



MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Análisis y optimización del proceso de diseño y producción de un chasis de bicicleta infantil mediante la utilización de criterios de optimización topológica y tecnologías de impresión 3D

Autor: Santiago Martínez Lorente

Director: Mariano Jiménez Calzado

Co-Director: Iñigo Manrique Bautista

Madrid

Agosto 2024

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título

**ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE DISEÑO Y PRODUCCIÓN DE UN
CHASIS DE BICICLETA INFANTIL MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DE CRITERIOS
DE OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA Y TECNOLOGÍAS DE IMPRESIÓN 3D**

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el curso académico
2023/24 es de mi autoría, original e inédito y no ha sido presentado con anterioridad a otros
efectos.

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

Fdo.: Santiago Martínez Lorente - Fecha: 20/ 08/2024



Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO



Fdo.: Mariano Jiménez Calzado - Fecha: 22 /08/2024



Fdo.: Iñigo Manrique Bautista – Fecha: 22 /08/2024



MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Análisis y optimización del proceso de diseño y producción de un chasis de bicicleta infantil mediante la utilización de criterios de optimización topológica y tecnologías de impresión 3D

Autor: Santiago Martínez Lorente

Director: Mariano Jiménez Calzado

Co-Director: Iñigo Manrique Bautista

Madrid

Agosto 2024

Agradecimientos

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mi tutor, el profesor Dr. Mariano Jiménez Calzado por su inestimable apoyo, paciencia y dedicación durante todo el proceso de la elaboración del presente trabajo y recta final de mis estudios de ingeniería industrial en la Universidad Pontificia de Comillas ICAI. Quisiera también agradecer a la profesora del departamento de ingeniería mecánica: Dña. Silvia Fernández Villamarín por su apoyo y dedicación al proyecto, sin su apoyo el proyecto no habría finalizado con el éxito con el que lo ha hecho.

Quisiera agradecer también el enorme apoyo de mi familia en estos años de estudios en los que me han visto sufrir y celebrar todos los retos que una carrera como la ingeniera industrial presentan.

Quisiera agradecer el apoyo de todos los amigos y ahora familia que he ido formando a lo largo de los estudios que siempre han estado a mi lado apoyándome.

ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE DISEÑO Y PRODUCCIÓN DE UN CHASIS DE BICICLETA INFANTIL MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DE CRITERIOS DE OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA Y TECNOLOGÍAS DE IMPRESIÓN 3D

Autor: Martínez Lorente, Santiago.

Director: Jiménez Calzado, Mariano.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO

El presente trabajo consiste en el análisis y optimización del proceso de diseño y producción de un chasis de bicicleta infantil mediante la utilización de criterios de optimización topológica y tecnologías de impresión 3D. El alcance del proyecto incluye: la propuesta de un flujo de trabajo acorde a las especificaciones del proyecto, el escaneo 3D de un chasis de bicicleta, la optimización topológica del modelo escaneado y la fabricación de un prototipo de chasis mejorado.

Palabras clave: Bicicleta, Chasis, Ingeniería Inversa, Escaneo 3D, Diseño generativo, Optimización topológica, Fabricación aditiva, Impresión 3D.

1. Introducción

El mundo del diseño de producto está en constante evolución. Esto permite evaluar la aplicación de nuevas tecnologías al proceso de diseño y producción de un chasis. Durante este proyecto se ha investigado la incorporación de nuevas herramientas como el escaneo 3D y se ha estudiado la optimización topológica en un chasis de bicicleta para mejorar su rendimiento. A lo largo del proyecto se han realizado simulaciones con el método de elementos finitos para evaluar el progreso de las iteraciones de optimización. Y finalmente tras conseguir un modelo con una importante reducción de masa y con un estructura que garantizaba su resistencia y rigidez, se ha podido aplicar la tecnología de fabricación aditiva para llevar los progresos a la realidad con prototipos.

2. Definición del Proyecto

El proyecto ha seguido el diagrama de flujo que se presenta en la Ilustración 1. En él, se detallan las tareas realizadas a lo largo del trabajo final de máster. Se ha comenzado realizando un estudio de las soluciones que ofrecen las distintas tecnologías involucradas en el proyecto. Tras este análisis se ha realizado una propuesta, en la cual se escogía un chasis de bicicleta existente en el mercado para realizarle la optimización topológica. Para poder realizar la optimización se ha estudiado la norma de requisitos de seguridad para cuadros de bicicletas. Se ha llevado a cabo un estudio de dos ensayos que la norma indica para la evaluación de la seguridad en el chasis. Una vez realizados los análisis con el método de elementos finitos se ha decidido continuar con el ensayo más exigente para el chasis, el que somete a mayor esfuerzo al cuadro de bicicleta.

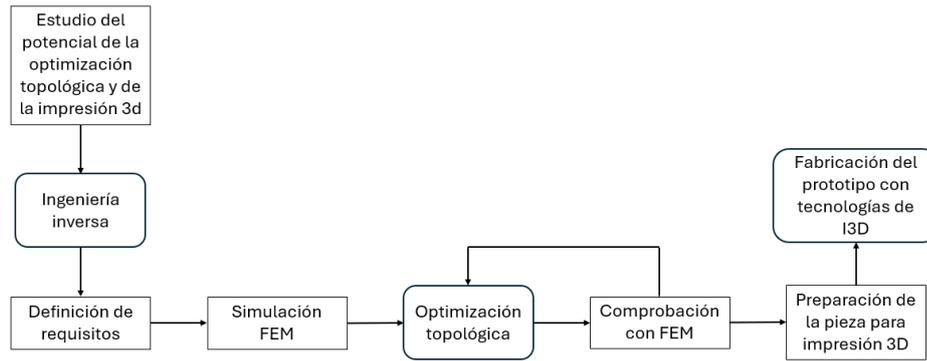


Ilustración 1 Diagrama de flujo, fuente propia

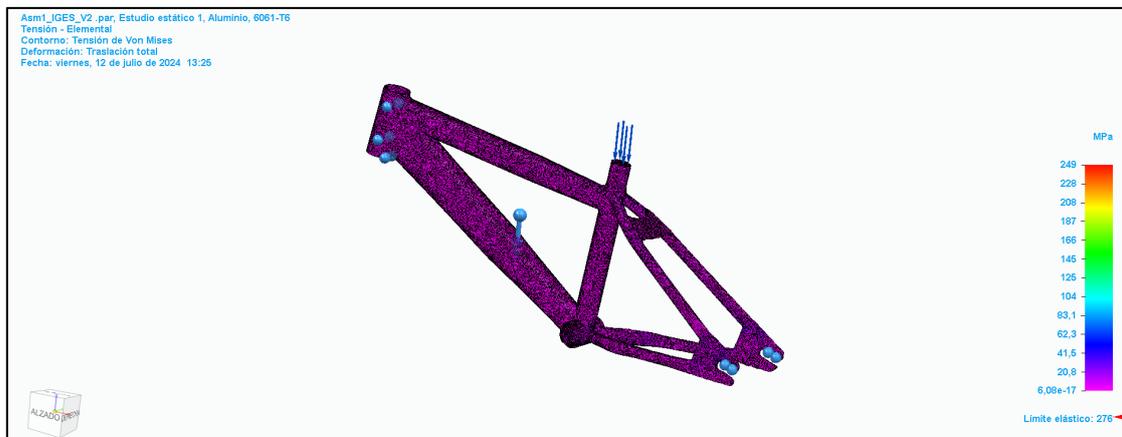


Ilustración 2 Estudio estático con la fuerza en sillín (diagrama de esfuerzos), fuente propia

Tras definir las condiciones de contorno y las cargas, de nuevo se ha pasado a la tarea de la optimización topológica. La carga escogida ha sido la propuesta por la norma siendo esta $P=1200$ N aplicada en el sillín. En esta etapa del proyecto se han llevado a cabo numerosas iteraciones con el objetivo de conseguir un diseño que reduzca la masa y garantice la seguridad estructural del chasis. Tras llegar a la geometría optimizada que ofrecía una máxima reducción de masa sin perder resistencia, se realiza un análisis por elementos finitos para evaluar su rendimiento. Con un diseño optimizado se pasa a la etapa siguiente, el trabajo de preparación del chasis para su impresión en 3D. Para ello se suaviza la geometría con el objetivo de conseguir un acabado de producto final. Tras elegir una tecnología de impresión apropiada para el prototipo se ha lanzado el modelo en la impresora. Por limitaciones técnicas se han impreso los modelos en escala 1:2. Los modelos son dos, el primero de ellos el cuadro original escaneado y el segundo el cuadro optimizado, Ilustración 5.

3. Descripción del modelo/sistema/herramienta

Las herramientas empleadas para cumplir todos los objetivos del proyecto han sido las siguientes: un escáner 3D de luz blanca acompañado de un programa para el trabajo de edición de la malla de puntos escaneada VXEelements (Ilustración 3), el programa SolidEdge para la edición del modelo CAD y para la optimización topológica, programa de referencia para el diseño generativo y optimización de piezas y finalmente la impresora HP MFJ 580c para la fabricación de los prototipos..

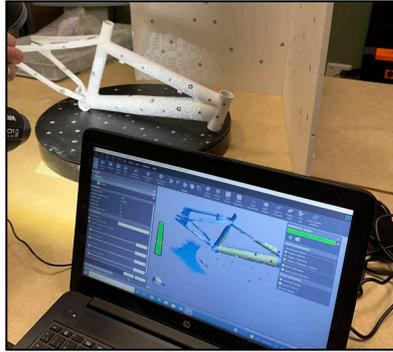


Ilustración 3 Sesión de escaneo del chasis de bicicleta, fuente propia

4. Resultados

El resultado de este proyecto es un diseño optimizado de la geometría escaneada. Para llegar a conseguir esta geometría se han necesitado nueve iteraciones principales. Tras el largo proceso de iteración se obtiene un diseño con una reducción de masa del 35% para una carga de 1200N. Una vez suavizada la geometría y realizado el último análisis elementos finito para confirmar que el diseño (Ilustración 4) es válido, se ha procedido a la fabricación del prototipo (Ilustración 5). Estos prototipos a escala 1:2 se han impreso por fusión en lecho de polvo, en PA12, con la tecnología HP MJF.

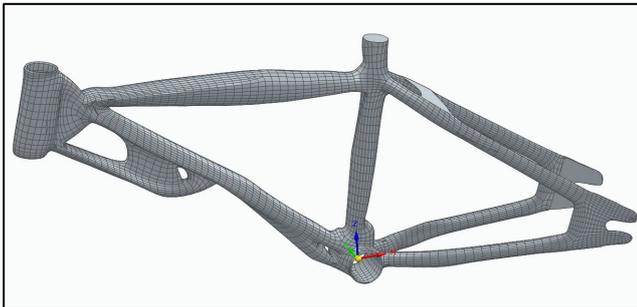


Ilustración 4 Modelo optimizado con geometría suavizada, fuente propia



Ilustración 5 Chasis impresos en 3D, fuente propia

5. Conclusiones

El escaneo del chasis original ha resultado ser un éxito, permitiendo tener un diseño de partida bien detallado y correctamente definido. La optimización topología ha permitido alcanzar una reducción de peso considerable, con un chasis un 35% más ligero manteniendo la resistencia. Los costes de producción no han resultado los esperados, superando con creces los costes de la fabricación tradicional, limitando esta tecnología solo a la fabricación de chasis personalizado para ciclistas que necesiten el máximo rendimiento. Durante la realización del proyecto se desarrollaron habilidades en el escaneo de piezas, el tratado de mallas, el análisis de elementos finitos, la aplicación de la metodología de optimización topológica y fabricación aditiva.

ANALYSIS AND OPTIMIZATION OF THE DESIGN AND PRODUCTION PROCESS OF A CHILDREN'S BICYCLE CHASSIS THROUGH THE USE OF TOPOLOGICAL OPTIMIZATION CRITERIA AND 3D PRINTING TECHNOLOGIES

Author: Martínez Lorente, Santiago.

Supervisor: Jiménez Calzado, Mariano.

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

RESUME OF THE PROYECT

This work involves the analysis and optimization of the design and production process of a child's bicycle chassis using topological optimization criteria and 3D printing technologies. The scope of the project includes: the proposal of a workflow according to the project specifications, the 3D scanning of a bicycle chassis, the topological optimization of the scanned model and the manufacturing of an improved chassis prototype.

Keywords: Bicycle, Chassis, Reverse engineering, 3D scanning, Generative design, Topology optimization, Additive manufacturing, 3D printing.

1. Introduction

The world of product design is constantly changing. This allows us to evaluate the application of new technologies to the design and production process of a chassis. During this project, the incorporation of new tools such as 3D scanning and the topological optimization have been investigated in a bicycle chassis to improve its efficiency. Throughout the project, simulations have been carried out using the finite element method to evaluate the progress of the optimization iterations. Finally, after achieving a model with a significant mass reduction and with a structure that guaranteed its strength and rigidity, additive manufacturing technology has been applied to bring the progress to reality with prototypes.

2. Definition del Proyecto

The project has followed the flow chart presented in Illustration 1. It details the tasks that have been done throughout the master's thesis. It began by carrying out a study of the solutions offered by the different technologies involved in the project. After this analysis, a proposal was made, in which an existing bicycle frame on the market was chosen to perform topological optimization. In order to do it, the safety requirements standard for bicycle frames was studied. A study of two tests that the standard indicates for the evaluation of safety in the frame was carried out. Once the analyses with the finite element method had been realized, the study continued with the most demanding test for the frame, which brings the bicycle frame under greater stress.

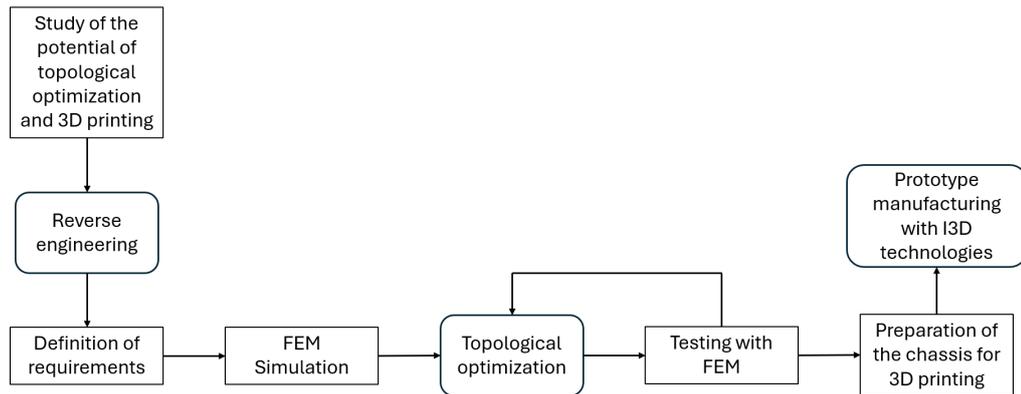


Ilustración 1 Flow diagram

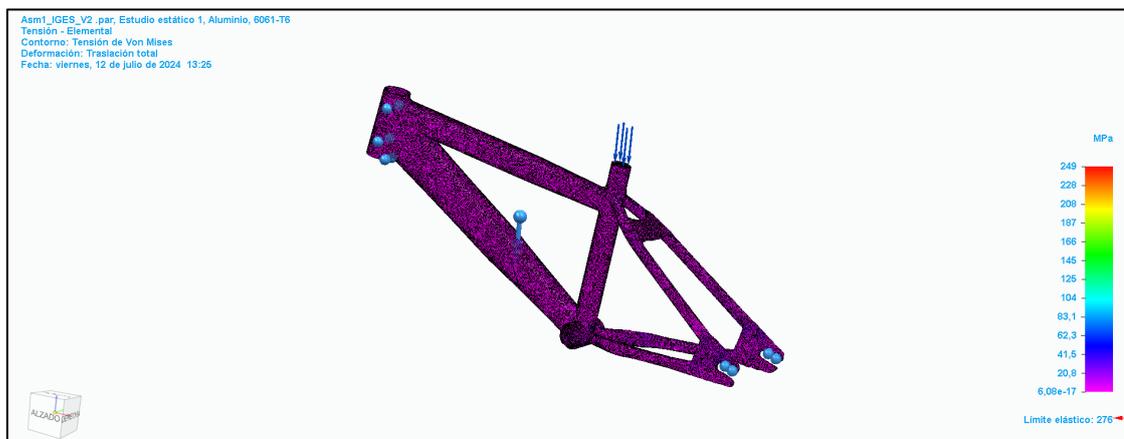


Illustration 2 Static study with strength in the saddle (effort diagram), own source

After defining the boundary conditions and loads, the task of topological optimization has been redone. The load chosen has been the one proposed by the standard, $P=1200$ N applied to the saddle. In this stage of the project, numerous iterations have been realized in order to achieve a design that reduces mass and guarantees the structural safety of the chassis. After reaching the optimized geometry that offered a maximum reduction in mass without losing strength, a finite element analysis has been done to evaluate its efficiency. Once the design has been optimized, the next stage was to prepare the chassis for 3D printing. In order to do it, the geometry has been smoothed achieving a final product finish. After choosing an appropriate printing technology for the prototype, the model has been launched on the printer. Due to technical limitations, the models have been printed in 1:2 scale. The two models, showed in Illustration 5, are the original scanned frame, in the front and the optimized frame, in the back.

3. Description of the model/system/tools

The tools used to fulfill all the project objectives have been the following: a white light 3D scanner accompanied by a program to edit the scanned point mesh VXelements (Illustration 8), SolidEdge 2023 used to edit the CAD model and for topological optimization, a reference program for generative design and optimization of parts and HP MFJ 580c printer for the manufacture of the prototypes.

