 61 Intento de conversión automática

Por lo tanto, se procede a realizar una reconstrucción mediante herramientas manuales como "Primitiva", "Ajustar" y "Envolver". El proceso consiste en ir aproximando volúmenes básicos a las zonas de la malla y extruir dichos volúmenes. El inconveniente de dicho método es que Altair no detecta las superficies a preservar por lo que se deberán comprobar una vez terminado el proceso.

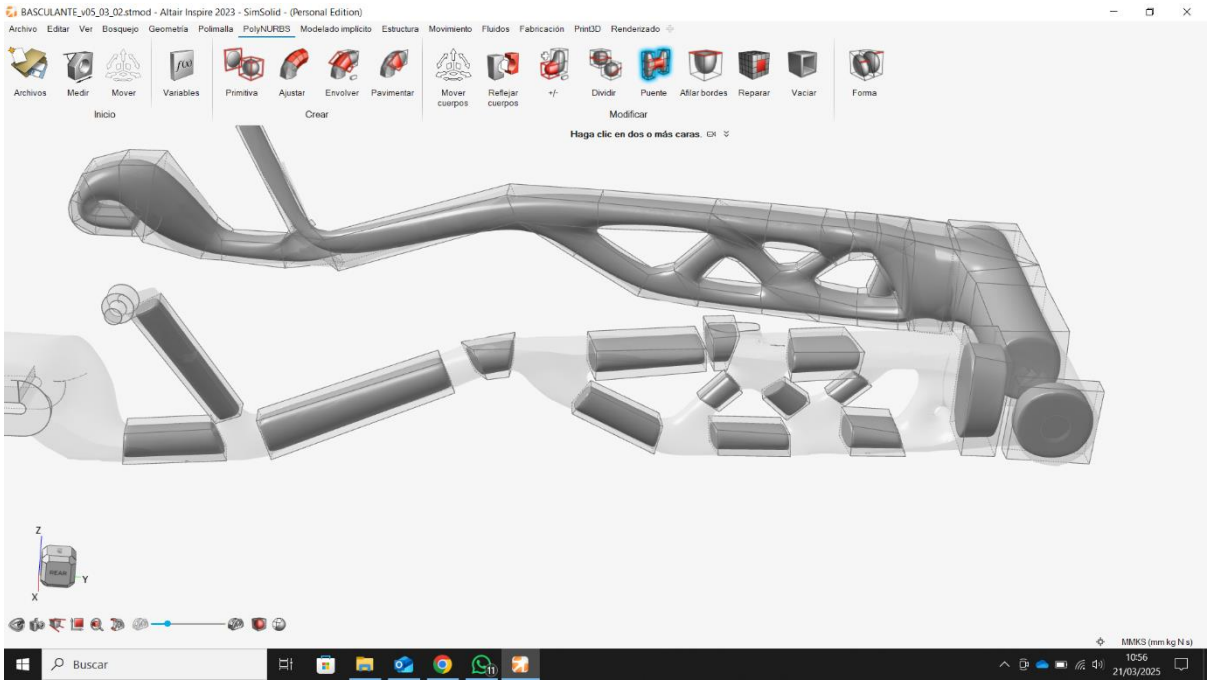


Ilustración 62 PolyNURBS con herramientas manuales

A continuación, se muestra el uso de la herramienta “Reparar”, que detecta automáticamente caras mal formadas o uniones que se solapan y se marcan en rojo. El programa permite aplicar correcciones automáticas para sellar superficies discontinuas y asegurar una geometría cerrada.

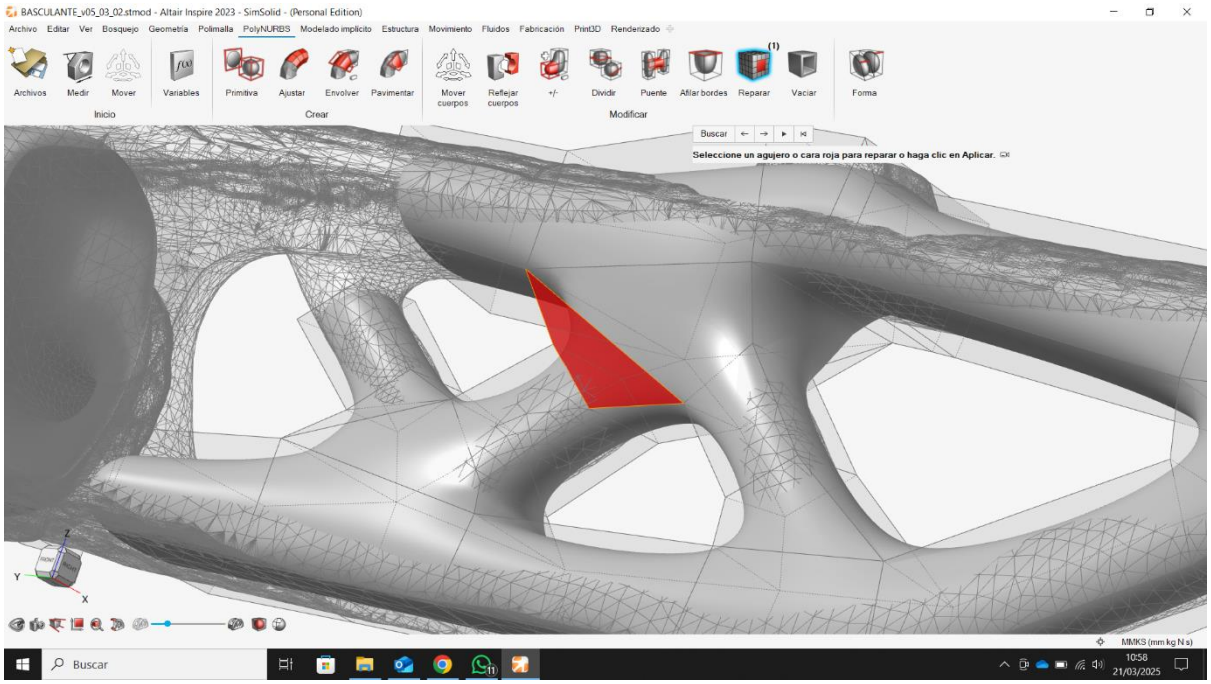


Ilustración 63 Detección automática de discontinuidades

Una vez la malla esta reparada, se observa como las uniones son continuas sin agujeros en la superficie. Para unir distintos volúmenes como se muestran en la imagen 63 es posible hacerlo con herramientas como “Ajustar” y “Forma” o bien mediante “Puente”. Esta última herramienta permite conectar dos o más cuerpos separados, generando una transición teniendo en cuenta la proyección de las caras de cada cuerpo individual. La imagen 64 es el resultado de este método done se puede apreciar la continuidad topológica lograda al unir 3 primitivas distintas.

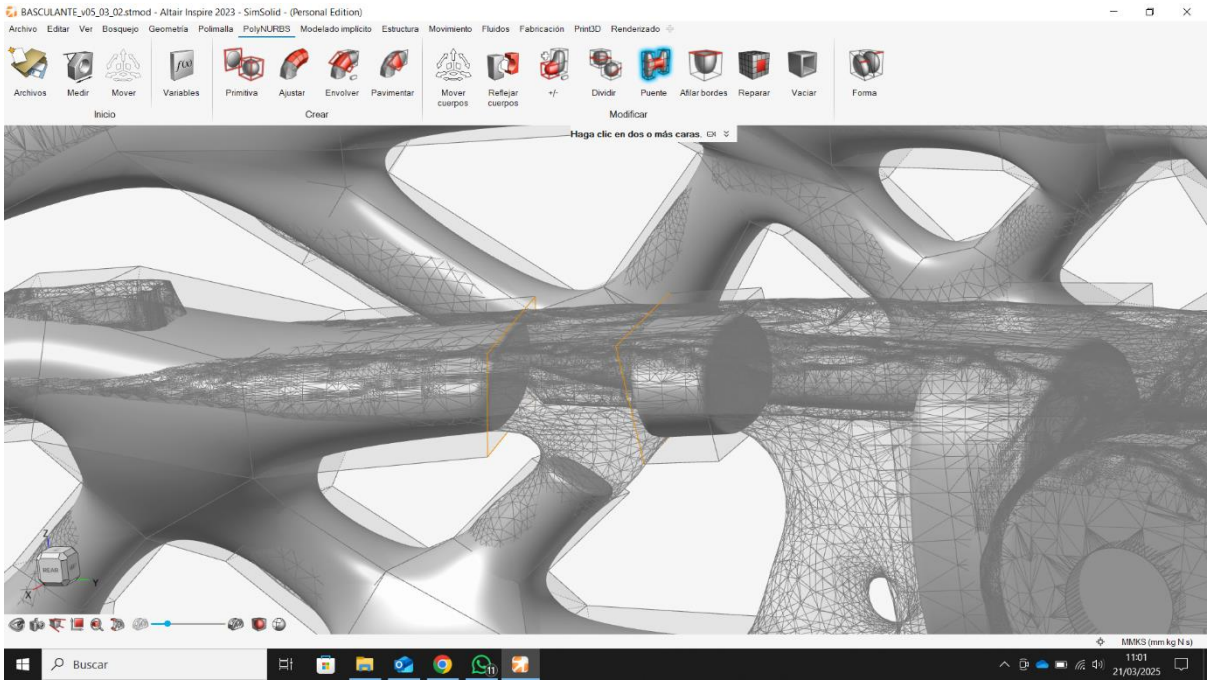


Ilustración 64 Uso de la herramienta "Puente"

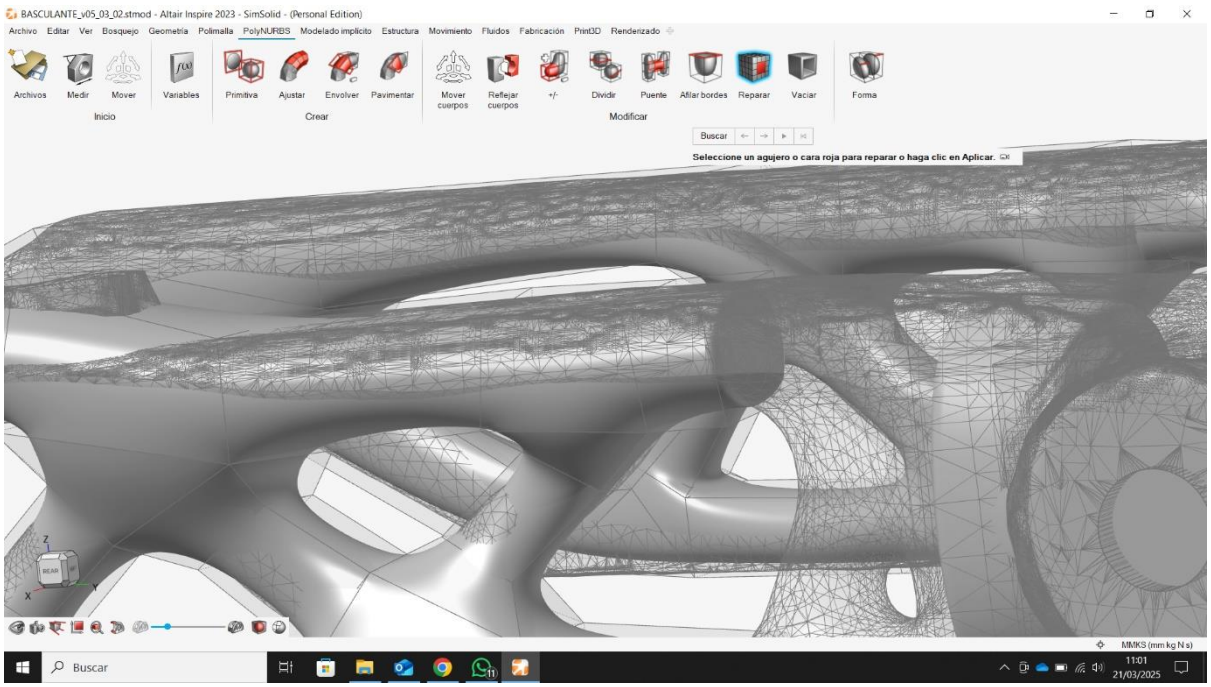


Ilustración 65 Uso de la herramienta "puente" pt2.

Por último, se muestra otro erro típico en el tratamiento de estas geometrías con PolyNURBS. Cundo se crean volúmenes de gran tamaño desde una misma primitiva, el programa en ocasiones deja espacios entre el volumen y la malla de un tamaño muy reducido. En este caso, detecta que debe haber otro volumen a continuación y por lo tanto crea una cara de unión. Para resolverlo es necesario hacer uso de la herramienta dividir, la cual, como su nombre indica, divida los volúmenes en volúmenes más pequeños para mejorar la precisión. En ocasiones no se puede reparar por lo que habrá que modificar la geometría y por tanto revalidar las cargas.