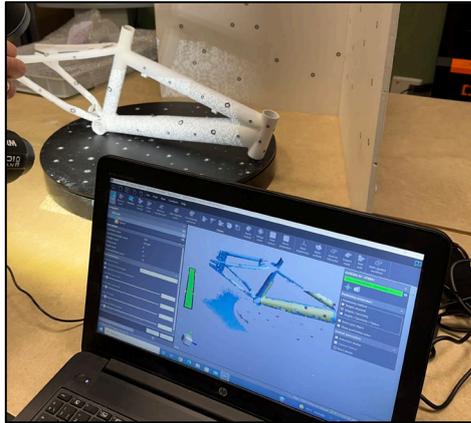


Illustration 3 Bike chassis scan session, own source

4. Results

The result of this project is an optimized design of the scanned geometry. Nine main iterations have been realized to achieve this geometry, obtaining a design with a mass reduction of 35% for a load of 1200 N. Once the geometry was smoothed and the last finite element analysis was carried out, confirming that the design (Illustration 10) was valid, the prototype was manufactured (Illustration 9). These 1:2 scale prototypes have been elaborated by powder bed fusion, in PA12, with HP MJF technology.

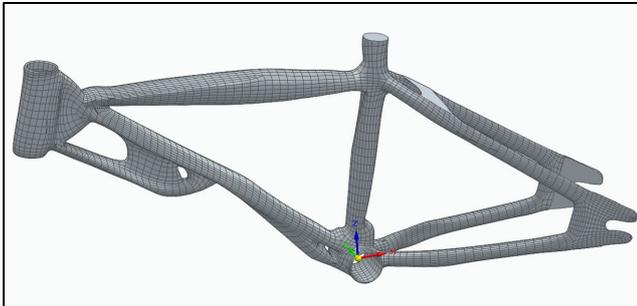


Illustration 4 Optimized model with smoothed geometry, own source



Illustration 5 3D printed chassis, own source

5. Conclusions

The scanning of the original chassis was a success, allowing for a well-detailed and correctly defined initial design. Topological optimization has achieved a considerable weight reduction, with a chassis 35% lighter while maintaining strength. Production costs have not been the expected, exceeding by far those of traditional manufacturing, limiting this technology only to the manufacture of customized chassis for cyclists requiring maximum efficiency. During the project, skills in part scanning, mesh processing, finite element analysis, application of topological optimization methodology and additive manufacturing have been developed.

Índice de la memoria

Capítulo 1. Introducción	10
1.1 Optimización topológica y escaneo 3D.....	10
1.2 Motivación del proyecto.....	12
1.3 Objetivos del proyecto.....	14
1.4 Alineación con los objetivos de desarrollo sostenibles (ODS).....	15
1.5 Metodología de trabajo.....	17
Capítulo 2. Estado del arte y de la cuestión.....	18
2.1 Cuadro de la bicicleta.....	18
2.2 Proceso de diseño	24
2.3 Ingeniería inversa y escaneo 3D.....	27
2.3.1 Métodos de escaneo 3D.....	29
2.3.2 Etapas en la metodología a seguir en el escaneo 3D.....	30
2.4 Diseño generativo.....	33
2.5 Optimización topológica	36
2.5.1 Ejemplos de proyectos con Optimización topológica.....	38
2.5.2 Matemáticas detrás de la optimización topológica.....	40
2.6 Método de elementos finitos	41
2.6.1 Metodología del análisis de elementos finitos.....	44
2.7 Fabricación aditiva	50
Capítulo 3. Propuesta del proyecto	53
3.1 Geometría.....	53
3.2 Material	55
3.3 Condiciones de contorno.....	57
3.4 Cargas.....	58
3.4.1 Ensayo 1: Fuerza aplicada en el eje del pedalier	59
3.4.2 Ensayo 2: Fuerza aplicada en el sillín.....	60
Capítulo 4. Desarrollo del trabajo.....	62
4.1 Propuesta de un proceso de diseño y fabricación.....	62
4.2 Escaneo de la geometría.....	64

4.3	Trabajo de la nube de puntos y del mallado	69
4.4	Conversión a nurbs.....	79
4.5	Trabajo de diseño en el solido.....	81
4.6	Asignación del material.....	85
4.7	Asignación de cargas y restricciones.....	86
4.8	Simulación FEM.....	87
4.8.1	<i>Simulación del ensayo con fuerza ubicada en el eje del pedalier</i>	<i>87</i>
4.8.2	<i>Simulación del ensayo con fuerza ubicada en el sillín.....</i>	<i>88</i>
4.8.3	<i>Conclusión de los ensayos.....</i>	<i>89</i>
4.9	Optimización del cuadro	91
4.10	Refinado de la geometría.....	108
4.11	Comprobación de la nueva geometría con fem	110
Capítulo 5. Fabricación de un prototipo.....		113
5.1	Tecnologías de impresión 3D.....	113
5.2	Metodología de la fabricación aditiva (impresión 3D).....	118
5.3	Impresión del prototipo en 3D y preparación del prototipo	119
Capítulo 6. Análisis de Resultados.....		126
6.1	Presupuestos	126
6.1.1	<i>Coste de los prototipo en PA12</i>	<i>126</i>
6.1.2	<i>Coste de fabricación en aluminio 6061-T6</i>	<i>128</i>
6.2	Análisis y comparativa	130
Capítulo 7. Conclusiones y Trabajos Futuros.....		132
Capítulo 8. Bibliografía.....		135
ANEXO I		

Índice de figuras

Figura 1 ODS Industria, innovación e infraestructuras, [1]	15
Figura 2 ODS Producción y consumo responsable, [1]	16
Figura 3 Tipos de bicicletas y sus cuadros [4]	19
Figura 4 Cuadro de fibra de carbono [5]	20
Figura 5 Bicicleta Canyon Bikes por impresión 3D, [7]	21
Figura 6 Bicicleta Canyon Bikes Optimización topológica, [7].....	21
Figura 7 Bicicleta escogida para el proyecto, fuente propia.....	22
Figura 8 Cuadro de la bicicleta limpio, fuente propia	23
Figura 9 Cuadro de la bicicleta desmontado y limpio, fuente propia.....	23
Figura 10 Proceso de desarrollo de productos Ford, [8].....	24
Figura 11 Proceso de diseño modelo French, [8]	25
Figura 12 Ciclo de diseño de producto tradicional, fuente propia.....	26
Figura 13 Escaneo de piezas con escáner 3D, [9]	27
Figura 14 Resumen de los métodos de escaneo, [11].....	30
Figura 15 Etapas del escaneo 3D y procesado de datos, fuente propia	32
Figura 16 Proceso de diseño clásico [13]	34
Figura 17 Proceso con diseño generativo [13]	35
Figura 18 Flujo de trabajo para optimización topológica, fuente propia.....	37
Figura 19 BMW S1000RR con chasis optimizado [15].....	38
Figura 20 Chasis BMW optimizado e impreso en 3D [15]	39
Figura 21 Brazos oscilantes Renault Trucks optimizados [16]	39
Figura 22 Bloque motor Renault diseñado con optimización topológica [16].....	40
Figura 23 Elementos y nodos del cuadro de bicicleta I, fuente propia.....	42
Figura 24 Elementos y nodos del cuadro de bicicleta II, fuente propia	43
Figura 25 Izquierda, modelo en CAD y a la derecha el modelo mallado con elementos tetraédricos.....	46
Figura 26 Fabricación aditiva, Prótesis personalizada para pacientes [20].....	51

Figura 27 Giroscopio impreso en una solo vez (no requiere montaje), fuente: librería de archivos Pngwing	51
Figura 28 Bicicleta infantil de montaña escogida para el proyecto, fuente propia	53
Figura 29 Cuadro desmontado y limpio, fuente propia	53
Figura 30 Perfil del modelo CAD en SolidEdge, Fuente propio.....	54
Figura 31 Modelo CAD 3D del cuadro de bicicleta escaneado, fuente propia	54
Figura 32 Condiciones de contorno del cuadro, fuente propia.....	57
Figura 33 Ejemplo de la representación de la fijación de la articulación en el eje trasero en SolidEdge, fuente propia	57
Figura 34 Esquema para el ensayo del cuadro con Fuerza en el eje del pedalier [21]	59
Figura 35 Esquema simplificado para el ensayo del cuadro con Fuerza en el eje del pedalier	59
Figura 36 Esquema simplificado para el ensayo del cuadro con Fuerza en el sillín	60
Figura 37 Disposición de la fuerza en los ejes x,y,z, fuente propia	61
Figura 38 Ciclo de diseño de un producto enfocado a impresión 3d y optimización topológica, fuente propia	62
Figura 39 Escáner GO!SCAN 50, fuente Web Creaform	64
Figura 40 Cuadro limpio preparado para aplicar espray, fuente propia	65
Figura 41 Aplicación del tratamiento anti-brillos, fuente propia	65
Figura 42 Cuadro preparado para el escaneo en mesa, fuente propia	66
Figura 43 Sesión de escaneo emisión de QRs, fuente propia.....	67
Figura 44 Sesión de escaneo con cuadro hacia arriba, fuente propia	68
Figura 45 Sesión de escaneo con cuadro hacia abajo, fuente propia.....	68
Figura 46 Nube de puntos sin trabajar con cuadro hacia abajo, fuente propia.....	69
Figura 47 Nube de puntos sin trabajar con el cuadro hacia arriba, fuente propia	70
Figura 48 Captura de pantalla de nube de puntos incompleta, fuente propia.....	70
Figura 49 Nube resultado de la unión de nubes incompletas, fuente propia	71
Figura 50 Proceso de eliminación de defecto mayor en nube de puntos, fuente propia	72
Figura 51 Selección de defectos asociado a las pegatinas de referencia, fuente propia.....	72
Figura 52 Eliminación de defectos de la nube de puntos	73

Figura 53 Proceso de eliminación de pico en la nube de puntos, fuente propia.....	73
Figura 54 Trabajo de suavizado y protección de zonas a tratar en SolidEdge, fuente propia	74
Figura 55 Elemento conflictivo en nube de puntos, fuente propia.....	75
Figura 56 Nube de puntos terminada y lista para el mallado, fuente propia.....	75
Figura 57 Colocación de planos y cilindros para el mallado Vxelementos, fuente propia .	76
Figura 58 Detalle de los planos del mallado, fuente propia	76
Figura 59 Mallado completo y selector de parámetros de mallado, fuente propia.....	77
Figura 60 Corrección de un cilindro en la malla, fuente propia.....	77
Figura 61 Malla cerrada en VXmodel, fuente propia.....	78
Figura 62 Flujo de trabajo de ingeniería inversa, Apuntes de ingeniería inversa ICAI [11]	79
Figura 63 Modelo CAD del escaneo de una única superficie	80
Figura 64 Modelo sólido del escaneo con superficie Nurbs.....	80
Figura 65 Solido recibido del escaneo y pasado por Altair para obtener una superficie Nurse, fuente propia.....	81
Figura 66 Planos para la edición de la pieza, fuente propia	81
Figura 67 Sólido con los planos más significativos empleados en el diseño final de la pieza, fuente propia.....	82
Figura 68 Placa de anclaje del freno trasero, fuente propia.....	82
Figura 69 Anclaje derecho del eje trasero, fuente propia.....	83
Figura 70 Eje del pedalier SolidEdge, fuente propia.....	83
Figura 71 Cuadro escaneado terminado, fuente propia	84
Figura 72 Vista superior del cuadro terminado, fuente propia.....	84
Figura 73 Cuadro escaneado modelo en aluminio 6061-T6.....	85
Figura 74 Asignación de cargas y restricciones, fuente propia	86
Figura 75 Estudio estático con fuerzas en pedalier (Esfuerzos), fuente propia.....	87
Figura 76 Estudio estático con fuerza en pedalier (Desplazamiento), fuente propia	88
Figura 77 Estudio estático con fuerza en sillín (Esfuerzos), fuente propia	88
Figura 78 Estudio estático con fuerza en sillín (Desplazamiento), fuente propia	89

Figura 79 Ensayo estático del cuadro con fuerza en sillín y aluminio 1060, fuente propia	90
Figura 80 Selección de regiones que preservar, fuente propia	91
Figura 81 Cargas, condiciones de contorno y regiones a preservar, fuente propia	92
Figura 82 Menú de selección de parámetros, Calidad 40 y Reducción de masa del 20% ..	94
Figura 83 Simulación fallida iteración N1, fuente propia	94
Figura 84 Menú de selección de parámetros, Calidad 150 y Reducción de masa del 20%	95
Figura 85 Simulación iteración N2, fuente propia	96
Figura 86 Iteración N2 defecto en soporte del eje trasero, fuente propia.....	97
Figura 87 Menú de selección de parámetros, Calidad 270 y Reducción de masa del 25%	98
Figura 88 Simulación iteración N6, fuente propia	98
Figura 89 Simulación de la iteración N6, fuente propia.....	99
Figura 90 Menú de selección de parámetros, Calidad 290 y Reducción de masa del 35%	100
.....	100
Figura 91 Simulación iteración N7, fuente propia	100
Figura 92 Menú de selección de parámetros, Calidad 290 y Reducción de masa del 45%	101
.....	101
Figura 93 Simulación iteración N8, fuente propia	102
Figura 94 Simulación de la iteración N9, fuente propia.....	103
Figura 95 Menú de selección de parámetros, Calidad 290 y Reducción de masa del 38%	103
.....	103
Figura 96 Simulación iteración N9, fuente propia	104
Figura 97 Defectos de la iteración N9, fuente propia.....	104
Figura 98 Resultado del proceso de optimización topológica con reducción de masa del 35%, fuente propia	106
Figura 99 Detalles geométricos de la solución generada por el estudio, fuente propia	106
Figura 100 Comparativa de geometrías antes y después de la optimización, fuente propia	107
Figura 101 Herramienta de Ajuste PolyNURBS en Altair Inspire [23]	108
Figura 102 Modelo CAD de SolidEdge en Altair, fuente propia	108
Figura 103 Reparación de la superficie PolyNurbs, fuente propia.....	109

Figura 104 Sólido refinado, fuente propia.....	109
Figura 105 Diagrama de esfuerzos de solido optimizado y suavizado, fuente propia	110
Figura 106 Diagrama de esfuerzos detalle en el eje de la dirección, fuente propia	111
Figura 107 Diagrama de esfuerzos detalle en el eje del pedalier, fuente propia.....	111
Figura 108 Diagrama de esfuerzos detalle en los soportes del eje trasero, fuente propia.	112
Figura 109 Impresión en SLA botton-up, fuente XometryPro.....	114
Figura 110 Funcionamiento de las impresoras FDM, fuente educa2Madrid	115
Figura 111 Impresora HP MultiJetFusion 580 c, Fuente: web HP.....	117
Figura 112 Funcionamiento de la impresión por fusión de lecho de polvo, fuente Dassault Systèmes.....	117
Figura 113 Metodología de la fabricación aditiva, fuente: Diapositivas de Tecnologías de la Fabricación 4º, ICAI [24].....	118
Figura 114 Opciones de exportación a STL, fuente propia.....	119
Figura 115 Captura de pantalla de HP SmartStream 3D build manager, fuente propia....	120
Figura 116 Última tirada de impresión del curso con ambos cuadros y más piezas de otros proyectos, fuente propia	121
Figura 117 Cuadro escaneado impreso en 3D por MJF, fuente propia.....	121
Figura 118 Cuadro optimizado (Reducción de masa del 35%), impreso en 3D por MJF, fuente propia.....	122
Figura 119 Cuadro optimizado (hacia abajo),impreso en 3D por MJF, fuente propia.....	122
Figura 120 Resultado esperado para el producto final, fuente propia.....	123
Figura 121 Aplicación de la imprimación en el cuadro fabricado por Impresión 3D, fuente propia.....	123
Figura 122 Cuadros con imprimación aplicada, fuente propia.....	123
Figura 123 Cuadros terminados I, Izq: cuadro escaneado Der: cuadro optimizado, fuente propia.....	124
Figura 124 Cuadros terminados II, Izq: cuadro escaneado Der: cuadro optimizado, fuente propia.....	124
Figura 125 Cuadro original 1:1 y cuadros por fabricación aditiva 1:2, fuente propia	124
Figura 126 Cuadro escaneado con masa de 144g, fuente propia.....	125

Figura 127 Cuadro optimizado con masa de 93g, fuente propia.....	125
Figura 128 Captura de pantalla de la factura de la impresión del 17/09/2024, fuente laboratorio de ICAI.....	126
Figura 129 Problema con el generador de presupuestos	128
Figura 130 Presupuesto I.MATERIALISE Fabricación impresión 3D aluminio, [26].....	129
Figura 131 Presupuesto PROTOLABS Fabricación impresión 3D aluminio, [27]	129
Figura 132 Comparativa de los prototipos del cuadro, fuente propia	131

Índice de tablas

Tabla 1 Métodos de mallado	47
Tabla 2 Métodos de mallado detallado, fuente propia en base a [19]	48
Tabla 3 Propiedades del Aluminio 6061-T6, Fuente Matweb	55
Tabla 4 Composición Aluminio 6061-T6, fuente Matweb	56
Tabla 5 Fuerza a aplicar ISO 4210-6:2015 4.3.2 [21]	59
Tabla 6 Fuerza a aplicar ISO 4210-6:2015 4.5.2.....	60
Tabla 7 Seleccionador de material en SolidEdge, Aluminio 6061-T6, fuente propia.....	85
Tabla 8 Comparativa de los resultados de los ensayos, fuente propia	89
Tabla 9 Recopilación de resultados de iteraciones , fuente propia.....	105
Tabla 10 Resumen de costes de fabricación en 3D en ICAI, fuente propia	126
Tabla 11 Análisis de costes del prototipo del cuadro escaneado (1:2).....	127
Tabla 12 Análisis de costes del prototipo del cuadro optimizado (1:2)	127
Tabla 13 Coste de la bicicleta en tienda, fabricada por métodos convencionales [25]	128
Tabla 14 Resumen de costes de fabricación, fuente propia en base a [26], [27], [25]	130

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

1.1 OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA Y ESCANEEO 3D

El desarrollo y diseño de productos en estos últimos años está sufriendo una revolución con la entrada de nuevas tecnologías en la industria. Entre estas nuevas tecnologías se encuentran el diseño generativo, la optimización topológica y el escaneo 3D.