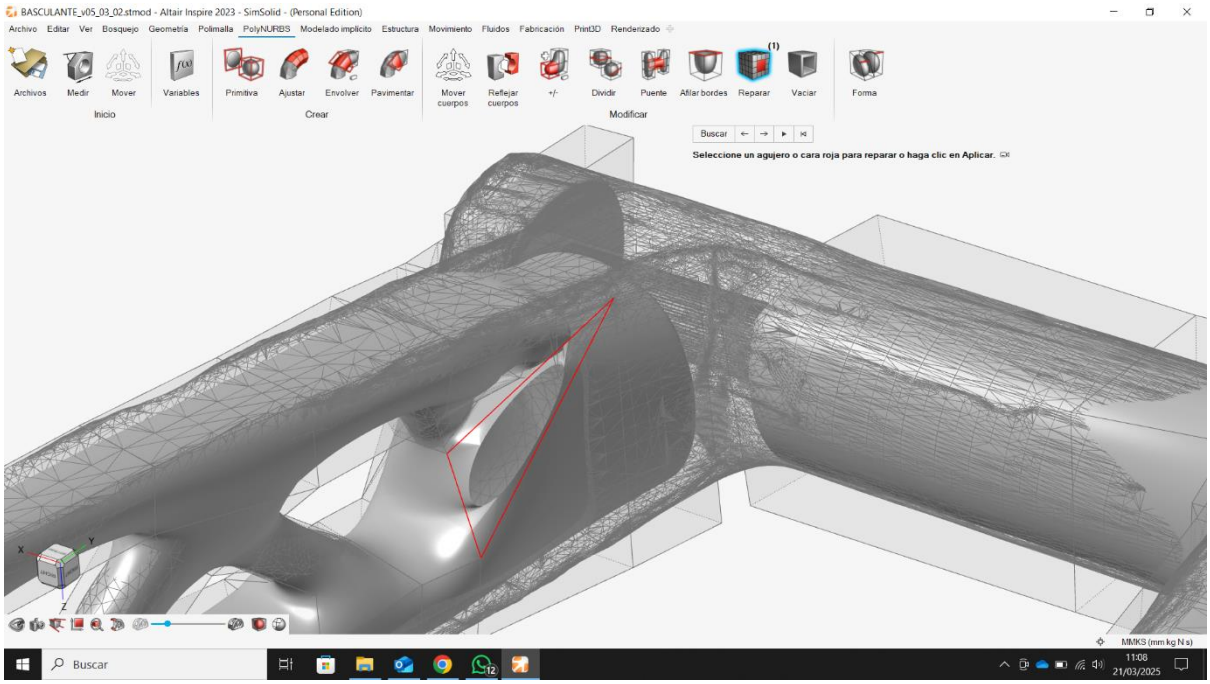


Ilustración 66 Error típico con grandes volúmenes

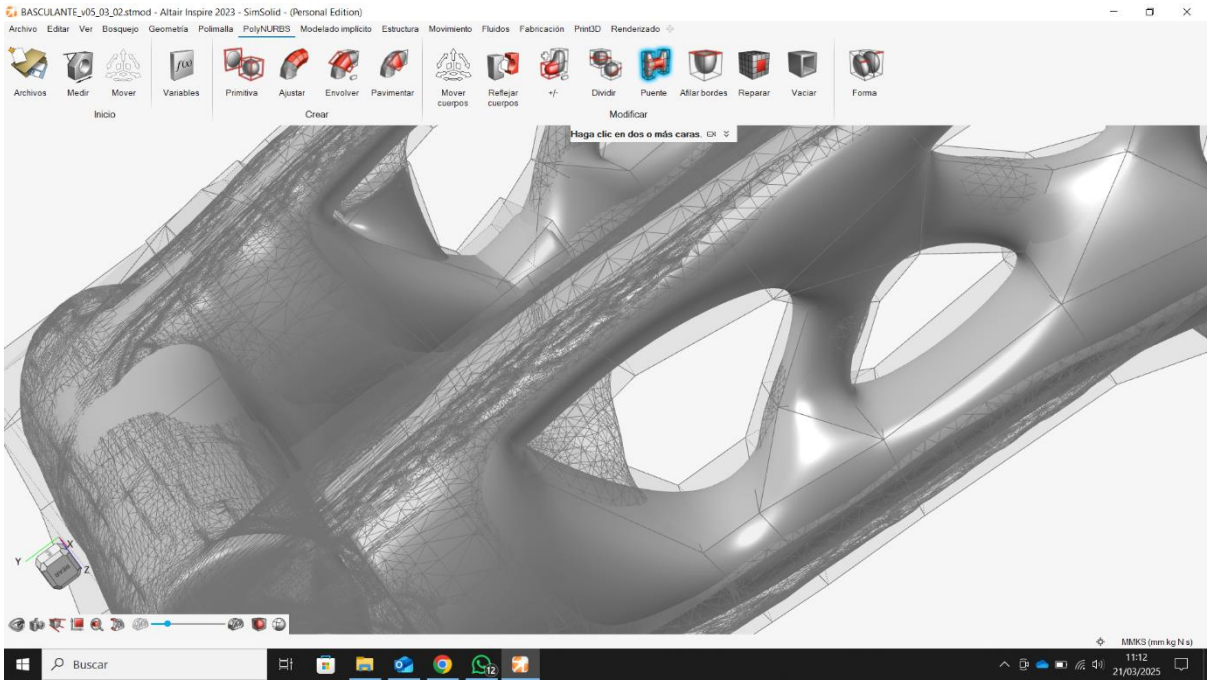


Ilustración 67 Solución dividiendo volúmenes

5.5 Proceso de fabricación aditiva (Selección de materiales y tecnologías)

Para realizar las estructuras lattice se utilizará el programa Ntop (Ntopology). Este software no se emplea tanto para diseñar desde cero, sino para complementar y optimizar geometrías previamente definidas. Habitualmente se parte de modelos CAD importados o de resultados obtenidos en fases previas de análisis, tales como estudios estructurales, procesos de optimización topológica o incluso simulaciones CFD. A partir de estas referencias, Ntop permite generar configuraciones geométricas complejas que resultarían muy difíciles de construir en otros entornos convencionales de modelado.

La figura muestra los principales tipos de estructuras lattice en Ntopology. Se dividen en *Surface-Based Lattices*, basadas en superficies implícitas, donde destacan las TPMS (*Triply*

Periodic Minimal Surface) y las Walled TPMS, ambas con seis variantes de relleno; y en *Beam-Based Lattices*, formadas por vigas o grafos, que pueden ser periódicas, con treinta tipos de celdas unitarias, o no periódicas, con dos tipos principales. Esta clasificación ilustra la variedad de entramados disponibles para adaptar el diseño a distintas necesidades estructurales.

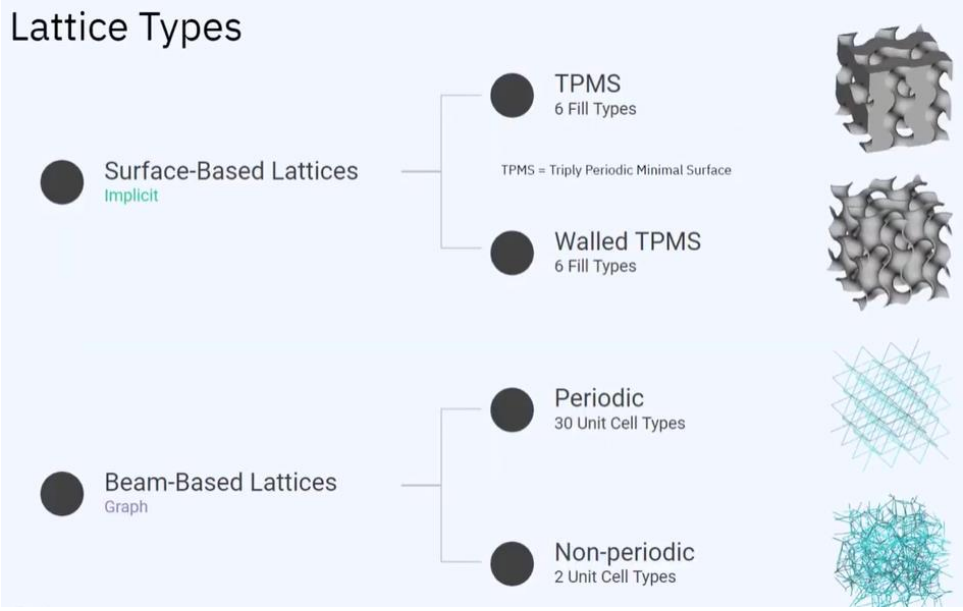


Ilustración 68 Tipos de estrucutras lattice en Ntop

Detrás de cada geometría generada en Ntop se encuentran los llamados campos implícitos (*implicit fields*), que describen matemáticamente el volumen en función de determinados parámetros de entrada. A partir de estos campos, el software evalúa las ecuaciones en tiempo real y muestra en pantalla un cuerpo implícito (*implicit body*), que constituye el formato nativo de Ntopology. Estos cuerpos implícitos no tienen por qué crearse únicamente dentro del programa, sino que también pueden obtenerse a partir de mallas importadas o de superficies procedentes de un archivo CAD, lo que permite integrar sin dificultad modelos externos en el flujo de trabajo.

Como se muestra en la siguiente imagen, primero se procede a importar la pieza y a continuación se crea el cuerpo implícito a partir de la geometría importada. Una vez hecho esto, Ntop ya reconoce la pieza como una geometría editable.

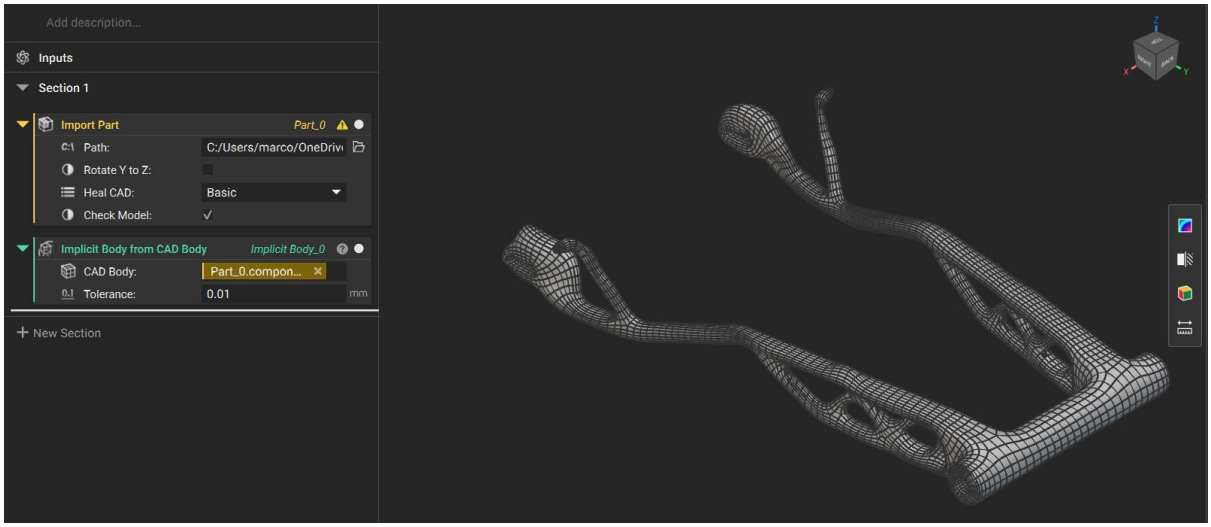


Ilustración 69 Importación de la geometría a Ntop

En esta etapa se aplica el bloque Shell sobre el cuerpo importado desde el archivo CAD, lo que permite convertirlo en un cuerpo implícito al que se le define un espesor y una dirección. En este caso se ha fijado una tolerancia de 0,01 mm y un grosor de 1 mm hacia el interior, lo que genera una pared externa hueca. De esta forma, la pieza queda vaciada en su interior y preparada para ser posteriormente rellenada con una estructura lattice, combinando así una superficie de soporte definida con un relleno interno optimizado.

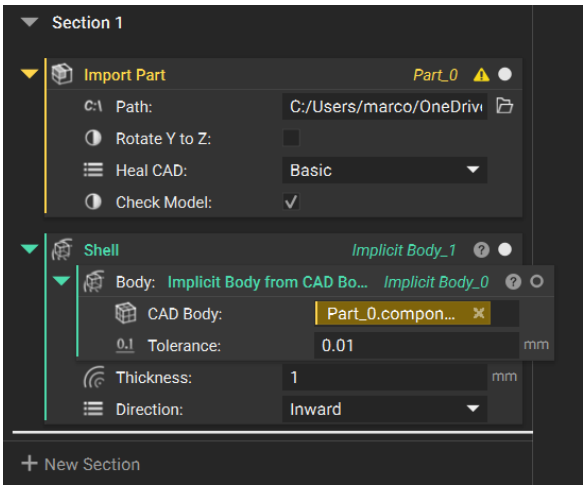


Ilustración 70 Bloque Shell

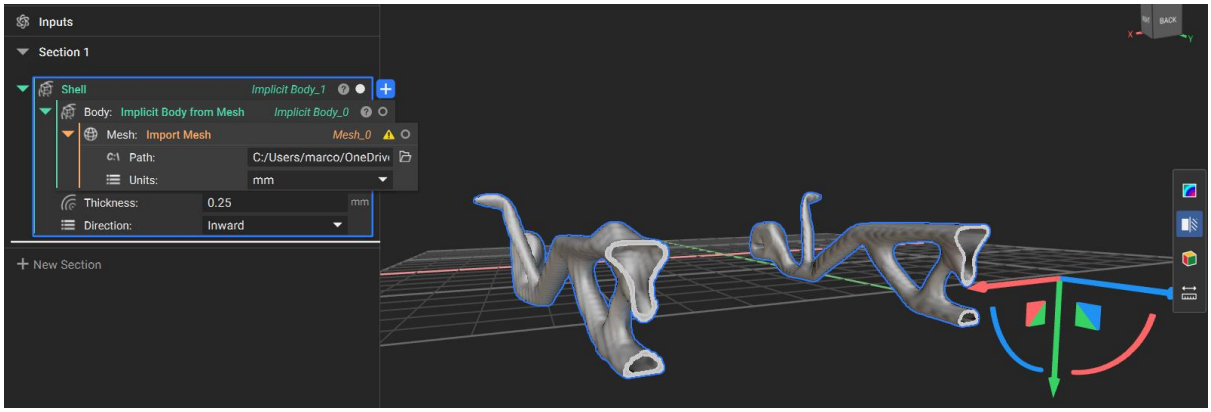


Ilustración 71 Aplicación del bloque Shell para vaciar la pieza a partir de una malla importada

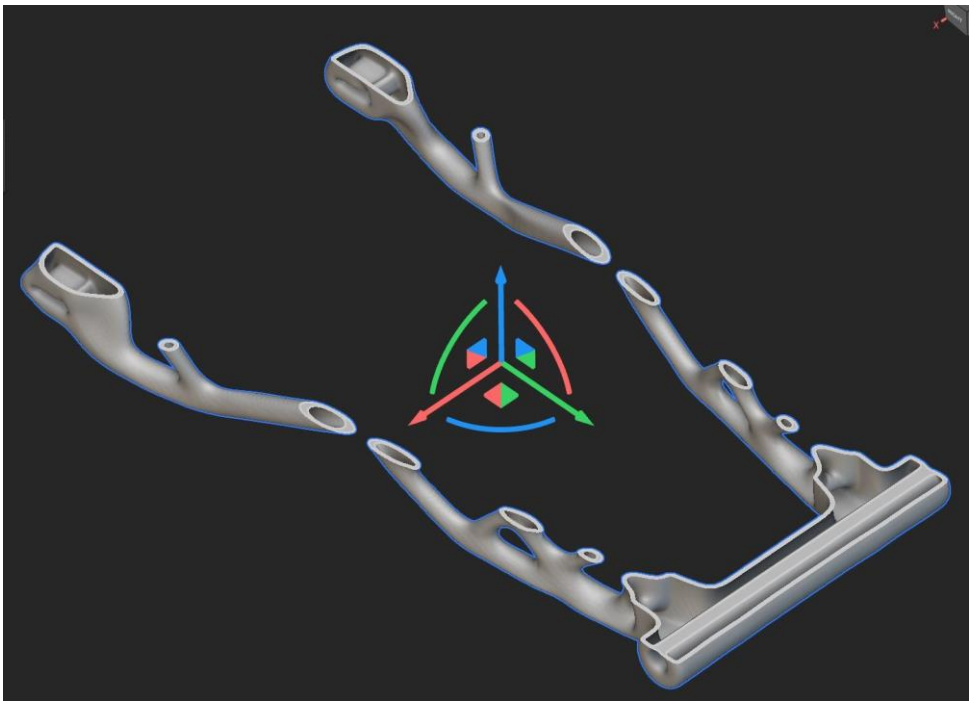


Ilustración 72 Aplicación del bloque shell

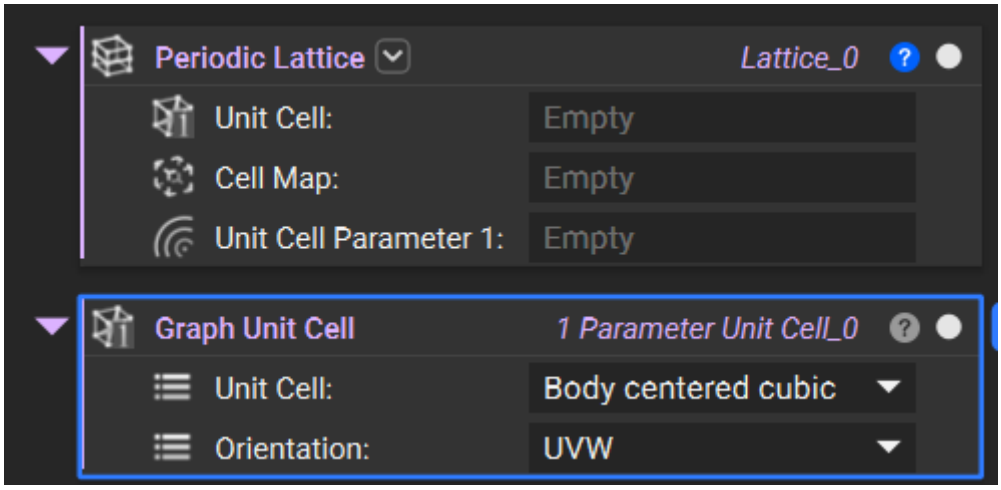


Ilustración 73 Definición de la estructura lattice

En la imagen anterior se observa la configuración de un bloque Periodic Lattice en combinación con un Graph Unit Cell. El bloque Periodic Lattice permite definir una estructura lattice a partir de una celda unitaria repetida periódicamente. Para ello se deben especificar tres elementos principales: la propia celda unitaria (Unit Cell), los parámetros asociados a ella (Unit

Cell Parameters, como grosor o desplazamiento de la superficie media) y el mapa de celdas (Cell Map), que determina la forma en que estas se distribuyen en el volumen de la pieza.

En este caso, la celda unitaria se va a definir mediante el bloque *Graph Unit Cell*. Aquí se ha seleccionado una celda cúbica centrada en el cuerpo (*Body Centered Cubic*), una de las configuraciones más habituales por su buen equilibrio entre rigidez y ligereza. Además, se establece la orientación de la celda en el espacio mediante el sistema UVW, lo que permite controlar la disposición de la estructura interna en función de las necesidades estructurales.

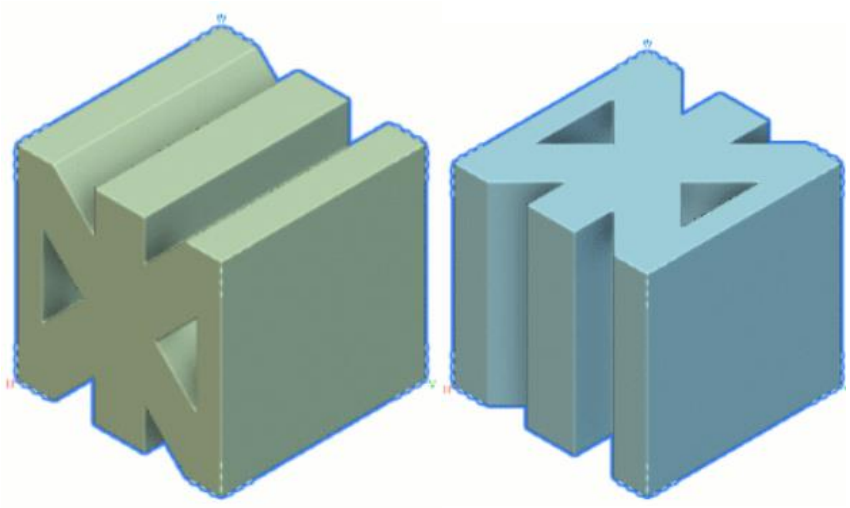
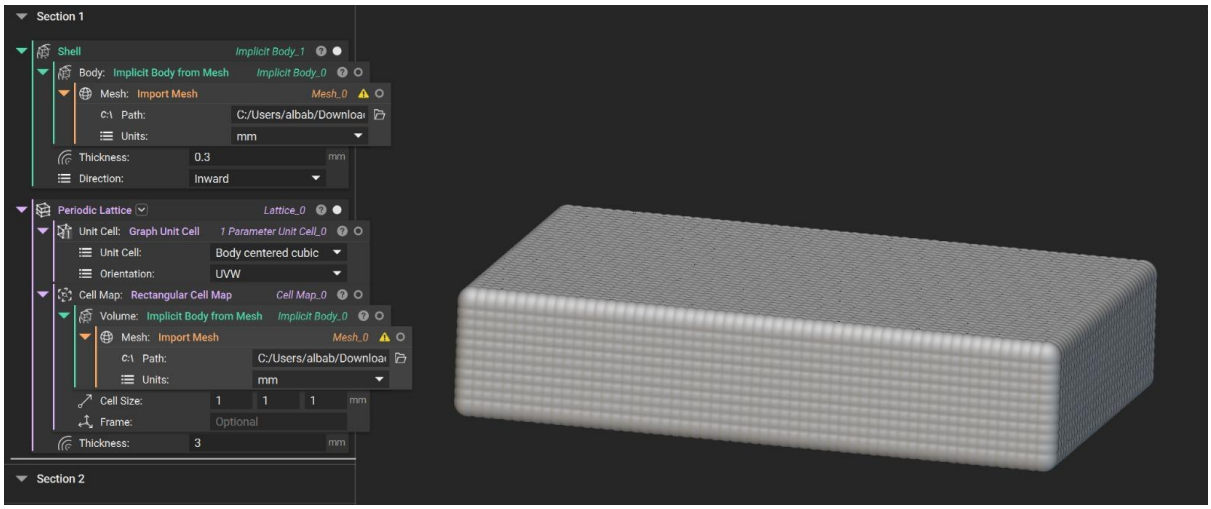


Ilustración 74 Distintas orientaciones de las células body centered cubic

En la siguiente etapa del proceso se aprecia la aplicación conjunta del bloque Shell y del Periodic Lattice sobre la geometría del basculante. Como se menciona anteriormente, a partir de la malla importada, se ha generado una Shell con un espesor de 0,3 mm hacia el interior, de manera que la pieza mantiene una pared externa definida que actúa como contorno.

Posteriormente, se ha definido un Periodic Lattice mediante el bloque Graph Unit Cell, seleccionando una celda cúbica centrada en el cuerpo (Body Centered Cubic) orientada en UVW. La distribución de las celdas se ha controlado a través de un Rectangular Cell Map, que genera un volumen periódico perfectamente alineado con la geometría externa. En este caso se han empleado celdas con tamaño unitario de 1 mm y un grosor de 3 mm en sus elementos, lo que permite obtener una estructura interna densa y regular. Estos parámetros son cruciales a la hora de buscar una reducción de masa y rigidez total especifica.

La combinación de estos parámetros da como resultado una pieza hueca con una superficie externa controlada por la Shell y un interior completamente relleno por la estructura lattice periódica. Actualmente se dispone de dos cuerpos separados en nTop por lo que no es una pieza funcional. Este procedimiento constituye la base para, en pasos posteriores, realizar operaciones booleanas que integren ambos cuerpos en un único modelo optimizado, capaz de equilibrar resistencia mecánica y reducción de peso.