El diseño generativo y la optimización topológica han cambiado el paradigma del ciclo de desarrollo de un producto, permitiendo a los ingenieros trabajar de manera más eficaz y llegar a tener resultados que son más innovadores y que de otra manera no se contemplarían. También ha permitido a los ingeniero rediseñar piezas y así mejorar el rendimiento de productos ya existentes en el mercado. El diseño generativo emplea algoritmos en las simulaciones para generar distintas alternativas al diseño inicial y posteriormente evaluar el desempeño de cada alternativa para seleccionar la que mejor rendimiento ofrece. Se basa en la reorganización del material para aligerar la geometría de las piezas desde un punto de vista estructural, manteniendo la rigidez que se le indique.

El diseño de un cuadro en el conjunto del producto final (la bicicleta) es uno de los componentes más importantes. Es el componente más pesado y es el encargado de garantizar una rigidez al conjunto. En el ciclismo de competición, en los últimos años, todos los avances se han dedicado a reducir el peso de la bicicleta. Por ejemplo introduciendo nuevos materiales como la fibra de carbono, principalmente en los cuadros.

Uno de los principales objetivos del proyecto es el de rediseñar un cuadro de bicicleta ya existente empleando los criterios del diseño generativo, mediante la optimización topológica. Posteriormente se validará el nuevo diseño con el método de elementos finitos (FEM). El análisis por elementos finitos consiste en resolver problemas numéricos complejos. Para garantizar que el diseño optimizado cumple con la rigidez estructural demandada al cuadro y la resistencia, lo que hace este método es, tras incluir las cargas y

condiciones de contorno, resolver el modelo que hay detrás del ensayo de cargas y muestra los esfuerzos en la estructura.

El escaneo 3D será clave en este proyecto. Este TFM parte de un diseño ya existente en vez de crear uno de cero. Lo que representa una oportunidad para unir dos herramientas de la ingeniería mecánica y del diseño de producto.

Esta tecnología está revolucionando la industria aportando soluciones a problemas en la ingeniería y en numerosos ámbitos como la medicina, el arte o la arqueología. Centrándonos en la ingeniería, el escaneo 3D es de gran utilidad para la fase posterior a la fabricación del producto. Permite comprobar que el producto fabricado cumple las especificaciones; también es fundamental en los controles de calidad en piezas que están en uso. En este proyecto se va a investigar la posibilidad de partir de un diseño sencillo de un cuadro de bicicleta ya existente, el cual tenemos físicamente en el laboratorio, con la finalidad de llegar a su representación en CAD y poder trabajarlo en programas de diseño de producto.

1.2 MOTIVACIÓN DEL PROYECTO

La principal motivación de este proyecto es la de optimizar el diseño de un cuadro de bicicleta manteniendo la funcionalidad de este. La optimización presentará numerosas ventajas entre las que destacan la reducción del peso, mejora del rendimiento y personalización del producto.

La optimización topológica permite reducir la masa a su peso óptimo, manteniendo los criterios de funcionalidad y cumpliendo los requisitos para su rendimiento. Mantener los requisitos jugando con la geometría permite obtener diseños de cuadros más ligeros. En el ciclismo, el peso juega un papel fundamental en el rendimiento del atleta, disminuir el peso de las bicicletas aumenta la eficiencia en cada pedalada, mejorando el rendimiento a largo y corto plazo en las competiciones. Al margen del ciclismo en competiciones, reducir el peso de la bicicleta es muy interesante porque ya no solo influye en el rendimiento y la velocidad, sino que también tiene un impacto en el rendimiento del resto de componentes. Los frenos y las suspensiones son dos ejemplos de componentes cuyo funcionamiento mejora si el cuadro tiene un peso menor.

Otra ventaja de la aplicación de la optimización topológica en este tipo de estructuras es el mejor reparto de la masa. El material se distribuye de manera óptima en el cuadro de manera que siga cumpliendo con los requisitos técnicos. A diferencia de un cuadro de bicicleta tubular cuya masa es homogénea en la mayoría de las superficies, un cuadro de bicicleta optimizado permite que el peso este donde se necesite reforzar la estructura del cuadro para su funcionamiento.

La personalización es otro aspecto que destacar en este tipo de productos. Una bicicleta que se adapte perfectamente al deportista y que permita que este aumente su rendimiento es clave. En el mundo de la competición la ergonomía es fundamental para conseguir aumentar la eficiencia. Un cuadro diseñado para un atleta en particular permite a este aumentar su rendimiento. El ciclismo es un deporte donde la geometría es muy importante ya que la

postura y los movimientos del cuerpo influyen mucho en la transmisión de la energía del cuerpo al eje del pedalier.

Por último, la realización de este proyecto de investigación va a ayudar a la difusión de la metodología de diseño pensando en el diseño generativo y la impresión en 3D, y el tratamiento y trabajo en mallas escaneadas. La aplicación de los conocimientos adquiridos en este proyecto será de utilidad en una gran variedad de industrias.

1.3 OBJETIVOS DEL PROYECTO

El principal objetivo que tiene este trabajo es el análisis y optimización del proceso de diseño y producción de un chasis de bicicleta infantil mediante la utilización de criterios de optimización topológica y tecnologías de impresión 3D. Para entender el alcance del proyecto, se desglosarán los objetivos necesarios:

- Análisis del proceso de diseño de una pieza. Se va a estudiar los procesos de diseño convencionales para poder adaptarlos a las nuevas tecnologías de fabricación.
- Proponer un proceso para el diseño y posterior producción de un chasis de bicicleta infantil, teniendo en cuenta la optimización topológica y la impresión en 3D.
- Pasar de un modelo físico (el chasis escogido) a un modelo digital (modelo CAD) con herramientas de escaneo. Este es uno de los objetivos más complejos del proyecto. Se va a investigar la posibilidad de llevar el modelo físico a un entorno de trabajo digital para poder trabajar sobre dicho modelo escaneado.
- Optimizar y analizar el modelo escaneado, optimización topológica. Se va a optimizar el modelo digital previamente escaneado. Se va a mejorar el rendimiento de la pieza, con la reducción de masa y con un mejor reparto de esta.
- Pasar de un diseño CAD de un modelo optimizado a una pieza impresa en 3D, impresión en 3D del modelo optimizado.

1.4 ALINEACIÓN CON LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLES (ODS)

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible con los que se alinean este proyecto son los siguientes:

Objetivo principal:

1. Industria, innovación e infraestructuras:



Figura 1 ODS Industria, innovación e infraestructuras, [1]

[Objetivo 9: Construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización sostenible y fomentar la innovación]

- A través de este proyecto se va a fomentar la innovación en los procesos de diseño y fabricación mediante la optimización topológica. Esta emplea un modelo matemático para optimizar el diseño y el uso de materiales dentro un espacio determinado por el conjunto de características y requisitos requeridos para el correcto funcionamiento de la pieza.
- Adicionalmente se va a emplear tecnologías aún en proceso de desarrollo para su uso extendido: “La tecnología de escaneo 3D”. El escaneo 3D se emplea sobre todo en la industria para control de calidad, desarrollo de prototipos y otras aplicaciones. Y que cada vez, se está consiguiendo acercar más este tipo de tecnologías a otros ámbitos fuera de la ingeniería, como por ejemplo a la arqueología y la medicina.

Objetivo secundario:

2. Producción y consumo responsables:



Figura 2 ODS Producción y consumo responsable, [1]

[Objetivo 12: Garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles]

- El presente proyecto tiene como principal objetivo la optimización. Para ello se incluye la producción de un chasis de bicicleta infantil que aproveche la optimización topológica, para reducir el gasto de material necesario en la fabricación del producto final, y así garantizar un consumo responsable de materias primas durante la producción del cuadro de la bicicleta.
- La personalización de piezas es otro aspecto fundamental a la hora de plantear una producción responsable, ya que se puede adaptar la pieza (el cuadro) especialmente a cada entorno y uso.

1.5 METODOLOGÍA DE TRABAJO

Para lograr completar con éxito este proyecto será necesario llevar a cabo distintas tareas, que, en su conjunto, ayudarán a lograr todos los objetivos establecidos al principio del proyecto. A continuación, se muestran las tareas en el orden en el que se va a realizar:

- Se realizará un estudio de los fundamentos y principios del diseño generativo para la elaboración del estado del arte y comprensión del alcance de la optimización topología a través del diseño generativo.
- Se realizará un estudio de los fundamentos y principios del escaneo 3D. Esto permitirá preparar tanto la elaboración del estado del arte como ir entendiendo la metodología requerida para el uso del escáner y poder llegar a un resultado que cumpla con las expectativas.
- En paralelo a las tareas anteriores, se asistirán a sesiones de cursos impartidos por la universidad. Estas sesiones serán principalmente de la parte del proyecto dedicada al escaneo, ya que al ser una tecnología relativamente nueva hay poca información disponible para los alumnos. Se adquirirán conocimientos de “VX-Model” [2], el programa que se empleará en el escaneado y preparación de la malla para la futura optimización. Estas sesiones son parte del curso que imparte la profesora: Silvia Fernández Villamarín.
- Tras la correcta realización de las tareas previas, se llevará a cabo la preparación del cuadro para el escaneo y se escaneará.
- Se trabajará la malla de puntos recogida en el escaneo, para poder convertirla en un sólido que se pueda trabajar en Solid Edge.
- Se procederá a la optimización topológica del cuadro de bicicleta con Solid Edge [3]. Se llevarán a cabo numerosas simulaciones hasta alcanzar un punto óptimo de diseño o hasta que se alcancen los límites del programa empleado.
- Se fabricará con tecnología de impresión en 3D el cuadro escaneado y el cuadro optimizado, ambos en la escala más grande que lo permita la impresora.
- Por último, se redactarán las conclusiones obtenidas durante el proyecto.

Capítulo 2. ESTADO DEL ARTE Y DE LA CUESTIÓN

2.1 CUADRO DE LA BICICLETA

En la actualidad existen una amplia variedad de bicicletas para distintas modalidades, las más importantes son: bicicleta de carretera y bicicleta de montaña. Dentro de las de montañas hay bicicletas a las que se les exigen cargas mayores por su tipo de uso como en el caso de las bicicletas de descenso, cuyo uso es exclusivamente descender montañas a alta velocidad por en medio del bosque. Cada tipo de uso exige unos componentes específicos, los que más se diferencian son: la suspensión, los frenos y el cuadro de la bicicleta. EL cuadro es el esqueleto, el armazón encargado de unir todos los componentes y darle rigidez al conjunto. En el ciclismo de carretera el cuadro además de ser un elemento estructural es incluso un elemento aerodinámico.

A continuación, se muestran todos los tipos de bicicletas que existen, así como sus distintos cuadros conforme a la clasificación de la Figura 3 [4]. El proyecto se va a centrar en las características técnicas de una bicicleta de montaña convencional “Hardtrail”.

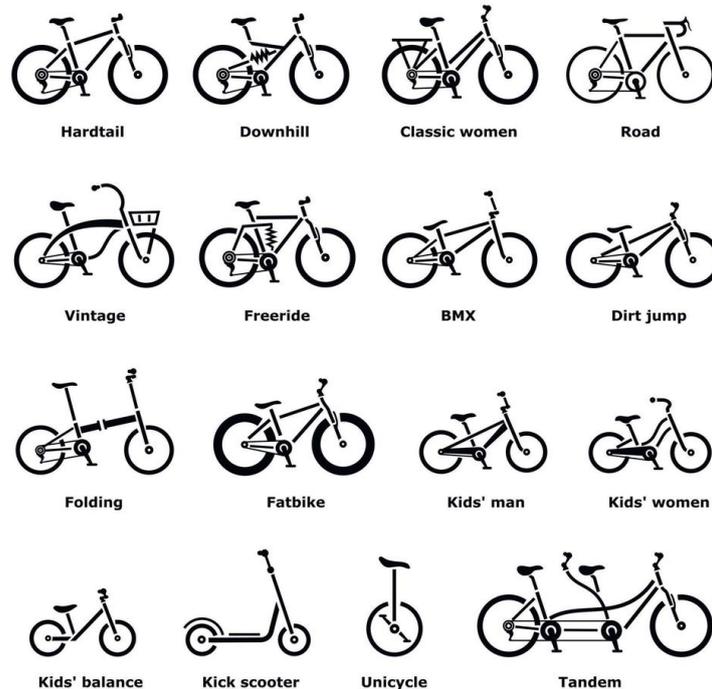


Figura 3 Tipos de bicicletas y sus cuadros [4]

Como cualquier otro vehículo, la bicicleta necesita una fuente de energía para desplazarse y esta puede ser dos tipos: el ciclista que transmite a través de la pedalada la energía a las ruedas, o bien, si es una bicicleta eléctrica, una batería y un motor eléctrico son los que transmiten la energía. En cualquiera de los dos casos, el peso es un elemento fundamental a tener en cuenta cuando se diseñan este tipo de productos. Una bicicleta convencional de montaña para adultos pesa aproximadamente 15 kg y el cuadro unos 2.5 kg, es decir, más de un 15% del peso total se ubica en el cuadro. Por ello, las marcas hacen un gran esfuerzo año tras año para seguir reduciendo el peso de los cuadros ya que es el componente que más flexibilidad da a la hora de diseñarlos. Esto hace que cada vez los fabricantes encuentren nuevas maneras más y más innovadoras de reducir la masa del cuadro. Hace unos años llegaron al mercado los cuadros de bicicletas en fibra de carbono que han sido capaces de reducir el peso del cuadro en aproximadamente un 15%-25% respecto a uno equivalente en aluminio.



Figura 4 Cuadro de fibra de carbono [5]

Aunque han sido un éxito los cuadros de fibra de carbono, la tendencia dice que los de aluminio siguen siendo los más escogidos entre los ciclistas, tanto profesionales como amateurs, debido a su alta resistencia ante impactos.

Otro avance muy importante ha sido la combinación de la impresión 3D con las posibilidades que ofrece el diseño generativo. El fabricante de bicicletas alemán “Canyon Bikes” en colaboración con compañía de materiales para fabricación aditiva “Materialise” [6], ha creado un prototipo de cuadro ligero y sostenible gracias a la impresión 3D. Este proyecto se realizó para la campaña “Ride Green”. El objetivo que tenían las marcas con este prototipo era el de conseguir un cuadro de bicicleta que ofreciera mejor rendimiento que uno clásico (aluminio o fibra de carbono), además de ser respetuoso con el medio ambiente. Este proyecto fue nominado en los premios “3D Pioneers Challenge 2022”.



Figura 5 Bicicleta Canyon Bikes por impresión 3D, [7]

“Ride Green” consiguió ser el primer diseño de bicicleta sostenibles gracias a la incorporación de componentes fabricados con material reciclado y del diseño del cuadro de la bicicleta con optimización topológica. [7]

El cuadro tubular y la horquilla fueron fabricados con “fusión selectiva por láser” (SLM, impresión 3D en metal). Esta tecnología se adapta perfectamente al tipo de pieza ya que permite fabricarlas con geometrías complejas de manera optimizada combinándola con las propiedades mecánicas que tiene el material. Para cumplir con los requisitos sostenibles del proyecto, se empleó polvo de aluminio reciclado.



Figura 6 Bicicleta Canyon Bikes Optimización topológica, [7]

Para este trabajo final de máster el cuadro escogido ha sido uno de bicicleta de montaña, pero de un tamaño reducido, un cuadro de bicicleta infantil (Figura 7). El pequeño tamaño del cuadro va a permitir que el escaneo resulte algo más sencillo. La elección de este tipo de cuadro de montaña se ha debido principalmente a que es la modalidad de ciclismo más extendida y las que tiene unos requisitos técnicos suficientes como para poder trabajar con la optimización topológica. Además, este tipo de cuadros son tubulares, lo que será de ayuda más adelante en el proyecto al definir las regiones de trabajo.

A continuación, se muestra la bicicleta escogida para este proyecto y el cuadro ya desmontado y limpio (Figura 8 y Figura 9):



Figura 7 Bicicleta escogida para el proyecto, fuente propia



Figura 8 Cuadro de la bicicleta limpio, fuente propia



Figura 9 Cuadro de la bicicleta desmontado y limpio, fuente propia

2.2 PROCESO DE DISEÑO

Para entender correctamente el proceso de diseño hay primero que distinguir el desarrollo del producto respecto su proceso diseño del producto. El proceso de desarrollo de un producto es el conjunto de actividades necesarias para conseguir que un nuevo concepto (producto) esté preparado para introducirlo en el mercado. Este incluye todas las etapas que van desde la idea inicial hasta nuevo concepto. El proceso de desarrollo del producto incluye: entender la oportunidad, desarrollar, e implementar el concepto. Cada proceso de desarrollo de un producto es distinto y dicho proceso se adecua al sector tecnológico, donde se quiera lanzar el producto, así como al mercado da cada compañía.