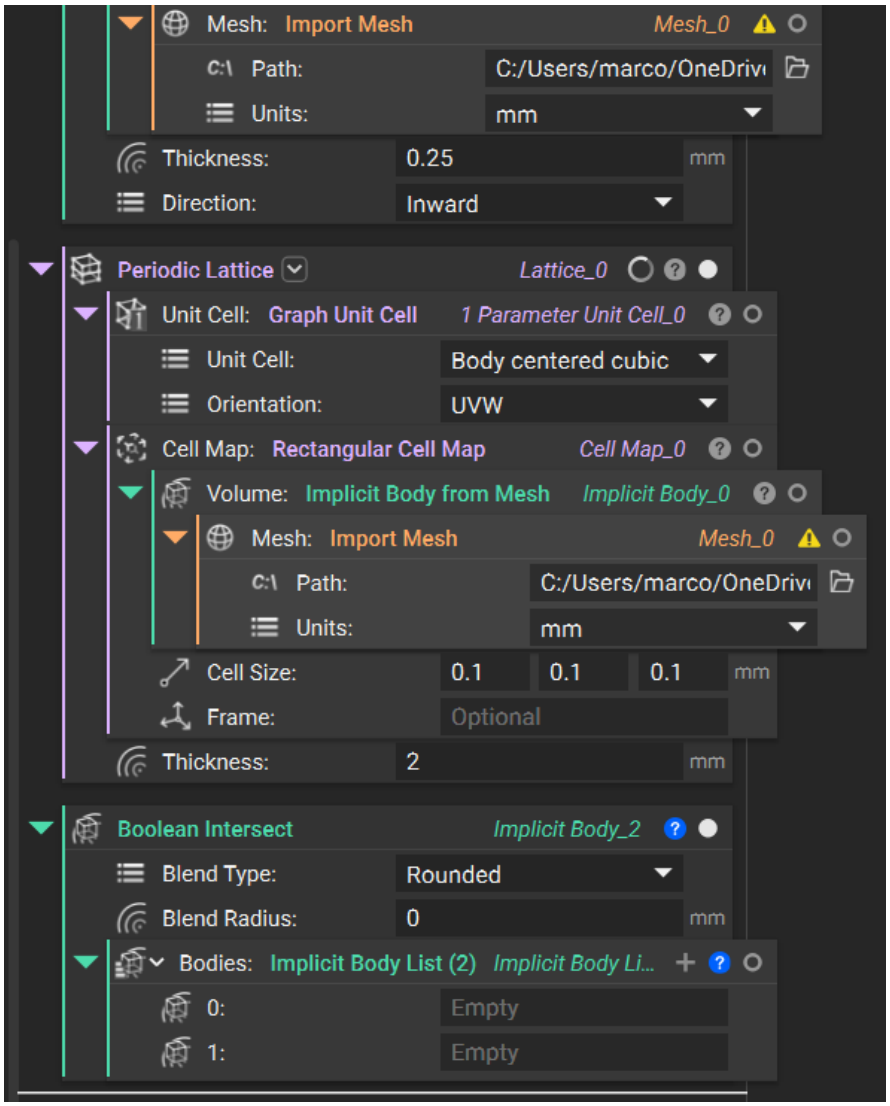


Ilustración 75 Flujo de trabajo en nTop

A continuación, se integran los diferentes elementos de diseño mediante la operación Boolean Intersect. El bloque Boolean Intersect combina ambos cuerpos: la Shell que define el contorno externo de la pieza y la estructura lattice periódica que rellena el volumen interno. Gracias a esta intersección, la geometría final presenta una pared exterior continua y una red interna de soporte optimizada, logrando un equilibrio entre ligereza y resistencia mecánica.

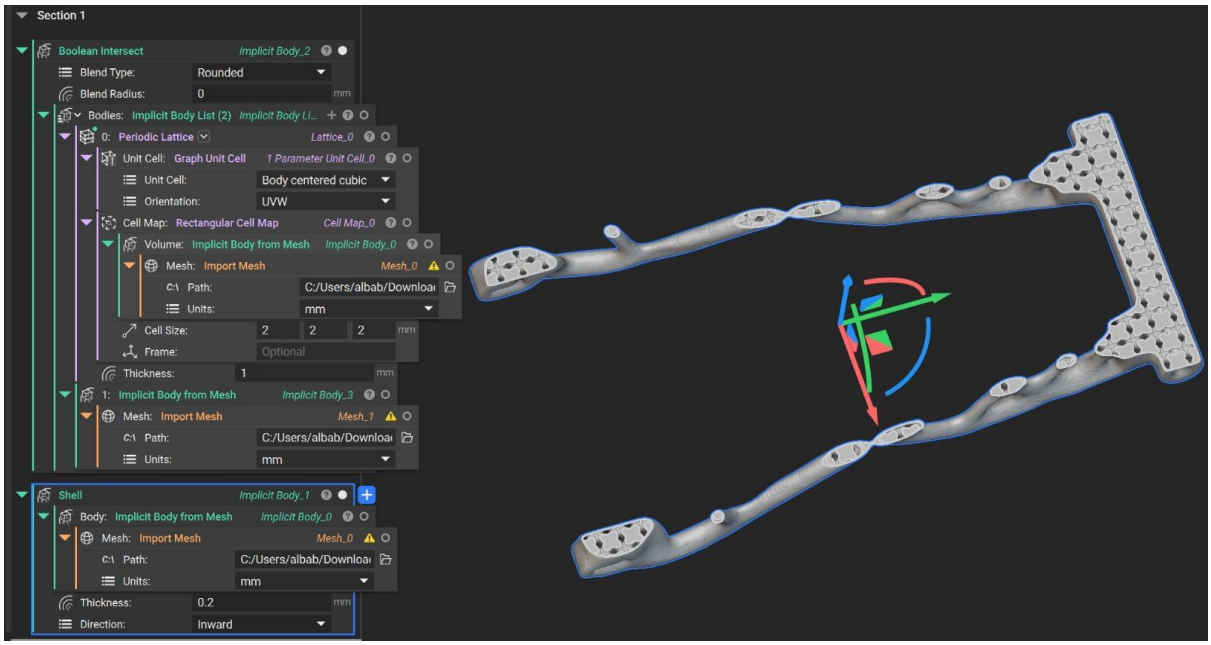


Ilustración 76 Estructura lattice Body centered cubic de 2mm

En la imagen anterior, la estructura interna lattice se generó a partir de celdas de tipo Body Centered Cubic con un Cell Size de 1 mm y un Thickness de 2 mm. Esto dio lugar a una red interna más densa, con elementos de menor tamaño y mayor grosor relativo, lo que proporciona una distribución muy compacta que incrementa la rigidez local, aunque también aumenta la cantidad de material empleado.

En la imagen actual, en cambio, el Cell Size se ha incrementado a 3 mm mientras que el Thickness de los elementos se ha reducido a 1 mm. Este ajuste provoca que la estructura interna esté formada por celdas de mayor tamaño y barras más delgadas, lo que reduce la densidad de la red y, en consecuencia, el peso total de la pieza. Sin embargo, al disminuir el grosor de los elementos, también se reduce la rigidez local de cada celda, de modo que la estructura global se vuelve más ligera pero menos resistente frente a cargas elevadas.

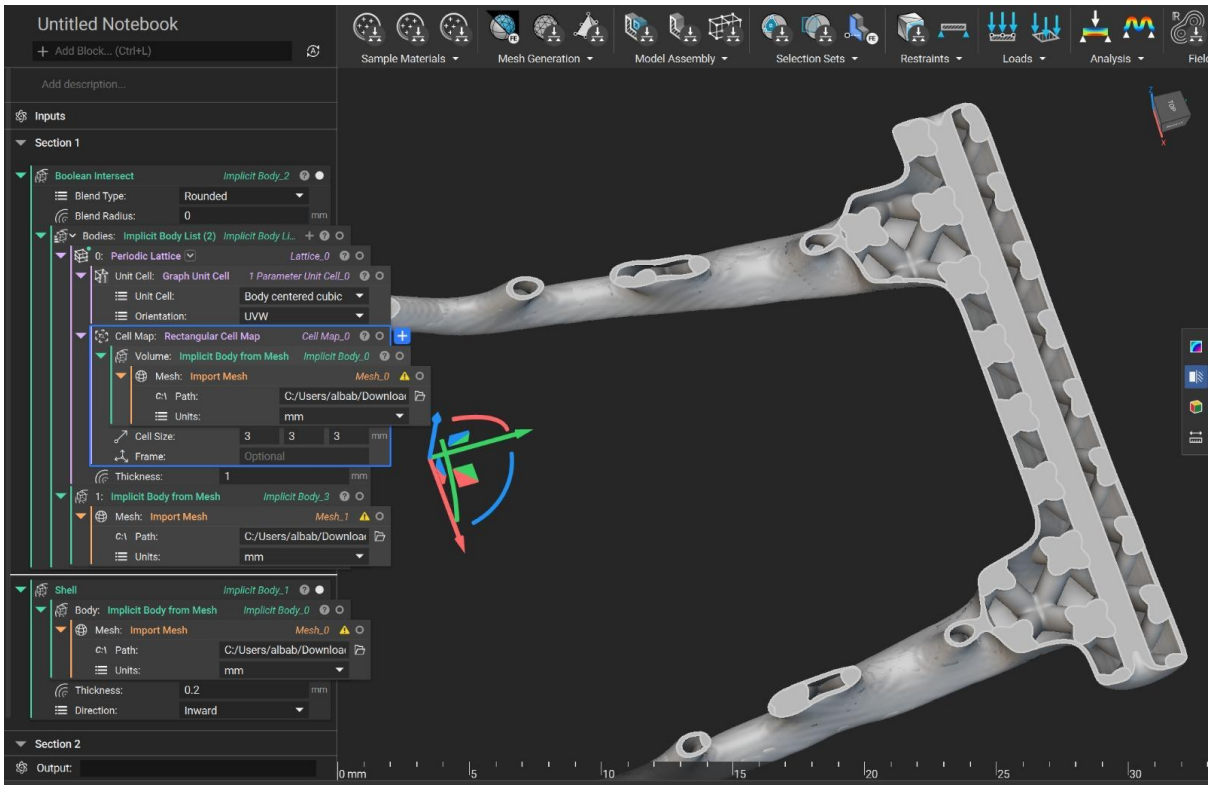


Ilustración 77 Estructura lattice Body centered cubic de 3mm

En siguiente lugar, el procedimiento es similar al empleado anteriormente con el lattice de tipo Body Centered Cubic, pero ahora se recurre a un Surface-Based Lattice. Concretamente, se ha utilizado una celda unitaria Walled TPMS de tipo Gyroid, que se caracteriza por estar basada en superficies mínimas triplemente periódicas. A diferencia de los lattices tipo graph, donde la estructura se construye a partir de barras o vigas, las geometrías TPMS generan superficies continuas que se repiten en el espacio y pueden presentar un espesor definido, en este caso de 0,5 mm. Otras alternativas a los gyroid son: Schuartz, Diamond o Lidinoid.

La principal diferencia entre los Body Centered Cubic y los Surface-Based Lattice radica en su naturaleza geométrica: mientras que los lattices basados en grafos (Graph Unit Cells) producen entramados discretos de barras, los TPMS crean una red de superficies suavemente conectadas. Esto se traduce en una mejor distribución de tensiones al evitar las esquinas y una elevada

relación rigidez-peso, ya que las superficies minimizan la concentración de esfuerzos y proporcionan continuidad estructural.

El objetivo de utilizar este tipo de lattice es comparar directamente su comportamiento con el de las celdas cúbicas centradas en el cuerpo. Mientras que las estructuras BCC permiten un control más sencillo de la densidad y orientación de las barras, los TPMS aportan ventajas en términos de isotropía mecánica y absorción de cargas, lo que los hace especialmente interesantes en aplicaciones donde se busca combinar ligereza y un reparto de esfuerzos optimo.

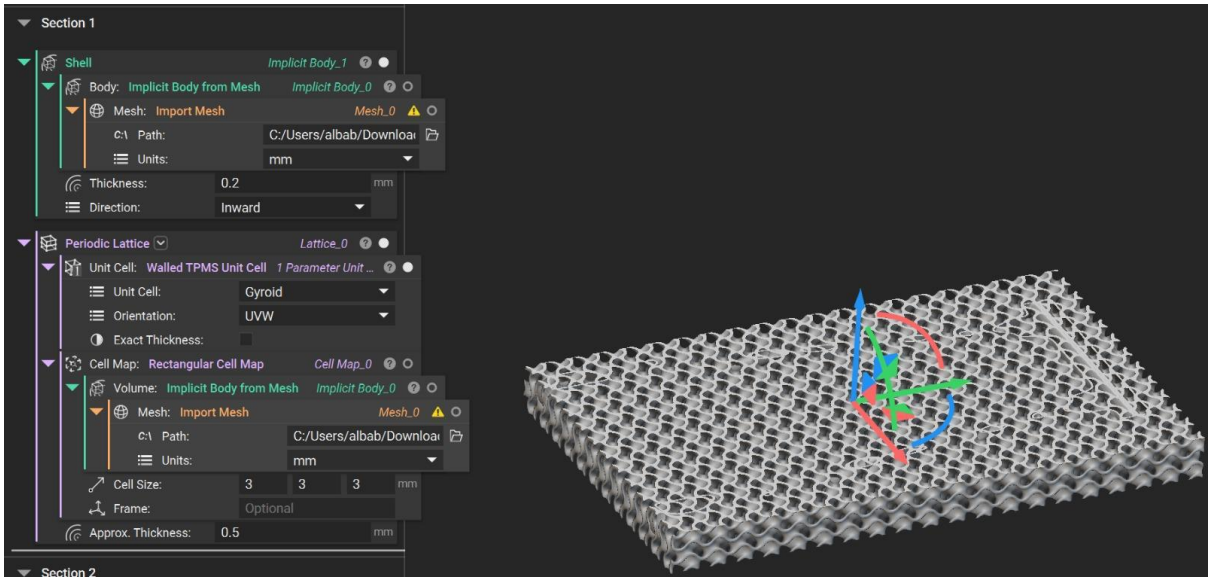
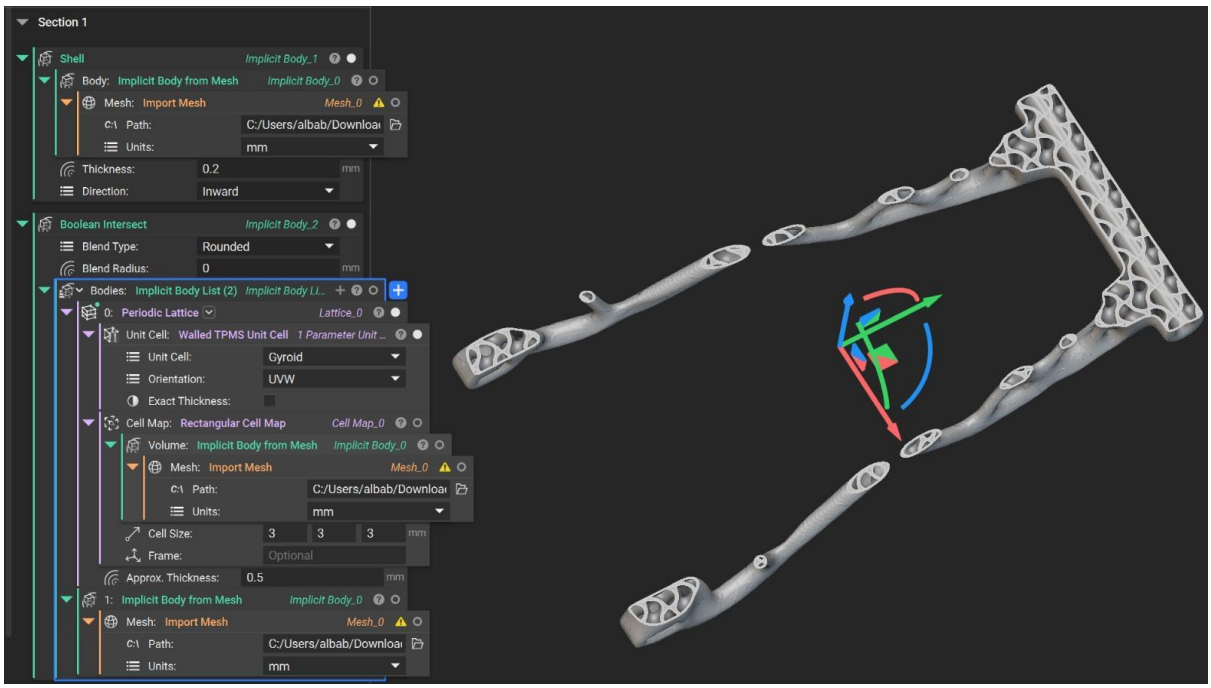


Ilustración 78 Rectangular cell map relleno de estrucutras Gyroid

En este caso el procedimiento seguido es análogo al realizado con el lattice de tipo Body Centered Cubic, pero aplicando una celda superficial. En primer lugar, se importa la malla de referencia y se aplica un Shell con un espesor de 0,2 mm hacia el interior, de modo que la pieza conserva una carcasa externa definida y hueca. A continuación, mediante el bloque Periodic Lattice se selecciona una celda unitaria de tipo Walled TPMS – Gyroid, caracterizada por estar basada en superficies mínimas triplemente periódicas que se repiten en el espacio de manera

continua. Para esta celda se establece un espesor aproximado de 0,5 mm en sus paredes, garantizando una red interna conectada. Posteriormente, se define un Rectangular Cell Map con un tamaño de celda de 3 × 3 × 3 mm, que distribuye el patrón de forma regular dentro del volumen.



En estas dos últimas imágenes se muestra el proceso de integración final de la estructura tipo Gyroid dentro de la pieza mediante operaciones booleanas. En primer lugar, se parte de la geometría externa obtenida a través del bloque Shell, con un espesor de 0,2 mm hacia el interior, que actúa como límite de la pieza. Sobre este contorno se genera un Periodic Lattice definido con la celda unitaria Walled TPMS – Gyroid, distribuida mediante un Rectangular Cell Map con un tamaño de celda de 3 mm y un grosor aproximado de 0,5 mm para las paredes.

Una vez generada la estructura interna, el siguiente paso es combinarla con la geometría externa. Para ello se emplea el bloque Boolean Intersect, que mantiene únicamente la parte del

lattice que queda dentro del volumen definido por la Shell. El resultado es una pieza que conserva la superficie externa original y que en su interior presenta un relleno regular de tipo Gyroid.

En la siguiente imagen se añade además un Boolean Union, que permite fusionar los cuerpos resultantes en un único modelo. De este modo, la pieza final queda completamente integrada, con la pared exterior continua y la estructura interna unida de forma coherente. La diferencia principal entre ambas imágenes radica en que la primera conserva los cuerpos como entidades independientes tras el Intersect, mientras que la segunda los combina definitivamente, dejando el modelo preparado para etapas posteriores de análisis o fabricación en impresión 3D.

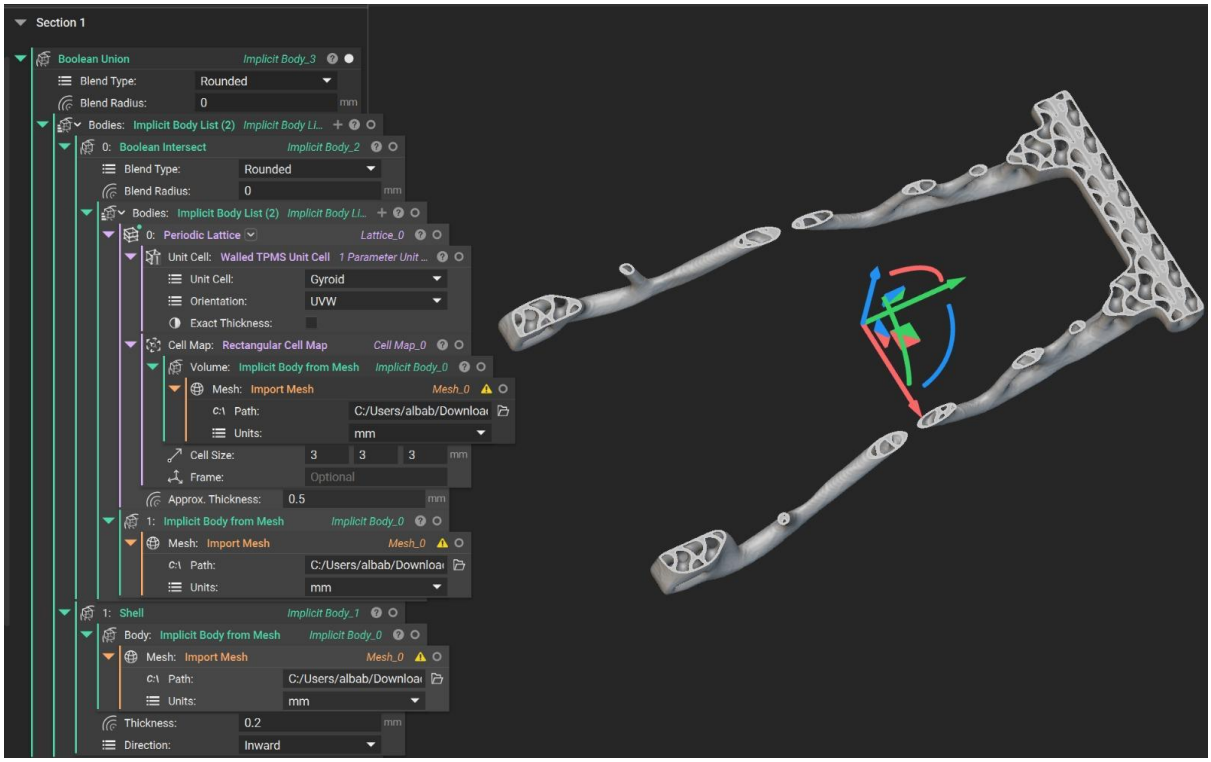


Ilustración 79 Unión booleana del shell y la estructura lattice

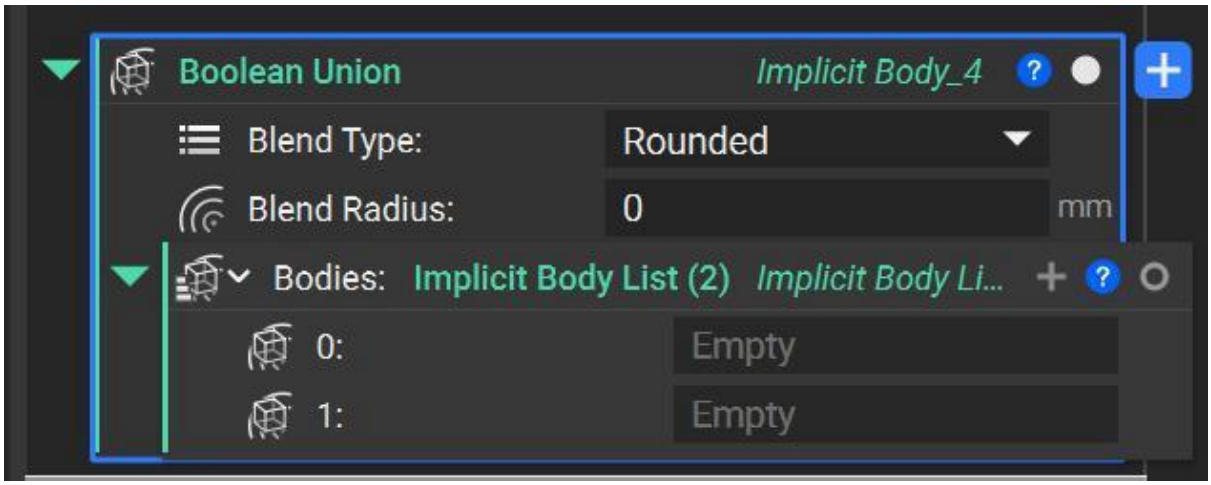


Ilustración 80 Bloque boolean unión

Para finalizar se hace uso del bloque Mesh from Implicit Body, cuya función es convertir la geometría implícita generada en Ntopology en una malla poligonal discretizada que pueda ser utilizada en entornos externos de CAD, simulación o fabricación. A continuación, mediante el bloque Export Mesh, esta malla se guarda en el formato más adecuado según el objetivo del trabajo. Existen diversos formatos de exportación en función del uso que se le quiera dar al archivo: el formato STL, ampliamente empleado en procesos de fabricación aditiva por su simplicidad y compatibilidad; el formato OBJ o 3MF, que permiten almacenar información adicional como colores o metadatos; y el formato STEP, más orientado a la integración con programas CAD y a la realización de análisis estructurales posteriores.