A continuación, se muestra un ejemplo de proceso de desarrollo de productos Ford:

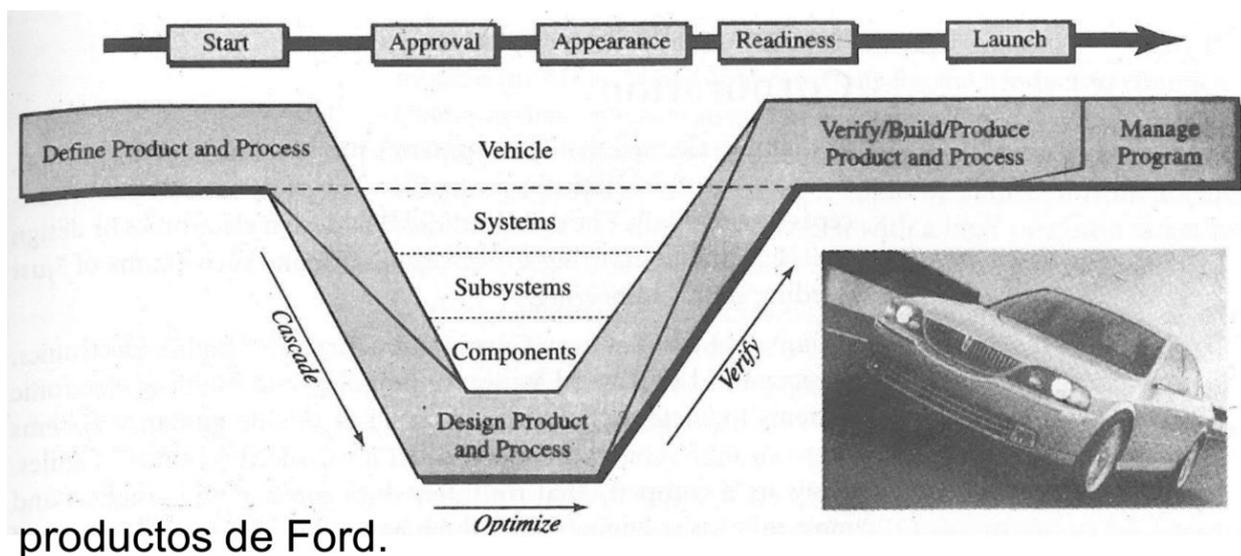


Figura 10 Proceso de desarrollo de productos Ford, [8]

Un proceso de diseño es el conjunto de actividades técnicas incluidas en el proceso de desarrollo del producto cuya finalidad es la de satisfacer tanto la visión de negocio como la visión de marketing. Este proceso incluye las siguientes etapas: el desarrollo del nuevo concepto, la adecuación del producto a las especificaciones técnicas y el desarrollo de la ingeniería para el producto. No se han de incluir: las actividades relacionadas con el negocio, las financieras, el marketing ni la distribución. Las disciplinas del diseño se pueden extender

a un gran número de ramas como por ejemplo la mecánica, la eléctrica, la electrónica, la industrial, la de materiales. Como se puede observar, las metodologías del proceso de diseño de un producto se pueden extrapolar a múltiples disciplinas de la ingeniería beneficiándose así de técnicas sistemáticas de trabajo.

Las características generales del proceso de diseño es que son procesos de toma de decisiones principalmente tecnológicas, conducido por múltiples criterios de evaluación. Es muy habitual que varias disciplinas de la ingeniería intervengan. Al inicio se tiene un cierto nivel de incertidumbre y rara vez se llega a una solución viable a la primera, lo que lo convierte en un proceso iterativo donde el rediseño, la realimentación y estudio de los resultados es clave para poder avanzar mientras se aprende de lo realizado.

A continuación, se muestra el proceso de diseño del modelo de French (1985) [8]

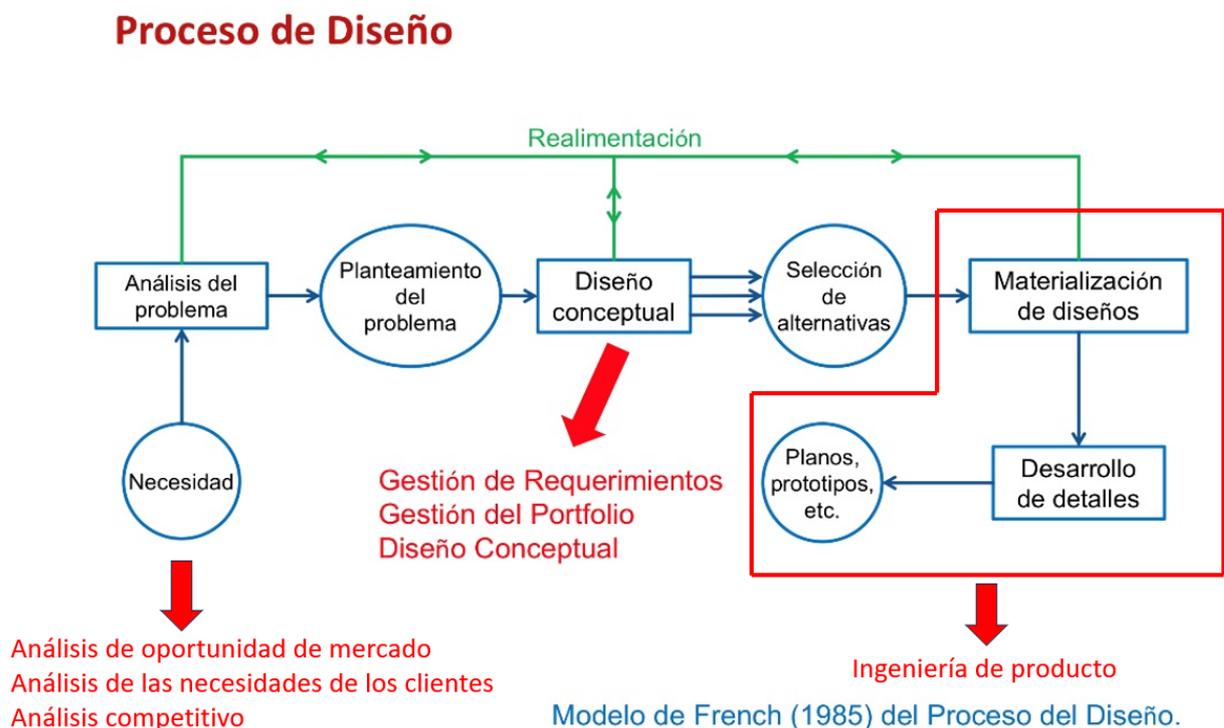


Figura 11 Proceso de diseño modelo French, [8]

Si entramos más en detalle en la ingeniería de productos, en lo que centra este proyecto, esta consiste en el desarrollo del concepto hasta la obtención de un diseño completo y terminado desde un punto de vista funcional y técnico. El ciclo de diseño tradicional de un producto como una bicicleta sería el siguiente:

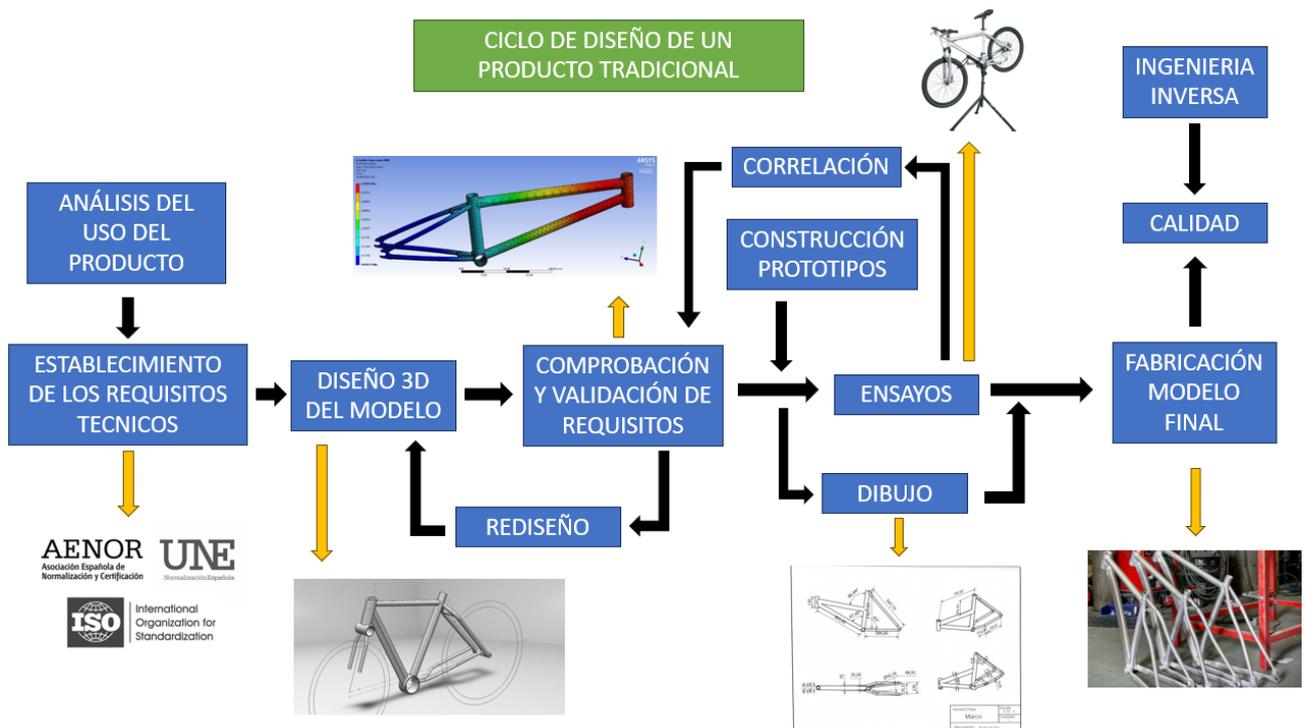


Figura 12 Ciclo de diseño de producto tradicional, fuente propia

Como se puede ver en el ciclo de diseño tradicional no se contempla desde un inicio la tecnología de impresión 3D, ni la implementación de la metodología de diseño generativo y optimización topológica. Más adelante, en el capítulo de desarrollo del trabajo, se realizará una propuesta de un ciclo de diseño de un producto enfocado a la impresión 3D y la optimización topológica.

2.3 INGENIERÍA INVERSA Y ESCANEADO 3D

La ingeniería inversa es una actividad esencial en la ingeniería de diseño; esta desempeña un papel fundamental en la innovación y el desarrollo de productos. Los métodos más tradicionales de ingeniería inversa suelen resultar largos (en tiempo) y muy costosos. De dichas dificultades nacen las nuevas tecnologías de escaneo en 3D. Con el potencial de un escáner 3D, los ingenieros tienen la capacidad de capturar de manera muy rápida y con muchísima precisión las geometrías y dimensiones de objetos, ayudándoles a conseguir un modelo digital para su tratamiento en programas de modelado, de ensayos no destructivos.



Figura 13 Escaneo de piezas con escáner 3D, [9]

¿Qué es realmente la ingeniería inversa? ¿Dónde surge la idea de ingeniería inversa? En la ingeniería de producto también conocida como ingeniería manufacturera, numerosas piezas sobreviven al paso del tiempo. Estas piezas pueden ser de gran interés y esenciales en el funcionamiento de sistemas y maquinaria de una cierta antigüedad, pero el acceso a la documentación original de diseño no resulta siempre sencillo, siendo a veces irre recuperable. Esta falta de documentación original ya sea física o digital genera en los ingenieros la

necesidad de una tecnología que permita obtener información detallada de piezas. Los fabricante e ingenieros recurren entonces a la ingeniería inversa, este complejo proceso incluye el análisis del producto para poder comprender el diseño, su funcionalidad y la construcción. El objetivo final de la ingeniería inversa es la obtención de información sobre el funcionamiento de un producto y la posibilidad de replicarlo, y mejorarlo. Se podría decir que estos productos o componentes son recreados digitalmente con tecnología actual [10].

En la actualidad la ingeniería inversa tiene muchas aplicaciones en la ingeniería como:

- Mejora de producto
- Competencia y benchmarking
- Reparación y mantenimiento
- Seguridad y análisis (ingeniería inversa en ciberseguridad, un enfoque similar a la ingeniería inversa de diseño de productos, pero enfocado al análisis de softwares, sin escáneres)

En la ingeniería inversa para maquinaria [9] se puede destacar las siguientes aplicaciones:

- Análisis de componentes
- Estudio de materiales
- Estudio de procesos de fabricación
- Identificación de características
- Identificación de funcionalidad
- **Mejora y optimización**

2.3.1 MÉTODOS DE ESCANEEO 3D

En ingeniería inversa se dispone de distintos tipos de medición, según el tamaño, la complejidad, los requisitos de precisión y el tipo de material del objeto [10]. Las principales categorías de escáneres son:

- Sondas de contacto: Estas sondas permiten a los ingenieros medir superficies de objetos y obtener las coordenadas de manera muy precisa. Este tipo de escáneres ofrecen una calidad muy alta en sus escaneos, pero son lentos y al tener que estar en contacto con la superficie de los objetos podrían dañarlos si fueran delicados; adicionalmente si las superficies son blandas, este tipo de escáner no resultan de utilidad.
- Escáneres 3D láser sin contacto: Estos escáneres 3D son portátiles; para su funcionamiento se emiten haces laser sobre el objeto estudiado, y el escáner obtiene las coordenadas de los puntos de la superficie. Son preferibles para objetos de un tamaño contenido para poder mejorar la calidad del resultado y tienen un coste elevado a la hora de comprarlos.
- Escáneres 3D de luz estructurada sin contacto: Estos escáneres también son portátiles y su funcionamiento es similar a los de laser. Estos proyectan patrones de luz sobre el objeto estudiado y a través de cámaras son capaces de registrar las proyecciones. Estas proyecciones se deforman al impactar con la superficie del objeto, y dichas deformaciones se analizan con el software para conseguir mapear la superficie del objeto. Estos escanearse son capaces de conseguir no solo detalles geométricos, sino que también obtienen colores e incluso texturas de objetos. Cabe desatacar que son precisos, versátiles y capturan los datos rápidamente. Pero presentan dificultades con superficies transparentes, o que reflejen luz.
- Fotogrametría: Esta novedosa técnica consiste en recopilar numerosas imágenes tomadas en distintos ángulos y reconstruir la geometría del objeto estudiado. La fotogrametría es muy sencilla de usar, pero necesita imágenes de una calidad muy alta y aún así puede que no capture ciertos detalles.

Entre las muchas tecnologías de escaneo 3D presentadas, para este proyecto se ha escogido los escáneres de luz blanca estructurada sin contacto, ya que presentan unas características que se adaptan al proyecto y al objeto que se quiere escanear, es decir, un cuadro de bicicleta.

La siguiente figura resume los métodos de escaneo:

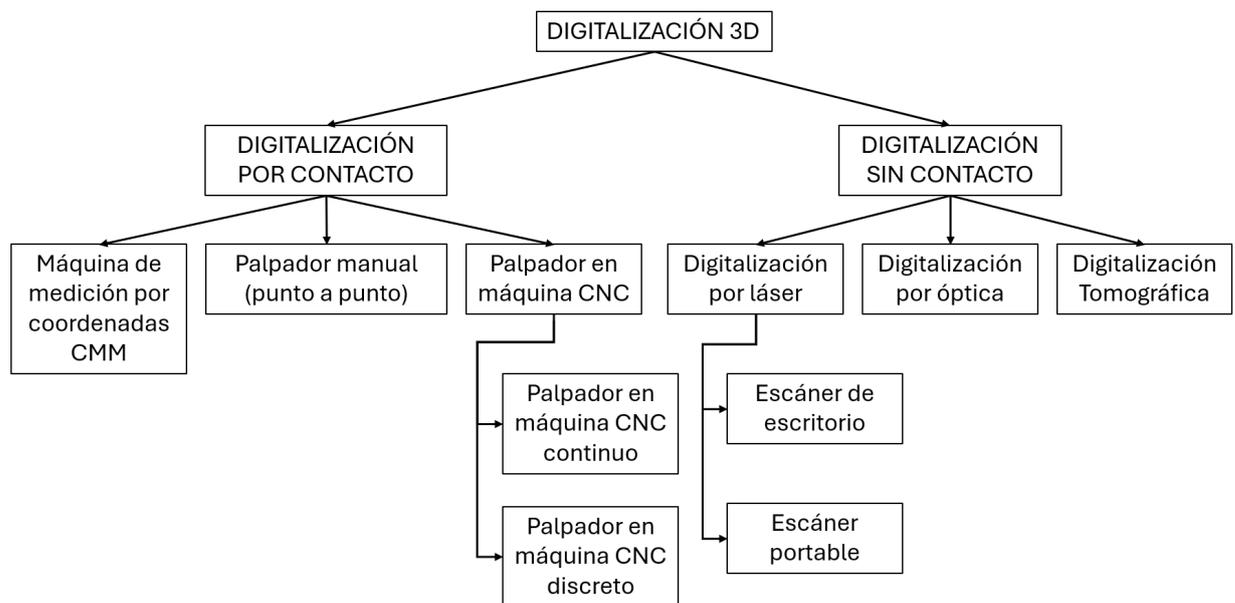


Figura 14 Resumen de los métodos de escaneo, [11]

2.3.2 ETAPAS EN LA METODOLOGÍA A SEGUIR EN EL ESCANEO 3D

En el proceso de la ingeniería inversa, el escaneo 3D para ser exitoso necesita realizarse según un flujo y una metodología de trabajo determinado que se puede dividir en distintas etapas [10]. A continuación, se van a detallar las distintas etapas a seguir en un orden determinado:

1) Preparación del proyecto

El primer paso es definir los objetivos que se quieren conseguir a través de la ingeniería inversa. Hay que comprobar si realmente la ingeniería inversa es necesaria. Si la respuesta es sí, entonces hay que estudiar el objeto que se quiere escanear. Lo siguiente es establecer los requisitos de precisión y el nivel de detalle

que se van a necesitar, y en función de estos, se escoge un escáner 3D y los parámetros con los que se va a trabajar.