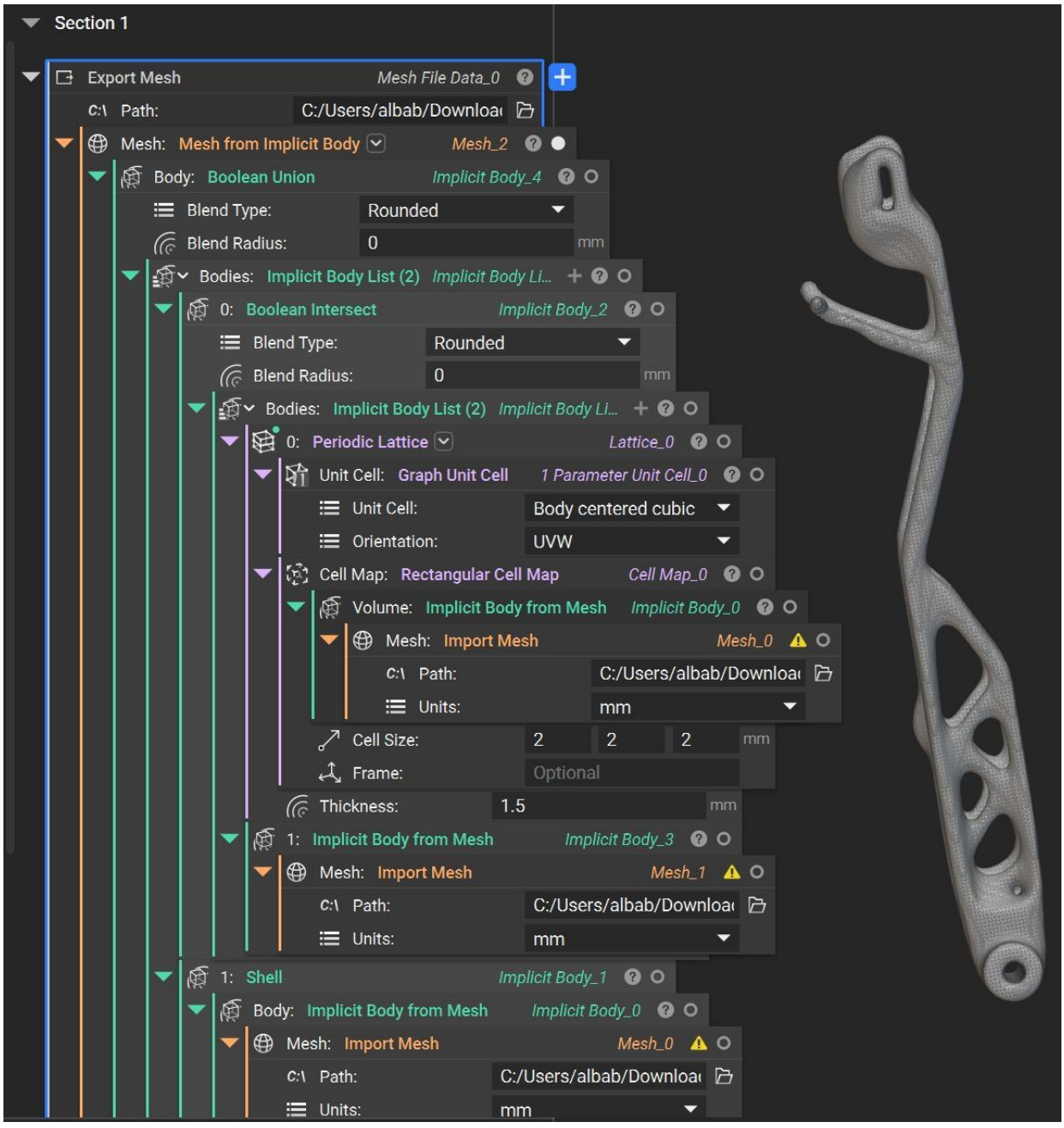


Ilustración 81 Flujo de trabajo final en nTop

5.6 Estudio FEM de las distintas estructuras lattice

En esta fase del trabajo se planteó realizar un análisis por elementos finitos (FEM) sobre las dos versiones de la pieza diseñadas con estructuras lattice: una con configuración Body Centered Cubic (BCC) y otra con estructura TPMS Gyroid. El propósito de este análisis era comparar el comportamiento mecánico de cada diseño bajo las condiciones de carga y restricción definidas en el proyecto, evaluando la distribución de esfuerzos, los desplazamientos y la rigidez estructural. Con ello se pretendía determinar qué tipología de lattice ofrecía un mejor compromiso entre reducción de masa, resistencia y estabilidad y si era posible combinar la optimización topológica con las estructuras lattice. Sin embargo, durante el desarrollo se identificaron importantes limitaciones computacionales. La simulación FEM de geometrías rellenas con lattice requiere una elevada capacidad de cálculo, ya que la complejidad de la malla interna multiplica de manera exponencial el número de elementos a discretizar. Para intentar solventar este problema, se probó a reducir la escala de la pieza con el fin de disminuir su peso y simplificar la geometría, pero aun así los recursos disponibles resultaron insuficientes para procesar los modelos.

En consecuencia, la simulación FEM de estas versiones no ha podido ejecutarse dentro del marco del presente trabajo. Para abordar un análisis de este tipo sería necesario emplear software avanzado de simulación, como ANSYS o Siemens NX, junto con estrategias específicas de mallado y simplificación de estructuras periódicas.

Como línea de trabajo futuro, se plantea retomar el estudio FEM con acceso a equipos de cálculo más potentes y metodologías de simplificación geométrica que permitan reducir el número de elementos sin perder precisión en los resultados. Además, sería interesante comparar los resultados numéricos con ensayos experimentales que validen las prestaciones mecánicas de cada configuración. De esta forma, se podrían extraer conclusiones sólidas acerca

de qué tipología resulta más adecuada en aplicaciones donde se busque optimizar simultáneamente ligereza y resistencia estructural.

6. ANÁLISIS DE COSTES

En esta fase del proyecto se ha llevado a cabo un análisis económico de los prototipos fabricados, con el fin de evaluar el impacto que tiene la aplicación de optimización y de estructuras lattice sobre los costes de producción. Para ello se han considerado diferentes versiones de la pieza: el modelo sin optimizar, así como las versiones optimizadas y con relleno lattice.

El objetivo de este análisis es establecer una comparativa que permitiera identificar no solo el coste directo de cada proceso (material, tiempo de impresión y mano de obra técnica), sino también los costes indirectos asociados, como mantenimiento de máquina, amortización y operaciones de limpieza o preparación. Con estos datos se buscaba determinar en qué medida la aplicación de técnicas de optimización topológica y de rellenos lattice puede traducirse en un ahorro económico real y en una mejora de la eficiencia productiva.

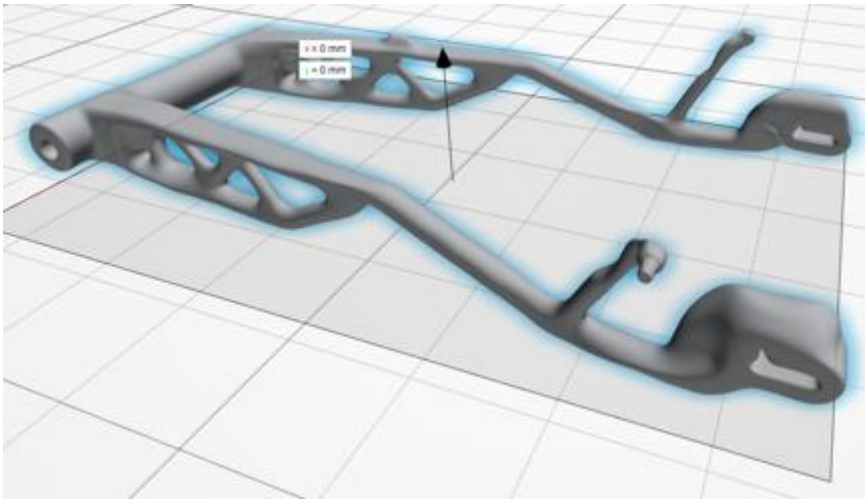


Ilustración 82 Basculante en cama de impresión

Fuente: Propia

Como método de fabricación aditiva se ha seleccionado DMLS (Direct Metal Laser Sintering). La razón principal es que a diferencia de otros procesos como FDM O MJF, DMLS permite obtener componentes capaces de soportar altas exigencias mecánicas. No obstante, debido a las limitaciones de tamaño de las camas de impresión disponibles en la universidad, la pieza no podía ser fabricada en su escala real, por lo que se ha optado por realizar los prototipos a una escala 1:10.

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	

Ilustración 83 Costes de la impresora 3D

Fuente: Propia

Esta tabla recoge el análisis de costes del prototipado mediante impresión 3D DMLS, diferenciando tres bloques principales. En primer lugar, la amortización de la máquina, con un precio de adquisición de 250.000 €, mantenimiento anual de 12.500 € y una vida útil de 4 años, lo que se traduce en un coste de impresión de 62,50 €/h considerando 100 días de trabajo al año y 12 horas diarias de uso. En segundo lugar, el coste del material, correspondiente a polvo metálico con un precio de 95 €/kg (0,25 €/cm³), siendo necesario un volumen de 15.634,75 cm³ con una densidad de empaquetado del 7 %. Finalmente, se incluye el coste técnico del analista, asociado a la preparación del modelo y limpieza posterior, valorado en 40 €/h.

6.1 Prototipo optimizado topológicamente

Ilustración 84 Cálculo del volumen de material de impresión

Fuente: Propia

Como se muestra en la figura anterior, el volumen de la pieza es de 972mm^2 equivalente a 9720mm^2 a escala real. Además, como se muestra en la siguiente imagen el tiempo de impresión está estimado en 5 horas lo cual extrapolado a la pieza de tamaño real, constaría de 50 horas.

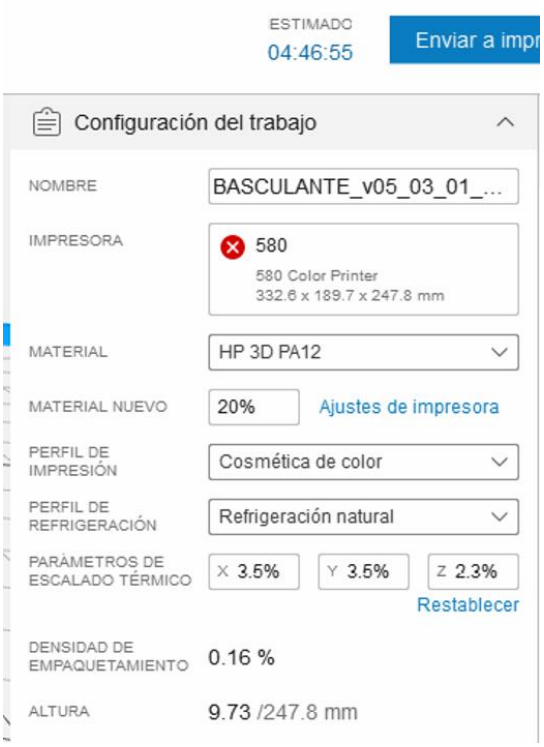


Ilustración 85 Parámetros de impresión

Fuente: Propia

Una vez conocido el volumen y el tiempo de impresión, se procede a calcular en Excel el coste que supondría fabrica el basculante.

PIEZA		
CONCEPTOS PRESUPUESTADOS	Opción Solido	Costes parciales
Material modelo (cc)	972,00	244,94 €/ud
Impresión (horas)	50,00	3125,00 €/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	**3497,94 €/Ud**	
Coste total (€) en ICAI + IVA	**3497,94 €**	

Ilustración 86 Costes pieza optimizada topológicamente

Fuente: Propia

6.2 Prototipo optimizado relleno de lattice Body Centered Cubic

PIEZA BCC		
CONCEPTOS PRESUPUESTADOS	Opción Solido	Costes parciales
Material modelo (cc)	640,00	161,28 €/ud
Impresión (horas)	32,00	2000,00 €/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	2289,28 €/Ud	
Coste total (€) en ICAI + IVA	2289,28 €	

Ilustración 87 Costes de pieza con relleno lattice BCC

Fuente: Propia

6.4 Prototipo optimizado relleno de lattice TPMS Gyroid

PIEZA GYROID		
CONCEPTOS PRESUPUESTADOS	Opción Solido	Costes parciales
Material modelo (cc)	535,66	134,99 €/ud
Impresión (horas)	27,64	1727,50 €/ud
,	0,20	8,00 €/ud
Tiempo Limpieza (h)	3,00	120,00 €/ud
Cantidad de piezas	1,00	
Coste unitario (€) en ICAI + IVA	1990,49 €/Ud	
Coste total (€) en ICAI + IVA	1990,49 €	

Ilustración 88 Costes de pieza con relleno lattice Gyroid

Fuente: Propia

.7. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

7.1. Conclusiones del estudio

El análisis realizado ha permitido contrastar las diferencias entre la pieza sin optimizar, la optimizada topológicamente y la versión con relleno lattice. Desde el punto de vista estructural, se ha verificado que la aplicación de técnicas de optimización conduce a una notable reducción de peso respecto al modelo inicial, disminuyendo así las solicitaciones internas y mejorando la relación resistencia/peso. La incorporación de rellenos tipo lattice permite avanzar un paso más en esta dirección, ya que posibilita eliminar material innecesario manteniendo la rigidez global de la pieza.

Sin embargo, desde la perspectiva económica, los resultados ponen de manifiesto que la reducción en consumo de material no compensa los incrementos asociados al tiempo de impresión y a la complejidad del proceso. En consecuencia, cuando se consideran producciones unitarias o de muy baja serie, las técnicas aditivas con lattice pueden ser competitivas, especialmente en contextos que exigen ligereza extrema. No obstante, a medida que el volumen de producción aumenta, los métodos tradicionales continúan siendo más rentables, puesto que los costes fijos de utillaje y mecanizado son muy contenidos en comparación y permiten alcanzar precios unitarios inferiores.

7.2. Limitaciones encontradas durante el desarrollo

El desarrollo del trabajo no estuvo exento de limitaciones que condicionaron parcialmente los resultados obtenidos. Una de las principales dificultades surgió durante el proceso de transferencia del modelo desde SolidEdge hacia Altair, donde se produjeron pérdidas de zonas que debían ser preservadas, así como defectos en la malla que obligaron a realizar ajustes manuales adicionales. Estas incidencias repercutieron en la precisión de la geometría optimizada.

Otra limitación relevante fue el elevado coste computacional de las simulaciones de optimización topológica. El análisis con múltiples iteraciones y restricciones supuso tiempos de cálculo prolongados y la necesidad de emplear ordenadores de altas prestaciones. Este aspecto limitó el número de variantes que pudieron ser exploradas dentro del marco temporal del proyecto.