2) Preparación del objeto a escanear

Esta etapa consiste en la preparación de la pieza para el escaneo; esto incluye la limpieza de las superficies de la pieza y la eliminación de todos los reflejos. Para ello eliminar los reflejos, existen unos espráis específicos que rocían con un polvo mate las piezas.

3) Escaneo 3D

Con el escáner escogido se **registra la superficie** del objeto estudiado. Hay que buscar un equilibrio entre tiempo invertido, calidad (detalles escaneados) y el tamaño del escaneo. Pueden resultar archivos muy pesados y difíciles de trabajar con ellos).

4) Procesamiento de la nube de puntos

A partir de los distintos escaneos de la pieza **se genera una nube de puntos** (procesado de datos). Adicionalmente, en esta etapa se ha de realizar las siguientes tareas: limpiar la nube eliminando los posibles ruidos, corregir y rellenar las áreas incompletas y optimizar la nube de puntos (la densidad).

5) Generación y trabajo de la malla

Conversión de la nube de puntos ya procesados en una malla tridimensional. Se forma una malla triangular conectando los puntos de la nube. Se quiere conseguir un modelo en 3D de la estructura geométrica detallada y una estructura orgánica.

6) Creación de un modelo en CAD

Importación de la malla desde el software de ingeniería inversa (VX Model) a un modelo CAD. Este paso es el **más complejo del proceso**; habitualmente se ha de corregir, reparar y simplificar la malla para llevar a cabo con éxito este paso. Esta corrección suele ser: reparación de superficies no cerradas correctamente, eliminación de picos, o bordes conflictivos y diversas correcciones de la geometría.

A partir de esta etapa entramos en la **optimización topológica**.

7) Edición y optimización del modelo CAD

Se trabaja a partir de aquí en un modelo CAD. Según el objetivo del proyecto se edita y/o se optimiza el modelo. En optimización topológica este paso incluye una reorganización de la masa y del volumen del objeto, así como el suavizado, de superficies. Todas estas modificaciones se hacen para mejorar el rendimiento de la pieza.

8) Verificación final

Se verifica el modelo final comparándolo con el objeto original escaneado. Se verifica que las propiedades del nuevo modelo se corresponden con las esperadas. Se realizan ensayos al modelo optimizado para comprobar que se ha mejorado el rendimiento de la pieza y que se cumplen las normas que le corresponden.

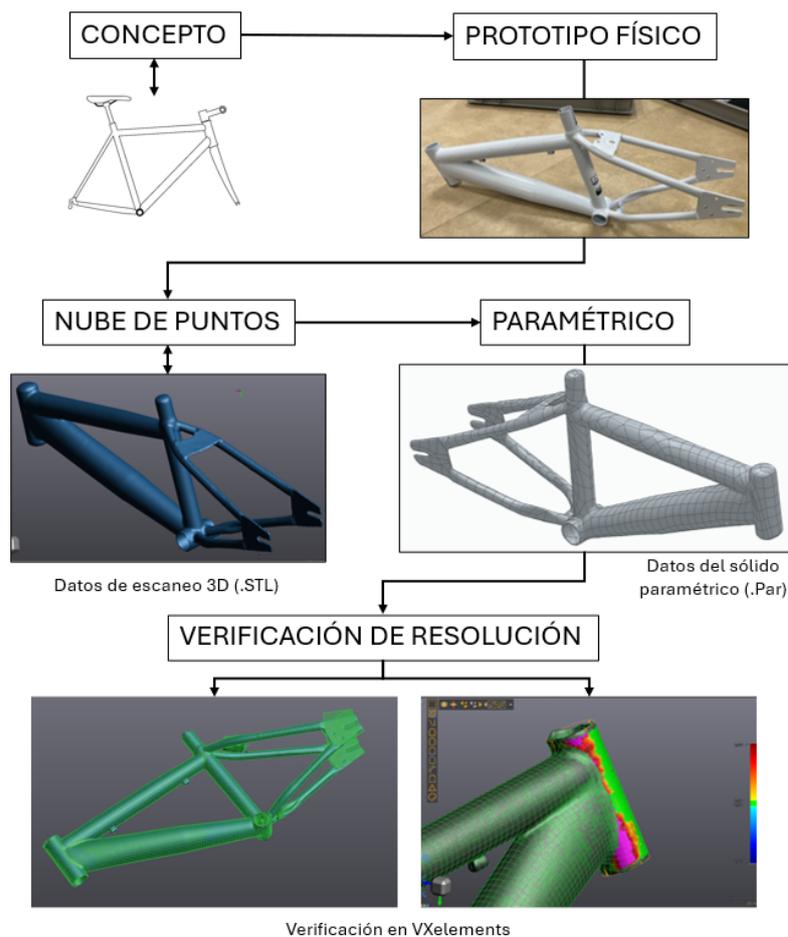


Figura 15 Etapas del escaneo 3D y procesado de datos, fuente propia

2.4 DISEÑO GENERATIVO

El diseño generativo es un proceso de diseño iterativo en el que se busca crear y diseñar modelos que cumplan con su función respetando las restricciones establecidas en el diseño. Estas restricciones y limitaciones son parámetros y variables que se pueden modificar mediante algoritmos. Algunos ejemplos serían: fuerzas y presiones aplicadas, límites espaciales, geometrías restringidas, y propiedades según los materiales. Jugar con estas variables permite obtener diseños originales e innovadores. Con todo este trabajo se puede llegar al modelo que es óptimo para la función deseada.

Con el diseño generativo somos capaces de llegar a la mejor versión del modelo posible entre todas las versiones, siendo esta última mucho mejor que el modelo de partida (la versión original de la pieza). Es fundamental que a lo largo del proceso se compruebe que se siguen cumpliendo todos los requisitos establecidos para el correcto funcionamiento de la pieza. Todo esto nos permite no solo mejorar el rendimiento a través de la optimización de la pieza, sino que también puede ayudar a reducir el coste de fabricación (producción) y a fomentar la innovación [12].

La optimización topológica basada en los criterios del diseño generativo tiene grandes ventajas como la sostenibilidad a través del ahorro de material y el ahorro de energía durante la fabricación. Uno de los principales objetivos en cualquier disciplina de la ingeniería es la reducción de peso directamente relacionada con el coste; la optimización topológica permite reducir la cantidad de material empleado mientras mantiene la rigidez, la fuerza y la resistencia.

Para poder entender bien las diferencias entre un proceso de diseño clásico y un proceso de diseño generativo, se analizarán ambos procesos a partir de unos esquemas de los procesos [13].

El proceso de diseño clásico es el que se muestra en “Figura 16 Proceso de diseño clásico [13]”. El ingeniero y diseñador tienen como base su idea y a partir de ahí la va desarrollando, y analizando para conseguir llegar a la que él considera la solución óptima. Tras alcanzar esa solución, el ingeniero debe evaluar y comprobar si cumple con los requisitos establecidos al inicio del proceso; de no cumplirse, debe realizar los cambios que considere necesarios para reconducir la idea y conseguir un producto compatible con los requisitos iniciales. El proceso consiste en repetir la búsqueda de solución hasta conseguir un diseño óptimo.

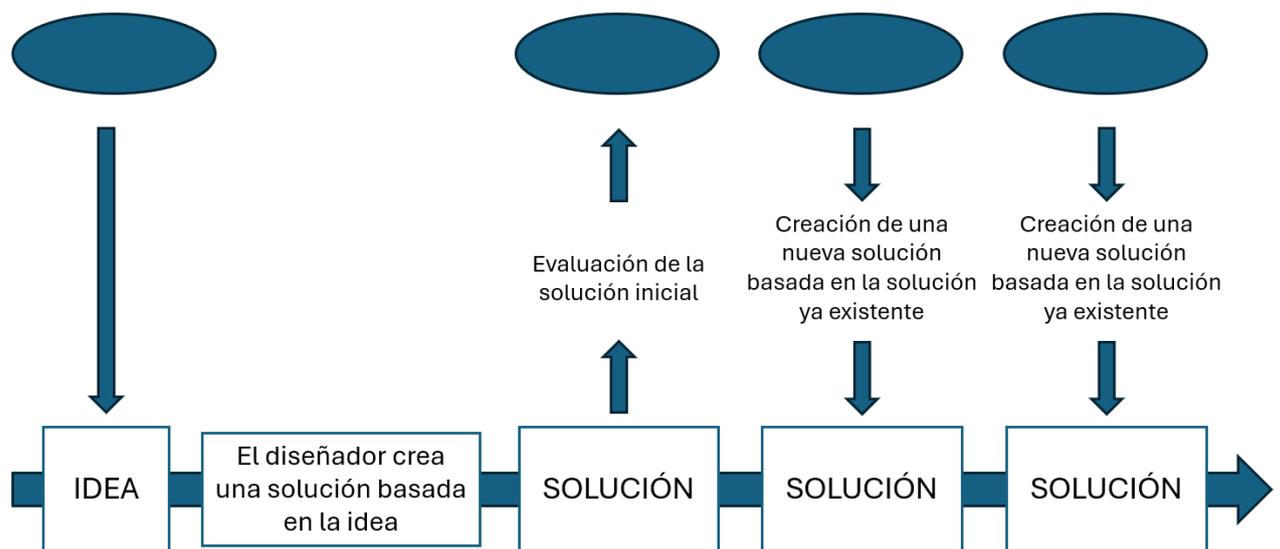


Figura 16 Proceso de diseño clásico [13]

El proceso de diseño generativo es el que se muestra en “Figura 17 Proceso con diseño generativo [13]”. A diferencia del clásico, el diseñador tiene que traducir a reglas y a algoritmos la idea inicial de la que parte. Con esas reglas (como por ejemplo requisitos técnicos) el programa es capaz de escribir un código que creará la idea. Así la idea se obtiene a partir de reglas.

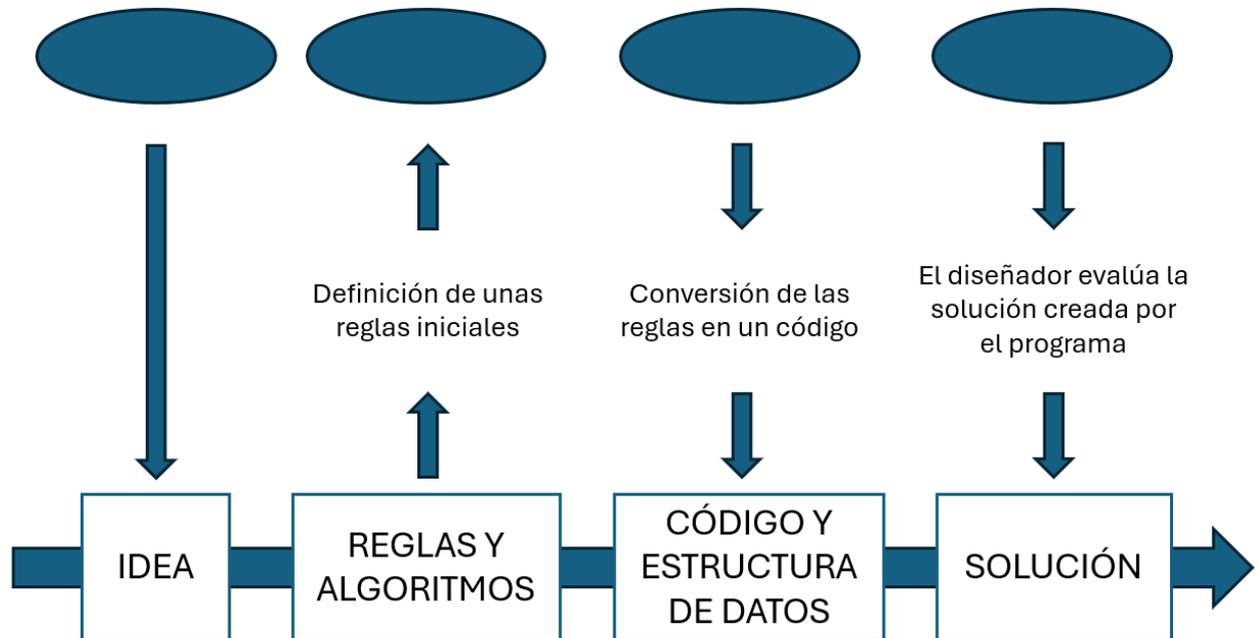


Figura 17 Proceso con diseño generativo [13]

La gran diferencia entre estos procesos es que con el diseño generativo se van obteniendo soluciones que se van adaptando y se evita tener que volver al punto de partida (la primera idea) cada vez que se quiera realizar una modificación o mejora. Con el diseño generativo lo que se hace es modificar los parámetros y las reglas para que el programa sea capaz de obtener nuevas soluciones.

En resumen, en el proceso clásico lineal cada solución implica la reconstrucción de la idea original en base a las modificaciones implementadas mientras que con el proceso de diseño generativo se tiene una representación de la idea parametrizada con un alto nivel de detalle. Todo ello elimina la necesidad de partir del diseño original cada vez que se realizan modificación; basta con añadir y corregir las reglas y así se evita tener que reconstruir de cero. Otra ventaja que presenta la parametrización es que con un simple cambio en las reglas y algoritmos se pueden generar distintos diseños para múltiples usos.

2.5 OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA

La optimización topológica parte de la idea de que se tiene una pieza (estructura concreta) que tiene una geometría determinada, un volumen, un material y un número de restricciones como por ejemplo cargas aplicadas. Con la optimización topológica se juega con la redistribución del material en el volumen que definimos y con las restricciones que se hayan establecido; se va iterando mientras se modifican ciertos parámetros hasta alcanzar un diseño óptimo.

La optimización topológica presenta una ventaja a la hora de trabajar y es que a medida que se itera va proporcionando soluciones y diseños que permitan hacerse una idea del resultado final. Con cada iteración adicional que se realiza se va mejorando sobre las anteriores, el algoritmo es capaz de mejorar ahí donde no se están mostrando avances, siempre dentro de restricciones establecidas al inicio por el diseñador. Adicionalmente, la optimización topológica es de gran utilidad en cálculo de estructuras y para el análisis de objetos sometido a cargas de todo tipo. Al final un modelo optimizado no deja de ser una buena representación de por dónde se transmiten los esfuerzos y tensiones dentro de la pieza o estructura. Un elemento (pieza o estructura) optimizado topológicamente es un elemento cuyo rendimiento ha mejorado, reduciendo su masa mientras se mantiene su resistencia incluso llegando a aumentarla.

Habitualmente se confunde el diseño generativo con la optimización topológica dado que su objetivo es similar. La optimización topológica consiste en optimizar la geometría y el volumen de piezas con el objetivo de cumplir unas especificaciones requeridas para el uso de la pieza. El diseño generativo consiste en generar diseños innovadores y complejos a través de la especificación de parámetros. Conceptos adquiridos de: “TFM Optimización topológica como medio de generación de ideas para el diseño de productos, Héctor Giménez [14]”.

En este proyecto la optimización topológica es clave porque va a permitir partir de un diseño que ya existe como el cuadro de bicicleta y con las iteraciones se irá retirando material y redistribuyendo la masa para poder garantizar que se mantienen la funciones y requisitos del diseño original.

La siguiente figura es un diagrama de la metodología detallada de la optimización topológica que será la empleada durante el proyecto de optimización del cuadro de bicicleta.

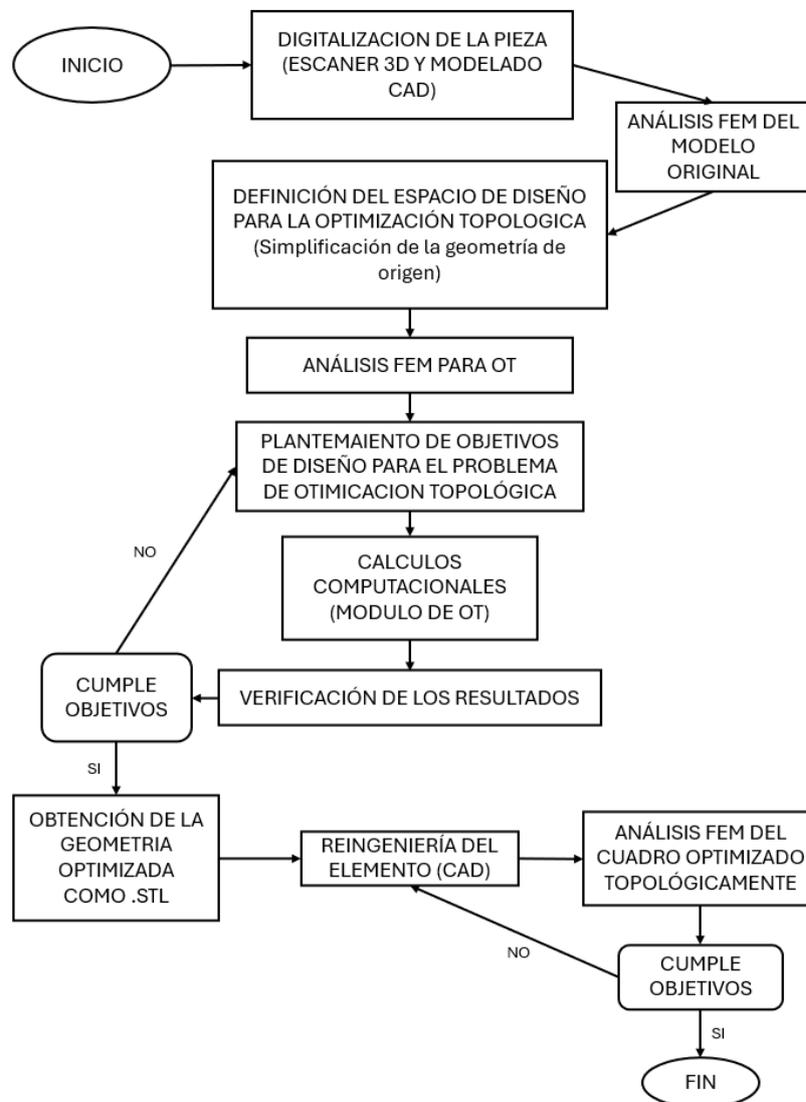


Figura 18 Flujo de trabajo para optimización topológica, fuente propia

2.5.1 EJEMPLOS DE PROYECTOS CON OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA

Para poder ilustrar mejor los resultados de la optimización topológica, a continuación se van a mostrar los resultados de algunos proyectos de ingeniería en los que se empleó la optimización.

Moto Bmw S1000RR, este proyecto es uno de los ejemplos más interesantes en el que se ha combinado la tecnología de impresión 3D con la de optimización topológica [15]. La moto cuenta con un chasis optimizado impreso en 3D en metal. La forma del chasis es de forma “orgánica” que resulta del trabajo de optimización que ha eliminado la masa que no estaba sometida a esfuerzos para mejorar el rendimiento general del vehículo. Además de reducirse la masa y mejorar el rendimiento se ha logrado reducir los costes de fabricación. Para Bmw este proyecto ha sido un éxito ya que les ha abierto las puertas de diseños innovadores y sostenibles.



Figura 19 BMW S1000RR con chasis optimizado [15]



Figura 20 Chasis BMW optimizado e impreso en 3D [15]

Otro proyecto que apuesta por la optimización topológica y la impresión aditiva es el de Renault Trucks [16]. Renault ha diseñado motores para camiones con estructuras complejas generadas por la optimización topológica. Estas estructuras con la tecnología de impresión 3D han permitido ahorrarse un 25% de las piezas de cada motor y ha reducido el peso otro 25% es decir 120kg. Gracias a estos avances se ha reducido los consumos de los camiones, objetivo de sostenibilidad que se marcó Renault. Las piezas impresas fueron: bloque motor, brazos oscilantes y casquillos.



Figura 21 Brazos oscilantes Renault Trucks optimizados [16]



Figura 22 Bloque motor Renault diseñado con optimización topológica [16]

2.5.2 MATEMÁTICAS DETRÁS DE LA OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA

La optimización topológica es un algoritmo matemático (NX Nastran “1.4.1 The Finite Element Modelling” [17]) que es capaz de analizar las estructuras, los esfuerzos, las fuerzas ejercidas en las superficies, los anclajes que fijan la estructura , el volumen de diseño. Todo ello con el único objetivo de reducir la masa y mejorar su rendimiento. Adicionalmente como resultado de esta mejora se consigue reducir los costes, es decir, aumentar el beneficio.

Este método matemático emplea como es habitual:

- Variables “2.5.2. Functions” [17]
- Parámetros
- Restricciones
- Condiciones de contorno “8.3. Types of Boundary Conditions” [17]

Estas herramientas consiguen convertir el modelo digital en una copia del modelo físico con las características propias del modelo: material, geometría y resistencia. Y se replican las condiciones de trabajo (de uso) de la pieza. Todo esto se traduce a números y se convierte en una resolución matemática compleja. Esta resolución numérica es conocida como Análisis de Elementos Finitos (FEM) o Método de Elementos finitos. “7.3 Mathematics of element Formulation for simple elements [17]”

Esta herramienta se ha empleado en muchos campos de la ciencia, pero principalmente en la ingeniería y en la investigación. Cada vez se está extendiendo más el uso de este tipo de

programas por su potencial de adaptación a todo tipo de resoluciones de problemas matemáticos.

2.6 MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

El análisis de elementos finitos consiste en la división de una superficie continua en un conjunto de elementos de pequeño tamaño conectados entre sí. Estos elementos se conectan a través de nodos. Lo que se consigue es una simplificación del medio continuo dividiéndolo en miles de elementos de menor tamaño, aplicándoles de la misma manera las ecuaciones que describen su comportamiento a nivel individual. Se pasa así de un sistema continuo con infinitos movimientos posibles (grados de libertad), a un sistema con finitos movimientos posibles. Conocimientos extraídos de: “6.3.2.1 Features of Mesh Elements” [17].

El método de elementos finitos es capaz de analizar el comportamiento individual de cada elemento por separado para posteriormente combinarlo y obtener el comportamiento del sistema entero como un todo.

Este proceso es el que se sigue en el análisis de estructuras. Se divide la estructura en pequeñas secciones y se analizan para posteriormente juntar los resultados y entender el conjunto de toda la estructura. Estas pequeñas secciones se llaman “elementos” y se conectan entre ellas a través de los “nodos”. Al realizar el sumatorio del comportamiento de los elementos se obtiene el comportamiento del conjunto global de la estructura.

En estructuras hay que distinguir dos tipos de estructuras:

- Estructura discreta: Tiene un número determinado de variables con un número finitos de desplazamientos.
- Estructura continua: Tiene un número infinito de desplazamientos.

La primera de ellas tiene un vector finito de deformaciones mientras que la segunda se rige por una función vectorial. En resumen, el método de elementos finitos consigue que un

problema de variables infinitas sea divisible en pequeños problemas finitos pasando de una estructura continua a una discreta.

Como todo problema matemático, se necesitan variables de salida. En el análisis de elementos finitos, estas variables son los elementos y se emplean para analizar el desplazamiento de los nodos. El estado de cada nodo viene determinado por los grados de libertad de los elementos, es decir, la variables de salida [18].

Las siguiente figuras muestran los nodos y elementos del sistema analizado, el cuadro de bicicleta. Como se aprecia en la foto, el cuadro se ha dividido en muchas pequeñas superficies por ello se ha tenido que hacer “zoom” para poder observar los elementos y nodos. Esta división la ha definido SolidEdge al emplear la opción de mallado.

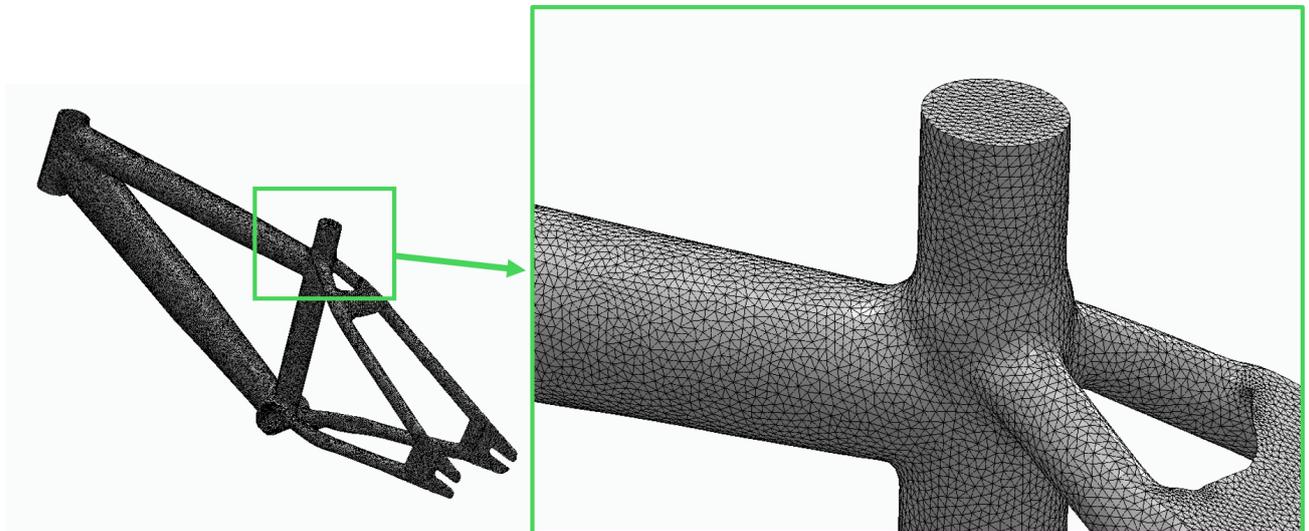


Figura 23 Elementos y nodos del cuadro de bicicleta I, fuente propia

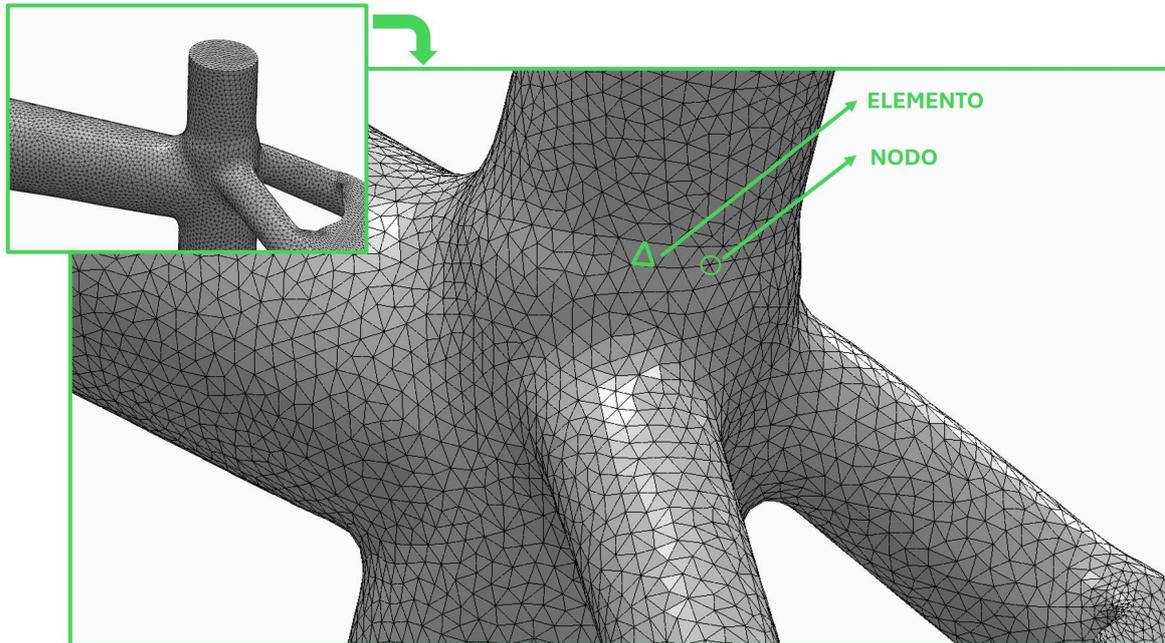


Figura 24 Elementos y nodos del cuadro de bicicleta II, fuente propia

Una vez se tienen las variables correctamente definidas y se sabe la variación del desplazamiento de cada uno de los nodos que conforman el sistema, se puede obtener un resultado. Una vez se ha resuelto y se tiene el estado del conjunto se pueden estudiar numerosas variables como fuerzas, pares, tensiones sobre el sistema [18].

Cabe mencionar que el mallado está definido por una función vectorial que no siempre resulta en una expresión matemática manejable. Para conseguir una expresión analítica con la que se puede trabajar el método de análisis de elementos finitos se suponen ciertas hipótesis de trabajo:

1. El sistema continuo se divide en regiones con formas geométricas; estas regiones son los conocidos como elementos finitos. Y estas regiones se conectan a través de nodos. Al conjunto de nodos y elementos se le llama “malla”.
2. Para la resolución matemática del problema, las incógnitas serán los desplazamientos de cada uno de los nudos y cada configuración (distribución de nudos) durante el análisis será considerada la estructura

3. El desplazamiento de cada punto del sistema es determinado por el desplazamiento de los nodos que conforman el elemento.
4. A través del desplazamiento de cada nodo y de las ecuaciones asociadas al material se establece un estado de tensiones en el sistema completo.
5. Cada nodo se considera un sistema en equilibrio con fuerzas y tensiones que actúan sobre cada elemento finito.

Con estas hipótesis se puede reducir la función vectorial a una expresión que sea capaz de manejar la herramienta computacional.

Para el estudio del funcionamiento del método de elementos finitos se ha empleado el libro: “El método de los elementos finitos” de Olgierd Cecil Zienkiewicz, Profesor y jefe de departamento de ingeniería civil en la universidad de Wales, Swanses. 2007 [18] y “Finite Element Applications” de Michael Okereke y Simeon Keates [17].

2.6.1 METODOLOGÍA DEL ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS

La aplicación del método de elementos finitos sigue un proceso sistemático. Este proceso es el que se ha seguido durante este proyecto, y es el que a continuación se va a describir. Los pasos son los mismos independientemente del programa empleado (software); para este proyecto se ha empleado SolidEdge. El primer paso es un procesamiento de la pieza previo al análisis. Este consiste en definir la geometría del modelo, las restricciones, las propiedades del material y por último el trabajo de mallado sobre el modelo. El segundo paso es el de aplicar la solución que tenga el programa, en el caso de SolidEdge, se emplea el análisis por elementos finitos. El tercer y último paso consiste en analizar los resultados, como por ejemplo con un diagrama de esfuerzos o desplazamientos.

2.6.1.1 Preparación previa de la pieza:

El primer paso es el más importante, es en el que se van a definir los parámetros que se van a emplear durante el análisis. Una vez introducidos los parámetros se va a generar

un mallado sobre la estructura que se quiere analizar, en este proyecto es el cuadro de bicicleta.

El análisis estructural consiste en evaluar la respuesta de la estructura (pieza) a distintas cargas y estudiar su capacidad de aguantar las cargas sin llegar al límite elástico o a fallo crítico de la pieza. Es fundamental realizar un estudio previo de distintos parámetros como las condiciones de contorno, las fuerzas externas aplicadas y el material del que está hecho la pieza. Este estudio nos permitirá analizar lo que realmente se espera de la pieza. Tener todos estos datos claros es muy importante para trabajar óptimamente. Los tiempos de análisis son largos y equivocarse en algún parámetro demoraría el proyecto y obligaría a retroceder y corregir en repetidas ocasiones.

Simplificación:

Otro paso importante dentro de la preparación previa es la simplificación de la pieza. Es crítico conseguir una geometría que le resulte razonablemente sencilla de mallar al programa. Una geometría compleja obligará al programa a disminuir la calidad del mallado. Se deben realizar las modificaciones (simplificaciones y limpiezas) necesarias para garantizar una malla de alta calidad, ya que será en parte reflejo del resultado obtenido. Una malla mal definida y compleja dará resultados pobres y tiempos de análisis muy largos. Conviene dedicar un gran número de horas a la simplificación de la geometría, todas las horas invertidas aquí son horas y problemas que se evitan en futuros pasos.

Mallado del modelo:

El mallado consiste en pasar del modelo CAD a un modelo cuya geometría está discretizada. Esto se consigue dividiendo la pieza en elementos finitos (formas geométricas). Es necesario conseguir una malla lo más óptima posible para obtener unos resultados de calidad.



Figura 25 Izquierda, modelo en CAD y a la derecha el modelo mallado con elementos tetraédricos

El tamaño del mallado es otro factor que tener en cuenta, este determinará la calidad del estudio. La malla debe recoger el suficiente número de detalles como para representar correctamente al modelo, pero a su vez debe estar constituida por el menor número de elementos posibles. Se busca un punto de equilibrio que garantice un buen resultado. Si la malla consta de demasiados elementos, se ralentizarán los tiempo de análisis y tendrá una repercusión en la eficiencia del proceso.

Un problema que presenta este proyecto es que la pieza escogida es muy grande y presenta una geometría muy compleja dando lugar a una malla muy grande. El cuadro se ha simplificado lo máximo posible y aun así la malla ha dado bastantes problemas en ciertos puntos donde la geometría era muy delgada o donde tenía cambios de pendientes muy pronunciadas.

Geometría del mallado:

El tipo de mallado también es un factor a tener en cuenta. Los patrones (la geometría) que se vayan a escoger pueden determinar la calidad y la resolución de los detalles. Según que geometría se puede adaptar mejor o peor a la pieza. De nuevo el tiempo de análisis computacional variara según el mallado.

Los mallados se pueden dividir en dos categorías: las mallas estructuradas y las mallas no estructuradas. Las primeras tienen formas de carácter más regular y recurren a las simetrías. Las segundas son todo lo contrario con distribuciones irregulares y con cierta aleatoriedad.

Las mallas estructuradas se caracterizan por emplear conexiones en forma de patrones. Estos patrones se componen de elementos geométricos como triángulos, cuadriláteros, tetraedros y hexaedros. Este proyecto va a emplear tetraedros.

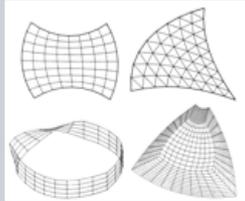
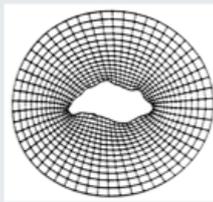
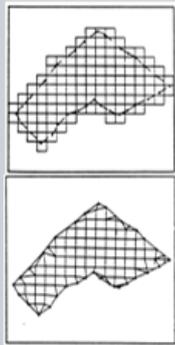
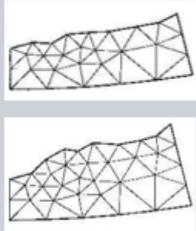
Las mallas no estructuradas, como su nombre indica, no siguen ninguna estructura, es decir, no siguen patrones. La manera en la que conectan las geometrías es en función de su ubicación en el modelo, de su contorno y de los nodos.