7.3. Recomendaciones para futuras investigaciones

De cara a trabajos futuros, resulta de interés ampliar el análisis de estructuras lattice mediante la incorporación de diferentes configuraciones lattice y densidades variables, explorando cómo influyen en el comportamiento mecánico y en la eficiencia económica. En este sentido, se recomienda llevar a cabo una comparativa mediante simulaciones de elementos finitos (FEM) entre distintos tipos de lattice (por ejemplo, BCC, FCC, TPMS o Voronoi), con el fin de identificar cuáles presentan un mejor compromiso entre rigidez, resistencia y coste de fabricación.

En el ámbito industrial, se recomienda validar los resultados obtenidos a escala de laboratorio con ensayos físicos, así como analizar la viabilidad de fabricar estas piezas mediante tecnologías emergentes. Finalmente, una línea prometedora consiste en realizar comparativas de ciclo de vida completo entre fabricación aditiva y métodos convencionales, lo que permitiría valorar de forma integral no solo los costes y pesos, sino también el impacto ambiental de cada alternativa cooperando para cumplir los objetivos de desarrollo sostenibles.

BIBLIOGRAFÍA

- Batista, R. C., Agarwal, A., Gurung, A., Kumar, A., Altarazi, F., Dogra, N., ... & Agrawal, A. (2024). Topological and lattice-based AM optimization for improving the structural efficiency of robotic arms. *Frontiers in Mechanical Engineering*, 10, 1422539. https://doi.org/10.3389/fmech.2024.1422539
- Kothandaraman, L., & Balasubramanian, N. K. (2024). Optimization of 3D Printing Parameters of Square Lattice Structure using Taguchi Method in FDM Process. *Materials Today: Proceedings*, https://doi.org/10.1016/j.matpr.2024.04.033
- Maconachie, T., Leary, M., Lozanovski, B., Zhang, X., Qian, M., & Faruque, O., et al. (2019). SLM lattice structures: properties, performance, applications and challenges. *Materials & Design*, 183, 108137. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108137
- Graba, M., & Grycz, A. (2022). Application of finite element method in industrial design, example of an electric motorcycle design project. *Engineering*, 28(1), 1–24. https://doi.org/10.1515/eng-2022-0569:contentReference[oaicite:0]{index=0}
- Huang, M., Sha, W., Xiao, M., Gao, L., Liu, X., & Wang, Y. (2024). Design of lattice-based thermal metamaterials via intelligent modeling. *Journal of Materials Processing Technology*, 327, 100243. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2024.100243:contentReference[oaicite:1]{index=1}
- Satyanarayana, K., Narendra, M., Sai, E. P., Sri, B. G. H., & Rao, M. (2024). Modelling and analysis of double sided monoshock swing-arm. *E3S Web of Conferences*, 552, 01019. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202455201019:contentReference[oaicite:2]{index=2}
- Swathikrishnan, S., Singanapalli, P., & Prakash, A. S. (2019). Design and analysis of swingarm for performance electric motorcycle. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*, 8(12), 2278–3075. https://doi.org/10.35940/ijitee.L3853.1081219:contentReference[oaicite:3]{index=3}
- Maconachie, T., Leary, M., Lozanovski, B., Zhang, X., Qian, M., & Faruque, O. (2019). SLM lattice structures: properties, performance, applications and challenges. *Materials & Design*, 183, 108137. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108137:contentReference[oaicite:4]{index=4}
- Ponikelsky, M., Fabian, S., & Daneshjo, N. (2022). Reverse engineering and rapid prototyping in the development of automotive components. *Manufacturing*

Technology, 22(6), 670–678. https://doi.org/10.21062/mft.2022.060:contentReference[oaicite:5]{index=5}

- Shahrubudin, N., Lee, T. C., & Ramlan, R. (2019). An overview on 3D printing technology: Technological, materials, and applications. Procedia Manufacturing, 35, 1286–1296. https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.06.089
- Karakurt, I., & Lin, L. (2020). 3D printing technologies: techniques, materials, and post-processing. Current Opinion in Chemical Engineering, 28, 134–143. https://doi.org/10.1016/j.coche.2020.04.001
- Fernandes, R. R., & Tamijani, A. Y. (2021). Design optimization of lattice structures with stress constraints. Materials & Design, 210, 110026. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.110026
- Zhu, J., Zhou, H., Wang, C., Zhou, L., Yuan, S., & Zhang, W. (2021). A review of topology optimization for additive manufacturing: Status and challenges. Chinese Journal of Aeronautics, 34(1), 91–110. https://doi.org/10.1016/j.cja.2020.09.020
- Zhao, N., Parthasarathy, M., Patil, S., Coates, D., Myers, K., Zhu, H., & Li, W. (2023). Direct additive manufacturing of metal parts for automotive applications. Journal of Manufacturing Systems, 68, 368–375. https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2023.04.008
- Huang, M., Sha, W., Xiao, M., Gao, L., Liu, X., & Wang, Y. (2024). Multiscale topology optimization of cellular structures with high thermal conductivity and large convective surface area. International Journal of Thermal Sciences, 201, 109053. https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2024.109053
- Buonamici, F., Carfagni, M., Furferi, R., Volpe, Y., & Governi, L. (2021). Generative design: An explorative study. Computer-Aided Design & Applications, 18(1), 144–155. https://doi.org/10.14733/cadaps.2021.144-155
- Chew, Z. X., Wong, J. Y., Tang, Y. H., Yip, C. C., & Maul, T. (2024). Generative design in the built environment. Automation in Construction, 166, 105638. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105638
- Castillo Castillo, F. J. (2018). Obtención de modelos 3D por ingeniería inversa mediante el uso de un escáner de luz estructurada. Trabajo Fin de Grado, Universidad de Jaén
- Mataró Villacampa, J. (2022). Diseño de una motocicleta mediante técnicas de ingeniería inversa. Trabajo Fin de Grado, Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona

- Fabian, M., Huňady, R., & Kupec, F. (2022). Reverse engineering and rapid prototyping in the process of developing prototypes of automotive parts. Manufacturing Technology, 22(6), 669–676. https://doi.org/10.21062/mft.2022.084
- Graba, M., & Grycz, A. (2024). Application of finite element method in industrial design, example of an electric motorcycle design project. Open Engineering, 14, 20220569. https://doi.org/10.1515/eng-2022-0569
- Bevan, P. (2017). Design for additive manufacturing. Siemens PLM Connection, Indianapolis, May 8–12. Siemens AG

ANEXOS

Introducción

El sector de la automoción, y en particular el de las motocicletas, se encuentra en un proceso continuo de innovación con el fin de optimizar el rendimiento, la seguridad y la eficiencia de sus componentes. El basculante constituye una pieza clave en este contexto, al unir el tren trasero con el chasis y garantizar la estabilidad y el comportamiento dinámico del vehículo. Tradicionalmente se ha fabricado con métodos convencionales centrados en la rigidez y la durabilidad, pero las crecientes exigencias de emisiones y por tanto aligeramiento, han impulsado la aplicación de tecnologías avanzadas como la optimización topológica, el diseño generativo y las estructuras lattice.

El proyecto plantea como objetivos digitalizar un basculante existente, optimizar su mallado y emplear técnicas de optimización topológica para reducir su peso manteniendo resistencia y rigidez. Asimismo, se exploran geometrías mediante diseño generativo, se incorporan estructuras lattice para mejorar la relación peso-resistencia y se valida el diseño final con simulaciones de elementos finitos y prototipado mediante impresión 3D.

El alcance se centra en el diseño y análisis estructural mediante herramientas CAD y FEA (SolidWorks y VX), aplicando procesos de optimización y exploración de estructuras complejas como Voronoi, Gyroid o Octet. Se contempla la validación del diseño con técnicas de fabricación aditiva disponibles en la Universidad Pontificia Comillas (FDM, SLA, SLS o filamentos reforzados con fibra), teniendo en cuenta las limitaciones de tamaño, materiales y postprocesado que estas tecnologías implican. Si bien los prototipos permiten demostrar la viabilidad de la solución a escala, la fabricación en tamaño real podría requerir tecnologías adicionales.

Además de su componente técnico, el proyecto se alinea con los **Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)**. En concreto, contribuye al ODS 9 fomentando la innovación industrial y el uso de nuevas metodologías de diseño; al ODS 12, promoviendo un consumo responsable mediante la reducción de material; al ODS 13, al disminuir el impacto ambiental y energético de los componentes optimizados; y al ODS 8, al impulsar la especialización tecnológica y la creación de empleo en sectores de alto valor añadido.

El TFM se alinea con el Máster en Motorsport, Movilidad y Seguridad (M2S) al aplicar conocimientos de dinámica de vehículos, simulación estructural y materiales avanzados al rediseño de un basculante de motocicleta. La integración de optimización topológica, diseño generativo y estructuras lattice refleja la orientación del máster hacia la innovación en competición, la movilidad sostenible y la seguridad en automoción.

Estado del arte

El estado del arte en el ámbito de la ingeniería de diseño se apoya en tres ejes fundamentales: la ingeniería inversa, la impresión 3D y el diseño generativo con estructuras lattice. La ingeniería inversa se ha consolidado como una herramienta clave en numerosos sectores al permitir la digitalización precisa de objetos físicos mediante tecnologías como el escaneado 3D y la metrología avanzada. Esta práctica facilita la creación de modelos CAD fiables, lo que

resulta esencial cuando no existe documentación técnica o se requieren mejoras sobre componentes ya existentes. Gracias a la digitalización, es posible acelerar procesos de rediseño, optimización, calidad y validación de productos, aumentando la exactitud y reduciendo los tiempos de desarrollo.

Por su parte, la fabricación aditiva o impresión 3D ha transformado la producción al posibilitar la construcción de piezas capa por capa a partir de modelos digitales. Frente a los métodos tradicionales, ofrece ventajas significativas como la creación de geometrías complejas, la reducción de material desperdiciado y la personalización masiva. Actualmente se dispone de diversas tecnologías de impresión adaptadas a polímeros, metales y cerámicas, lo que amplía sus aplicaciones desde la prototipación rápida hasta la fabricación de componentes funcionales en sectores de alta exigencia. Pese a estas ventajas, la impresión 3D aún se enfrenta a limitaciones como la velocidad de producción, la necesidad de postprocesos y los elevados costes en materiales avanzados.

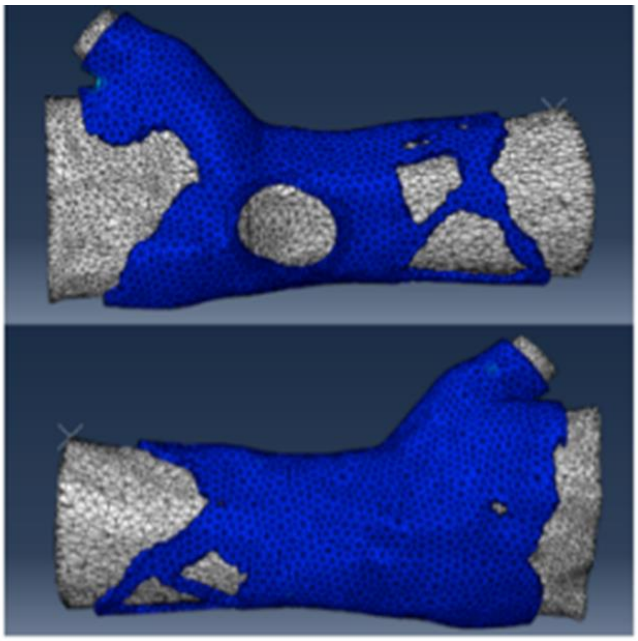


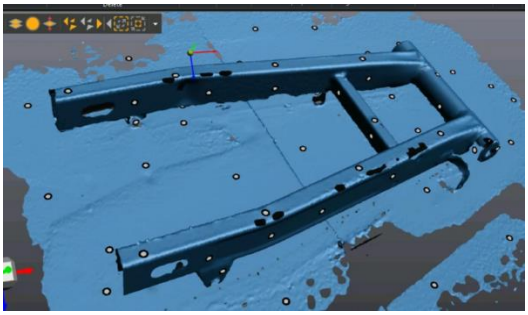
Ilustración 89 Férula de muñeca optimizada topologicamente

En este contexto, el diseño generativo surge como un enfoque nuevo basado en algoritmos y optimización topológica, que permite explorar múltiples alternativas geométricas en función de restricciones de carga, rigidez o peso. A diferencia de los métodos convencionales, no se limita a la intuición del diseñador, sino que aprovecha la capacidad computacional para iterar hasta generar soluciones eficientes en cuanto a uso de material y rendimiento mecánico. Esta metodología cobra especial relevancia en combinación con la fabricación aditiva, pues habilita la producción de formas no realizables con técnicas tradicionales. Entre las variantes más destacadas se encuentran las estructuras lattice, configuraciones periódicas tridimensionales que mejoran la relación resistencia-peso, optimizan la disipación térmica y permiten un uso más eficiente de los recursos. El interés actual se centra en su integración con métodos de simulación y optimización para obtener componentes más ligeros, sostenibles y de mayor rendimiento.