Tabla 1 Métodos de mallado

Mallas estructuradas	Mallas no estructuradas
Método Algebraico	Método de Delaunay (inserción de nodos)
Método basado en EDPs	Método de frente de avance
Método de superposición de retícula y ajuste de contorno	

Toda la información en referencia a los métodos de mallados se ha obtenido de: “Mejora de la calidad de mallas para elementos finitos”, Abel Coll Sans, 2003 [19]

Tabla 2 Métodos de mallado detallado, fuente propia en base a [19]

Método	Breve descripción	Figuras
Algebraico	<p>Es el más rápido y sencillo, emplea dos técnicas: el “mapping” (mapeo) y la interpolación transfinita.</p> <p>Mapping: paso de dominio previo a canónico, posteriormente se genera una retícula y se transportan los nodos a la ubicación anterior en al dominio original .</p> <p>Interpolación transfinita: se realizan funciones de interpolación entre bordes del dominio, los nodos del interior quedan determinados por los del contorno.</p>	
EDPs (Ecuaciones de derivadas Parciales)	<p>Este método emplea ecuaciones de derivadas parciales para mallar el modelo. Es capaz de modificar la densidad de la malla donde lo considera necesario. Las condiciones de contorno son un elemento clave de este tipo de mallado. Este método presenta la desventaja de consumir más tiempo de computación.</p> <p>Ecuación de Laplace: mallas uniformes</p> <p>Ecuación de Poisson: mallas de densidad variable</p>	
Superposición de retícula y ajuste de contorno	<p>Este método cubre la superficie a discretizar con una cuadrícula, las secciones de la cuadrícula que se quedan incompletas se ajustan a los bordes, las que no tienen problemas con el contorno mantienen su forma cuadrada</p>	
Delaunay	<p>Discretización de tipo triangular, se emplea en dominios que tienen una distribución que viene determinada por los nodos, este método busca una distribución óptima de los triángulos</p>	
Proceso de avance	<p>Este método consiste en el avance de los elementos añadiéndolos a continuación el uno del otro, busca la posición óptima en función de los nodos</p> <p>Es in proceso iterativo, empieza en los contornos del modelo y termina en el centro de este</p>	

2.6.1.2 Aplicación de la solución (SolidEdge):

Este paso es la aplicación de la herramienta de SolidEdge al modelo que hemos previamente preparado para el análisis. El modelo se pasa por el solucionador numérico y se obtienen los resultados en función de todos los parámetros introducidos. Este paso suele tener tiempos de carga bastante largos. Resolver este tipo de problemas matemáticos no resulta sencillo y emplea muchos recursos del ordenador; por ello durante este proyecto se ha empleado un ordenador específico preparado para estas tareas que disponía de 64GB de RAM y un procesador más potente.

2.6.1.3 Análisis de los resultados:

En este último paso se analizan los resultados, para ello SolidEdge [3] ofrece distintas herramientas, como los diagramas de esfuerzos, o el visualizador de desplazamientos.

2.7 FABRICACIÓN ADITIVA

La fabricación aditiva ha revolucionado la producción industrial, introduciendo nuevos conceptos como la fabricación por capas. Esta fabricación consiste en la creación de objetos con diversos materiales como el plástico, el metal y polímeros como el PA12. Esta técnica de ir fabricando capa a capa permite crear piezas con geometrías complejas que de otra manera sería o muy difíciles, incluso imposible por métodos tradicionales. La fabricación aditiva es de gran utilidad en áreas de la ingeniería, y cada vez cobra más importancia en el sector médico.

La fabricación aditiva presenta algunas ventajas muy interesante como por ejemplo el ahorro de material, al fabricar por capas sólo se emplea el material óptimo y necesario evitando así desperdiciar material como sucede en la fabricación tradicional, como es el caso de las piezas que se trabajan en torno. Otra ventaja es la reducción de los tiempos de fabricación. Esta técnica de fabricación elimina el uso de herramientas y de pasos intermedios en comparación con los métodos tradicionales. Una vez se diseña la pieza y se lanza a la impresora, el producto que sale ya es la pieza terminada; esto permite además programar de manera óptima los tiempos de producción.

La mayor ventaja es que la fabricación aditiva da muchísima **libertad a los diseñadores** y les permite diseñar piezas con una **geometría muy compleja**. La fabricación por capas permite que los diseños tengas vaciados, espesores, formas irregulares que con la fabricación tradicional son muy difíciles de alcanzar.

La segunda gran ventaja que hace que la fabricación aditiva se desarrolle a gran velocidad es **la personalización** que es capaz de ofrecer. Al depender exclusivamente de la impresora y esta ser capaz de imprimir cualquier cosa, las piezas no presentan limite a la hora de personalizarlas como por ejemplo en el sector de la salud, donde se pueden imprimir prótesis a medida para cada paciente según sus necesidades. No requiere de inversiones adicionales para cambiar el tipo de productos que se fabrica; basta con lanzar un nuevo diseño a la impresora y ya se tiene la pieza.

A continuación, se muestra una prótesis de cadera fabricada por aditiva, esta tecnología a permitido personalizar exclusivamente para este paciente la prótesis. [20]

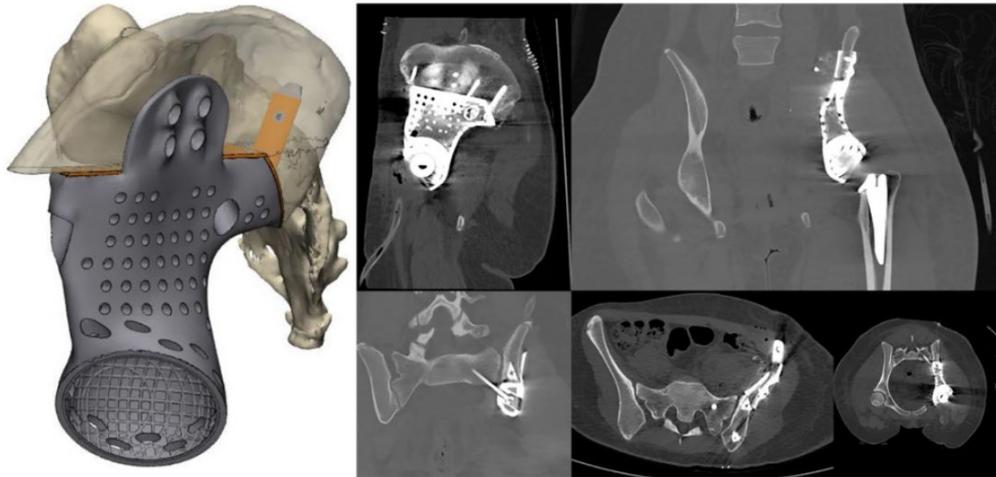


Figura 26 Fabricación aditiva, Prótesis personalizada para pacientes [20]

Con esta tecnología en constante avance surgen nuevas posibilidades cada año. Una innovación muy interesante para la ingeniería es la fabricación de mecanismos integrados. Esto es posible gracias a la capacidad de las impresoras de combinar tanto materiales como formas en una única pieza. Ya se están fabricando sistemas de rodamientos, muelles y todo tipo de mecanismos, eliminando el montaje (Figura 27) y ajuste de las piezas, ya que tiene lugar en la propia fabricación.



Figura 27 Giroscopio impreso en una sola vez (no requiere montaje), fuente: librería de archivos Pngwing

La fabricación aditiva también presenta limitaciones. La primera de ellas es que sigue siendo una tecnología en desarrollo y eso implica que cada producto o pieza que se fabrica debe pasar muchos controles de calidad para garantizar su funcionalidad. Los materiales son muchas veces caros ya que son plásticos y polímeros específicos para la fabricación aditiva y su fabricación resulta costosa.

Pero sin duda la mayor desventaja es el **pequeño volumen de producción** que es capaz de generar esta tecnología. El **coste** de cada pieza, si se quiere una alta calidad en los acabados es muy **elevado**. El **tamaño de las piezas** se limita al tamaño de la impresora y **los tiempos de fabricación** según qué geometría y volumen, pueden ser muy **largos**.

A estas desventajas se le suma el **coste de las impresoras**, la maquinaria. En este coste se ha de incluir, no sólo el del equipo, sino también el de los mantenimientos y las reparaciones que suelen ser habituales.

Las **distintas tecnologías de impresión 3D** disponibles en el laboratorio serán explicadas en: Capítulo 5 Fabricación de un prototipo, “5.1 Tecnologías de impresión 3D”

Capítulo 3. PROPUESTA DEL PROYECTO

3.1 GEOMETRÍA

Para la elección de la geometría se ha escogido un cuadro de bicicleta infantil de montaña. La geometría viene determinada por el propio cuadro ya existente. La obtención de todas las dimensiones se llevará a cabo con la aplicación de ingeniería inversa. El escaneo proporcionará un modelo CAD a escala 1:1.



Figura 28 Bicicleta infantil de montaña escogida para el proyecto, fuente propia



Figura 29 Cuadro desmontado y limpio, fuente propia

Las figuras (Figura 30 y Figura 31) muestran el modelo CAD en SolidEdge del cuadro original escaneado. Para llegar a esta representación del modelo en 3D se ha realizado el escaneo y un trabajo de edición del chasis en SolidEdge.

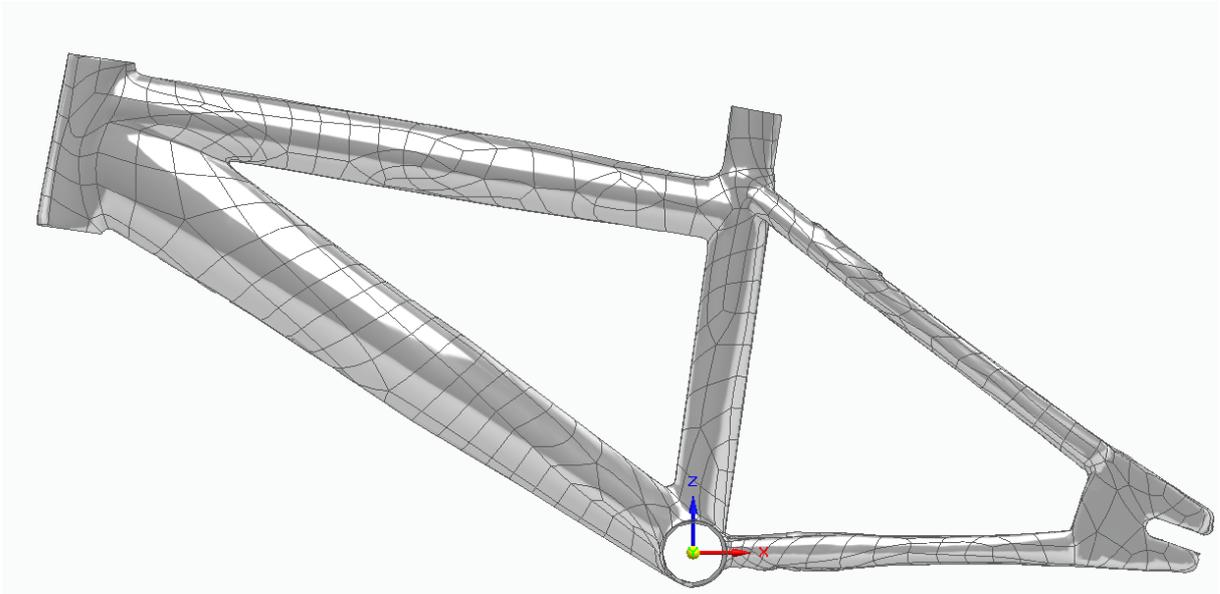


Figura 30 Perfil del modelo CAD en SolidEdge, Fuente propio

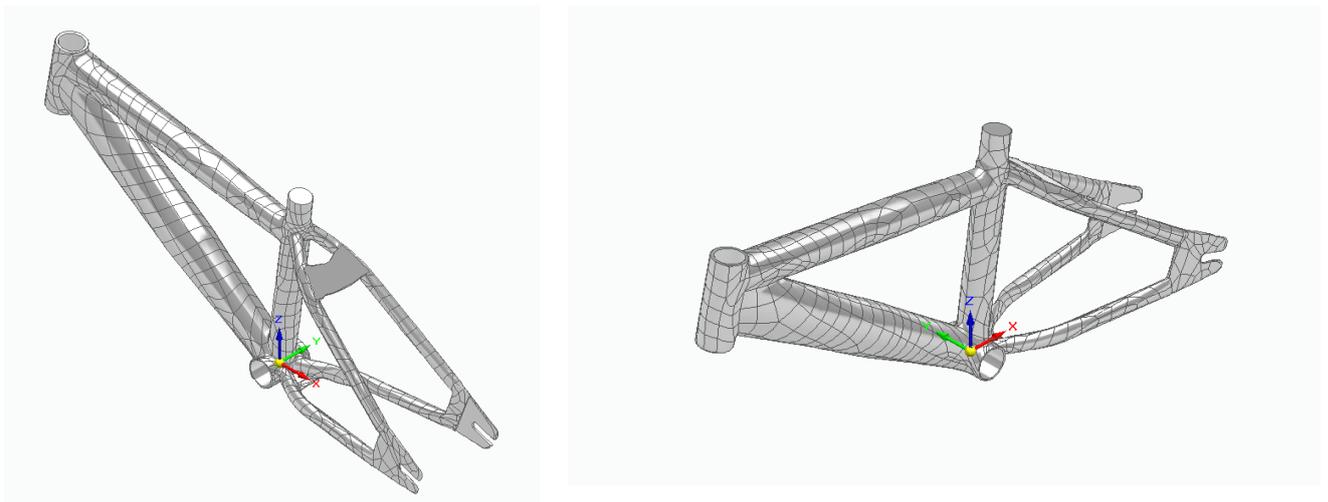


Figura 31 Modelo CAD 3D del cuadro de bicicleta escaneado, fuente propia

3.2 MATERIAL

Para la elección del material se ha realizado un estudio del sector del ciclismo. Las bicicletas de montaña pueden ser, o de fibra de carbono o de aluminio. El 90% de las bicicletas de aluminio usan la aleación 6061-T6 y un 10% la aleación de aluminio 7005, ofreciendo el 6061-T6 mejor rendimiento. En el cuadro que se está estudiando, **el material es aluminio 6061-T6**. Esta aleación de aluminio endurecido contiene principalmente aluminio, magnesio y silicio. Se emplea para estructuras de alta resistencia y tiene un muy buen comportamiento a la corrosión. Durante todos los ensayos, si no se indica lo contrario, **el material será aluminio 6061-T6**.

Tabla 3 Propiedades del Aluminio 6061-T6, Fuente Matweb

Physical Properties	Metric
Density	2.70 g/cc
Mechanical Properties	Metric
Hardness, Brinell	95
Hardness, Knoop	120
Hardness, Rockwell A	40
Hardness, Rockwell B	60
Hardness, Vickers	107
Tensile Strength, Ultimate	310 MPa
Tensile Strength, Yield	276 MPa
Elongation at Break 	17 % @Temperature -28.0 °C
Modulus of Elasticity	68.9 GPa
Notched Tensile Strength	324 MPa
Ultimate Bearing Strength	607 MPa
Bearing Yield Strength	386 MPa
Poissons Ratio	0.33
Fatigue Strength	96.5 MPa @# of Cycles 5.00e+8
Fracture Toughness	29.0 MPa·m ^{1/2}
Machinability	50 %
Shear Modulus	26.0 GPa
Shear Strength	207 MPa
Thermal Properties	Metric
CTE, linear 	23.6 µm/m·°C @Temperature 20.0 - 100 °C
	25.2 µm/m·°C @Temperature 20.0 - 300 °C
Specific Heat Capacity	0.896 J/g·°C
Thermal Conductivity	167 W/m·K
Melting Point	582 - 651.7 °C
Solidus	582 °C
Liquidus	651.7 °C

Tabla 4 Composición Aluminio 6061-T6, fuente Matweb

Elementos	Mínimo (%)	Máximo (%)
Silicio	0,4	0,8
Hierro	0	0,7
Cobre	0,15	0,4
Manganeso	0	0,15
Magnesio	0,8	1,2
Cromo	0,04	0,35
zinc	0	0,25
Titanio	0	0,15

3.3 CONDICIONES DE CONTORNO

Las condiciones de contorno son el conjunto de restricciones que van a limitar los desplazamientos de la pieza con el entorno. En nuestro problema, las condiciones de contorno son impedimentos de desplazamiento en los ejes. Los triángulos azules representan el impedimento, ubicados donde el cuadro está en contacto con el entorno (Rueda trasera y horquilla delantera).

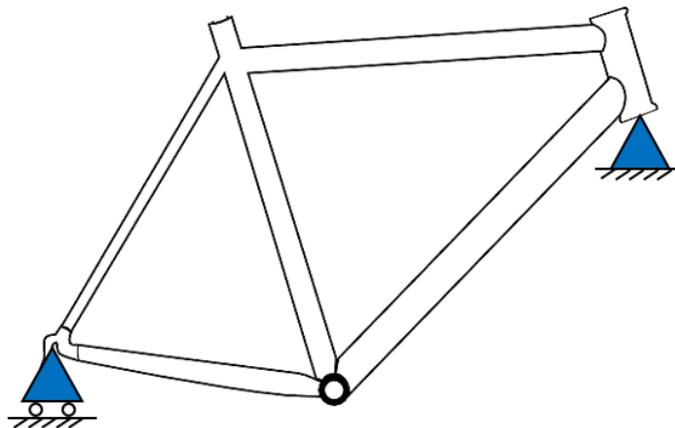


Figura 32 Condiciones de contorno del cuadro, fuente propia

Estas condiciones son las definidas por la norma ISO 4210-6:2015, Métodos de ensayo del cuadro y de la horquilla [21].