Desarrollo

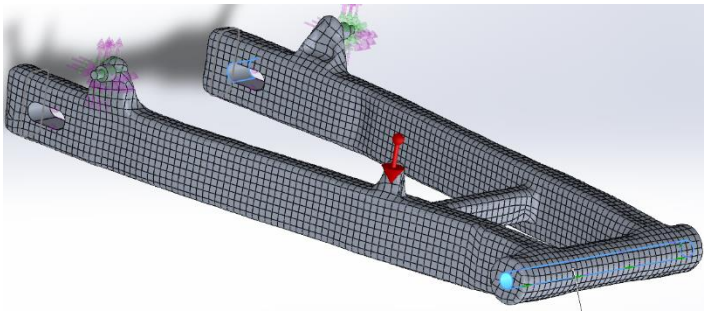
El desarrollo del basculante optimizado comenzó con la ingeniería inversa de la pieza original mediante el escáner 3D GO!SCAN 50, seleccionado por su capacidad para trabajar con componentes de gran tamaño. El proceso de escaneo permitió obtener nubes de puntos desde distintos ángulos, generando un modelo detallado de la geometría.

Posteriormente, los datos fueron tratados en el software VXmodel, donde se realizó una limpieza de las mallas para eliminar ruido y puntos aislados que no aportaban información relevante. Una vez depurados, se alinearon cuidadosamente los diferentes escaneos para garantizar su coherencia espacial, utilizando la herramienta Best Fit y verificando la continuidad de las zonas de contacto.

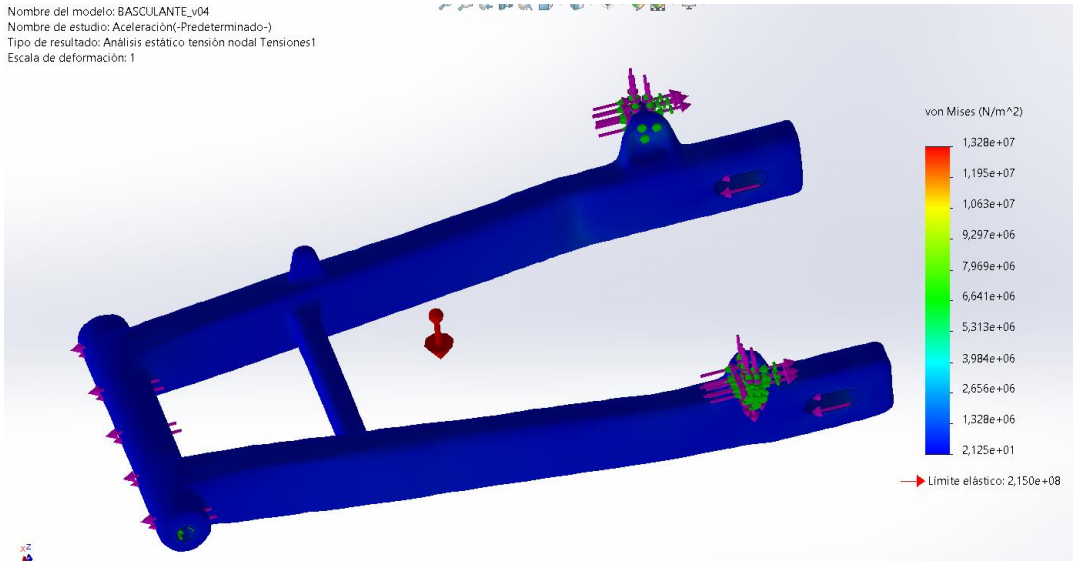


Con las mallas alineadas, se procedió a fusionarlas en un único modelo tridimensional, lo que permitió integrar toda la información recogida y obtener una representación completa y precisa del basculante. En esta fase también se aplicaron correcciones automáticas y manuales para cerrar posibles huecos y resolver discontinuidades, asegurando una superficie uniforme y lista para las siguientes etapas de optimización.

Tras finalizar el procesado geométrico en VXelements y obtener un modelo digital limpio y consistente del basculante, se procedió a su importación en Solid Edge con el fin de llevar a cabo el análisis por elementos finitos (FEM).



El basculante, al ser un elemento estructural esencial fue simulado en diferentes escenarios de carga, siendo los principales la aceleración y el paso por curva. En el estado de aceleración se consideró tanto la carga estática como la fuerza longitudinal derivada de la transmisión del par motor mediante la cadena. En el caso de la curva, se introdujo la transferencia de carga lateral debida a la inclinación, estimando un reparto del 70 % en el lado interior y un 30 % en el exterior, con un ángulo de 40°. Para reproducir con fidelidad el comportamiento real, fue necesario definir adecuadamente las condiciones de contorno. Una vez definidos los materiales, cargas y restricciones, se generó la malla.

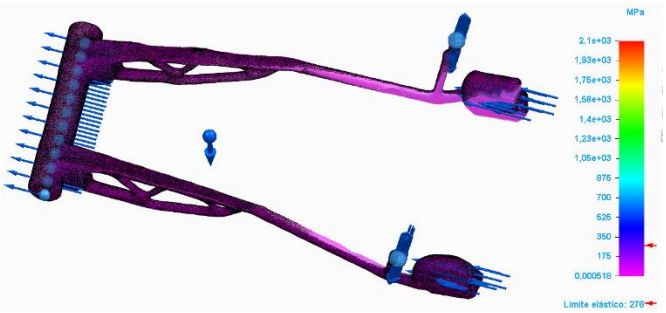


El análisis de tensiones de Von Mises bajo el estado de aceleración mostró valores muy por debajo del límite elástico ($2{,}15 \cdot 10^8$ N/m²), lo que sugiere que el diseño está sobredimensionado y presenta un alto coeficiente de seguridad. Las zonas más solicitadas se concentraron en los puntos de unión con la suspensión trasera. En cuanto a los desplazamientos, se obtuvo un máximo de 7,5 mm, localizado principalmente en los extremos.

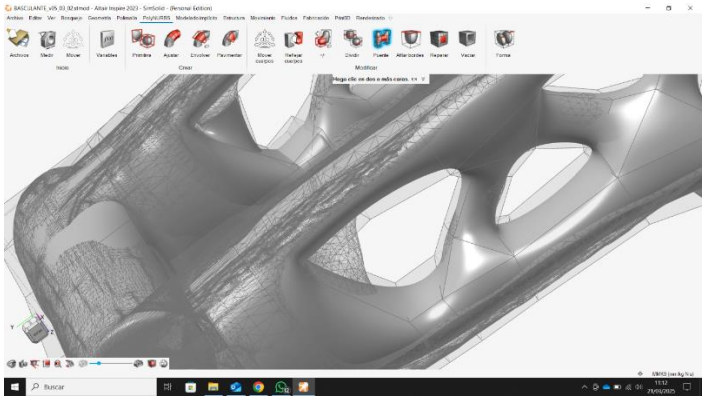
En el escenario de curva, los resultados confirmaron un comportamiento mucho menos exigente. Las tensiones alcanzaron un máximo de $5{,}85 \cdot 10^5$ N/m² frente al límite elástico del material ($2{,}75 \cdot 10^8$ N/m²), lo que representa un amplio margen de seguridad. El desplazamiento máximo fue del orden de $6{,}48 \cdot 10^{-4}$ mm, prácticamente despreciable en comparación con la

aceleración. Esto permite concluir que la aceleración constituye el estado de carga más crítico y, por tanto, el que debe tomarse como referencia para la optimización topológica.

Estos resultados constituyen la base para iniciar iteraciones de diseño mediante métodos de optimización. A partir del modelo FEM se busca reducir masa en aquellas regiones de baja solicitación, garantizando que las zonas críticas conserven la rigidez y resistencia necesarias. Este proceso iterativo tiene en cuenta las propiedades del material, las restricciones impuestas y las cargas definidas, verificando en cada ciclo que las tensiones no superan el límite elástico y que los desplazamientos se mantienen dentro de márgenes admisibles. De este modo, se orienta el diseño hacia un basculante más ligero y eficiente, sin comprometer la seguridad ni la estabilidad de la motocicleta.

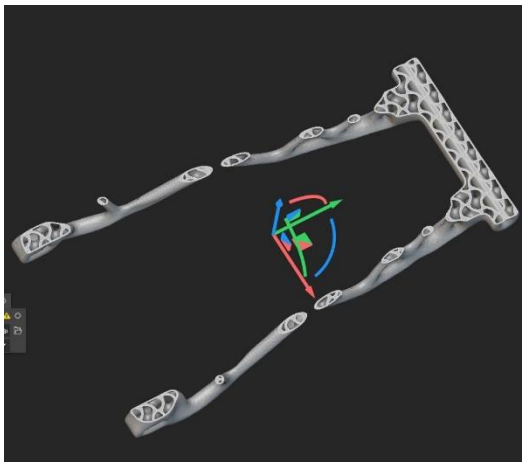


El empleo de PolyNURBS es imprescindible para convertir la geometría orgánica obtenida en la optimización topológica en un modelo CAD utilizable. De este modo, se consigue un modelo más cercano a un componente real, listo para ser ajustado y refinado en función de las necesidades técnicas y de fabricación. Finalmente, el modelo refinado se valida de nuevo mediante simulaciones FEM bajo las mismas condiciones de carga y contorno empleadas en los análisis previos.



Para la fase de relleno interno del basculante se empleó el software Ntopology (nTop), especializado en la generación de estructuras lattice.

El flujo de trabajo comienza con la importación del modelo CAD optimizado y su conversión a un cuerpo implícito. Posteriormente, se aplica un bloque Shell que define una carcasa externa con un espesor concreto, vaciando el interior de la pieza y preparando el volumen para el relleno. A partir de ahí, se genera la red interna, se integran el contorno externo y el entramado.



Análisis de costes

En la fase final del proyecto se abordó un análisis de costes con el objetivo de cuantificar el impacto económico de las distintas versiones del basculante: el modelo inicial, el optimizado topológicamente y los prototipos con relleno lattice. Para ello, se seleccionó como método de

fabricación la tecnología DMLS (Direct Metal Laser Sintering), dado que es la más adecuada para obtener piezas metálicas capaces de soportar elevadas exigencias mecánicas.

El estudio económico contempló tres bloques principales de costes: amortización de la máquina, material empleado y tiempo técnico asociado. Por último, se añadieron los costes de personal técnico vinculados a la preparación de los archivos y las tareas de postprocesado.

En el caso del prototipo optimizado topológicamente, se obtuvo un volumen de 972 cm^3 (9.720 cm^3 a escala real) y un tiempo estimado de fabricación de 50 horas para la pieza a tamaño real. Con estos valores se calcularon los costes finales, que incluyen tanto el consumo de material como las horas de impresión. Los modelos con relleno lattice, tanto el de tipo Body Centered Cubic como el TPMS Gyroid, mostraron ligeras reducciones de material frente al modelo optimizado, pero un incremento significativo en el tiempo de fabricación debido a la complejidad geométrica.

Conclusiones

Los resultados pusieron de manifiesto una tendencia clara: aunque la optimización topológica y el uso de estructuras lattice permiten una notable reducción de masa y una mejora en la relación resistencia/peso, desde el punto de vista económico no siempre resultan competitivas. El ahorro en material no compensa el aumento de horas de impresión lo que encarece el coste unitario. De este modo se concluye que estas tecnologías encuentran su mayor aplicación en prototipos únicos o en sectores donde la ligereza extrema justifica el sobrecoste, como en automoción de alto rendimiento o aeronáutica.

Relación con M2S

El trabajo de fin de máster se conecta de manera directa con varias asignaturas del programa de Motorsport, Movilidad y Seguridad, ya que en su desarrollo se aplicaron herramientas y metodologías trabajadas durante el curso. En primer lugar, la modelización estructural y las simulaciones realizadas en Solid Edge y Ansys guardan relación con Structural Modelling and

FEA y con el bloque de Powertrain, donde aprendimos a generar mallas, definir condiciones de contorno y validar resultados bajo diferentes escenarios de carga.

Por otra parte, el proyecto se vinculó con Technologies and Methods, asignatura en la que se abordaron procesos de fabricación como la impresión 3D. En el TFM, este conocimiento resultó esencial tanto en la elección de DMLS como método de prototipado como en el análisis de costes asociados. También fue clave el uso de escaneado 3D y el software de postprocesado, en Technologies and Methods. El empleo de VXmodel para limpiar y reconstruir la nube de puntos del basculante fue un paso imprescindible antes de importar el modelo a Solid Edge, y refleja la importancia de dominar herramientas de digitalización para integrar geometrías reales en un flujo de trabajo de simulación y optimización.

.