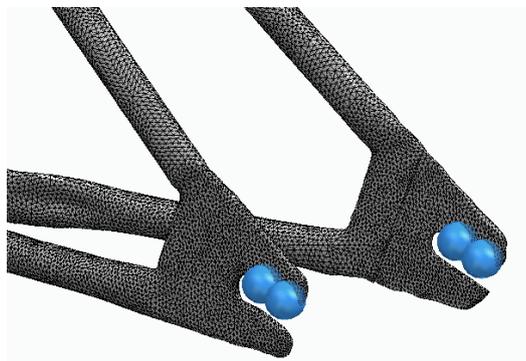


Figura 33 Ejemplo de la representación de la fijación de la articulación en el eje trasero en SolidEdge, fuente propia

3.4 CARGAS

Los requisitos de seguridad para bicicletas de niños se recogen en la norma UNE-EN ISO 8098 [22]. En ella se incluyen los ensayos que hay que llevar a cabo para garantizar la seguridad del bicicleta. En vista de que esta norma propone unos ensayos con cargas bajas que son inferiores a lo que el material es capaz de soportar, se ha decidido emplear la norma UNE-EN ISO 4210-6 V2 [21] que es la norma para los “*Requisitos de seguridad para bicicletas, Parte 6: Métodos de ensayo del cuadro y la horquilla*”. Esta norma recoge los ensayos para cuadros de bicicleta de adultos. Este trabajo final de máster se va a centrar en los ensayos estáticos del cuadro, escogiendo para su análisis: ensayo de fatiga con fuerzas verticales en el pedaleo y ensayo de fatiga con fuerzas verticales sobre la tija del sillín.

La norma de bicicletas infantiles estima la carga máxima en 700N. En la norma de bicicletas de adultos se proponen cargas según la disciplina de ciclismo. Se estudiarán los ensayos para bicicletas de montaña, que se realizan con la mayor carga propuesta para el ensayo entre todos los tipos de bicicleta $P=1200N$. Se ha elegido 1200N en vez de 700N para exigirle más al chasis y poder extrapolar resultados a un chasis de bicicletas de adulto.

Hay dos ensayos posibles en el cuadro; el primero es poner la fuerza en el eje del pedalier y el segundo es poner la fuerza en el apoyo del sillín. Lo primero es saber cuál es el más restrictivo para el cuadro, cuál le exige más a la estructura. Una vez sepamos cuál de los dos ensayos es el más limitante, se realizará la optimización topológica con las cargas de ese ensayo.

Se va a realizar por tanto el análisis de elementos finitos de ambos ensayos para posteriormente sacar el diagrama de esfuerzos y desplazamientos. Tras el análisis se escogerá la carga que servirá para la optimización. Estos análisis se llevarán a cabo en el apartado de Simulación FEM en el capítulo de desarrollo del trabajo.

3.4.1 ENSAYO 1: FUERZA APLICADA EN EL EJE DEL PEDALIER

Tabla 5 Fuerza a aplicar ISO 4210-6:2015 4.3.2 [21]

Tabla 3 – Fuerzas en el eje del pedal

Tipo de bicicleta	Fuerzas en newtons			
	Bicicletas de paseo	Bicicletas para adultos jóvenes	Bicicletas de montaña	Bicicletas de carreras
Fuerza, F_1	1 000	1 000	1 200	1 100

El diagrama del ensayo ubica la fuerza en el pedal, pero el ensayo es en el cuadro, por lo que realmente la fuerza al cuadro en el eje del pedalier, pasando del pedal a la biela y de la biela al eje en el cuadro.

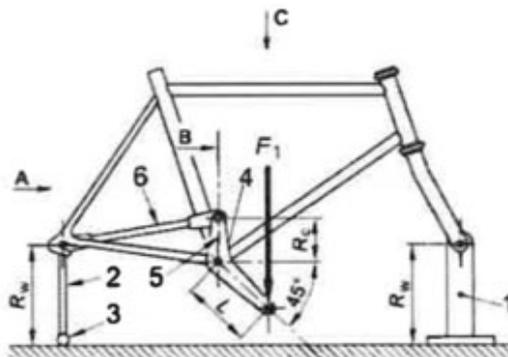


Figura 34 Esquema para el ensayo del cuadro con Fuerza en el eje del pedalier [21]

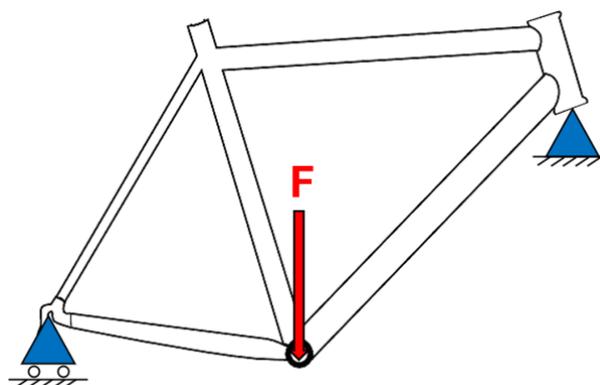


Figura 35 Esquema simplificado para el ensayo del cuadro con Fuerza en el eje del pedalier

3.4.2 ENSAYO 2: FUERZA APLICADA EN EL SILLÍN

Tabla 6 Fuerza a aplicar ISO 4210-6:2015 4.5.2

Tabla 5 – Fuerzas sobre la tija del sillín

Tipo de bicicleta	Fuerzas en newtons			
	Bicicletas de paseo	Bicicletas para adultos jóvenes	Bicicletas de montaña	Bicicletas de carreras
Fuerza, F	1 000	500	1 200	1 200

A continuación, se muestra en un esquema simplificado del ensayo con la fuerza aplicada en el cuadro ubicada donde habitualmente está el sillín.

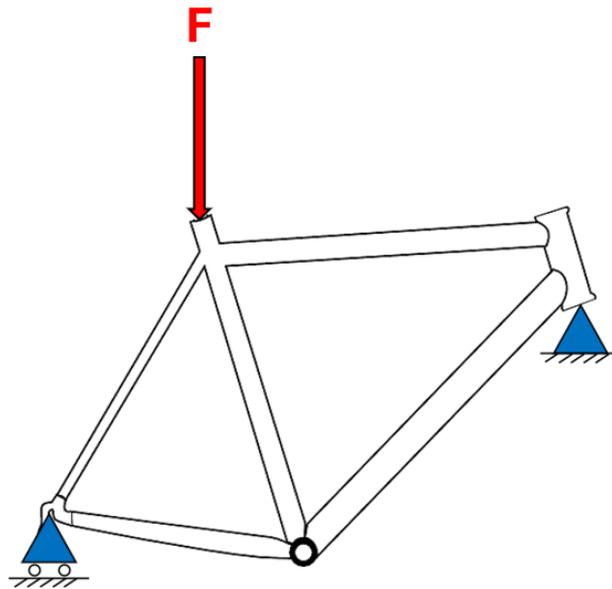


Figura 36 Esquema simplificado para el ensayo del cuadro con Fuerza en el sillín

La siguiente figura es un ejemplo de cómo se ha colocado la fuerza en uno de los ensayos. Se ha dispuesto sólo en uno de los ejes, los otros dos no tienen componente de la fuerza.

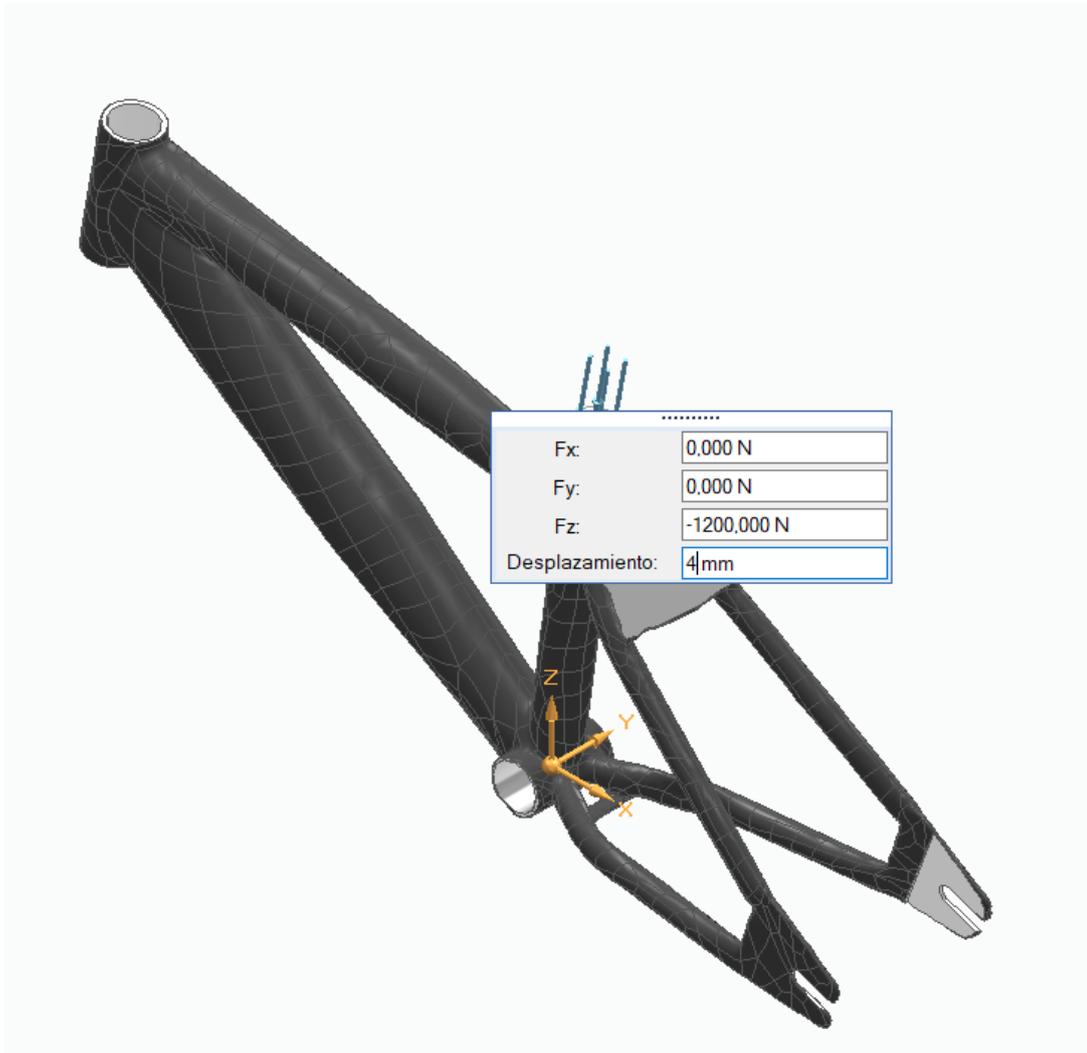


Figura 37 Disposición de la fuerza en los ejes x,y,z, fuente propia

El desplazamiento de 4 mm corresponde a la zona que se va a proteger durante la simulación para evitar que la zona de apoyo de la fuerza se desplace.

Capítulo 4. DESARROLLO DEL TRABAJO

4.1 PROPUESTA DE UN PROCESO DE DISEÑO Y FABRICACIÓN

Tras un estudio de los procesos de diseño de productos, de la ingeniería inversa del diseño generativo, de la optimización topológica y de la fabricación aditiva se va a proponer un ciclo de diseño de un producto enfocado a impresión 3d y optimización topológica. Este ciclo es una propuesta enfocada al proyecto del cuadro de bicicleta, pero es extrapolable a todo tipo de piezas. La figura que a continuación se muestra sirve además de resumen del trabajo y permite ver cómo se ha enfocado el proyecto.

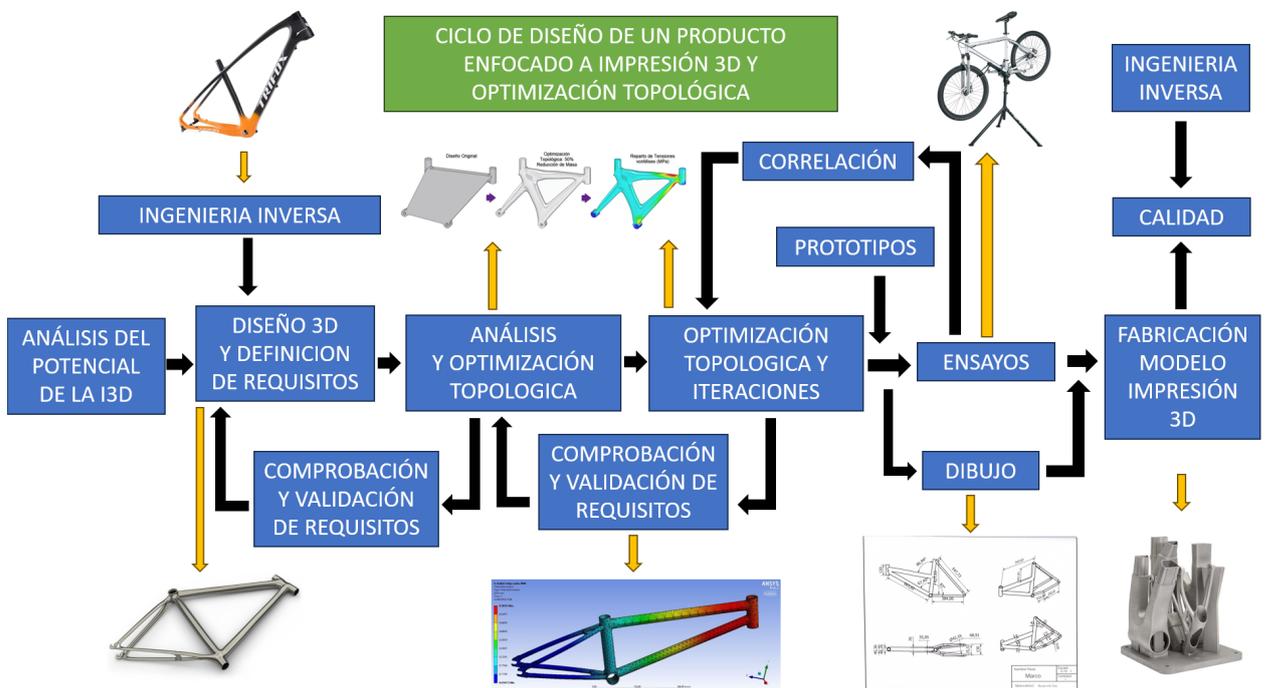


Figura 38 Ciclo de diseño de un producto enfocado a impresión 3d y optimización topológica, fuente propia

El primer paso es analizar el potencial de la impresión 3D para la pieza que se quiere fabricar. Hay que ver si realmente la fabricación aditiva se adapta a la geometría del chasis y al uso que se le quiere dar. El segundo paso es el diseño 3D y la definición de los requisitos. Para el diseño 3D del modelo hay dos opciones, diseñar de manera tradicional, o como en este proyecto, obtenerlo gracias a la ingeniería inversa. Tras realizar el escaneado, hay que realizar un trabajo de diseño. Modelando la nube de puntos, se convierte en un sólido tratable con programas de diseño generativo y optimización topológica. El siguiente paso es entonces la optimización topológica, pero desde un punto de vista del diseño generativo donde se establecen parámetros que se irán modificando en cada iteración. Tras conseguir un modelo optimizado, se debe ir comprobando que se cumplen los requisitos iniciales; por ello se analiza con el método de elementos finitos y se estudian los resultados de los diagramas de esfuerzo. Al final del ciclo, con el último modelo optimizado, se realiza el ensayo de cargas para comprobar el resultado final. Si es superado con éxito se puede seguir avanzando en el ciclo propuesto, pasando a la fabricación del modelo con impresión 3D. Para conseguir un modelo funcional en impresión 3D se tiene que trabajar el modelo, las superficies, como por ejemplo suavizándolas, para dar un producto final de calidad. Por último, en el ciclo se puede realizar ingeniería inversa de manera complementaria para el control de calidad del producto final.

4.2 ESCANEADO DE LA GEOMETRÍA

Siguiendo la metodología establecida en el estado de arte para aplicación de la ingeniería inversa, el primer paso es saber qué escáner escoger para la pieza que se tiene que trabajar. Se va a emplear un escáner de luz blanca estructurada sin contacto, dado que presenta las características necesaria para escanear la pieza.

Escáner: El “GO!SCAN 50” del fabricante Creaform



Figura 39 Escáner GO!SCAN 50, fuente Web Creaform

- Emite luz blanca de tipo Led
- Resolución de 0.500 mm y una precisión de hasta 0.100 mm.
- Este escáner emplea el método de posicionamiento geométrico por objetivos (pegatinas circulares).
- Para el escaneo harán falta 400 mm de distancia a la pieza.
- Para el tratamiento de imágenes el programa que se emplea es el VXmodel/VXelements.

Un aspecto muy importante para llevar a cabo un escaneo con éxito es la preparación de la pieza. Consiste en limpiar la pieza y pintarla con un espray mate específico para escaneo que elimina los brillos que podrían más tarde dificultar la tarea del escaneo.



Figura 40 Cuadro limpio preparado para aplicar espray, fuente propia



Figura 41 Aplicación del tratamiento anti-brillos, fuente propia

Los patrones del luz que emplea este escáner son “QRs”; los emite con la luz blanca y la cámara va leyendo, y en función de cómo impacten en el sólido es capaz de recrear la superficie. Para poder posicionar todas estas lecturas el cuadro debe ser equipado con unas pegatinas de referencia que la cámara va leyendo, para ubicar en el espacio las distintas sesiones de escaneo. Se realizarán varias sesiones de escaneo y se van a combinar todas ellas para generar una sola nube de puntos muy completa con muchos detalles.

Una vez se ha aplicado el tratamiento y se han puesto las pegatinas, hay que preparar la mesa de escaneo. Para escanear se ha empleado una mesa rotativa con pegatinas de referencia y se han colocado paneles blancos con pegatinas también para eliminar el ruido de fondo.



Figura 42 Cuadro preparado para el escaneo en mesa, fuente propia

Se han realizado múltiples sesiones de escaneo y se han unido mediante VXelements [2]. A continuación se muestran una imagen de una de las sesiones de escaneo. En ella se puede observar la luz estructurada, donde se proyectan “QRs”.

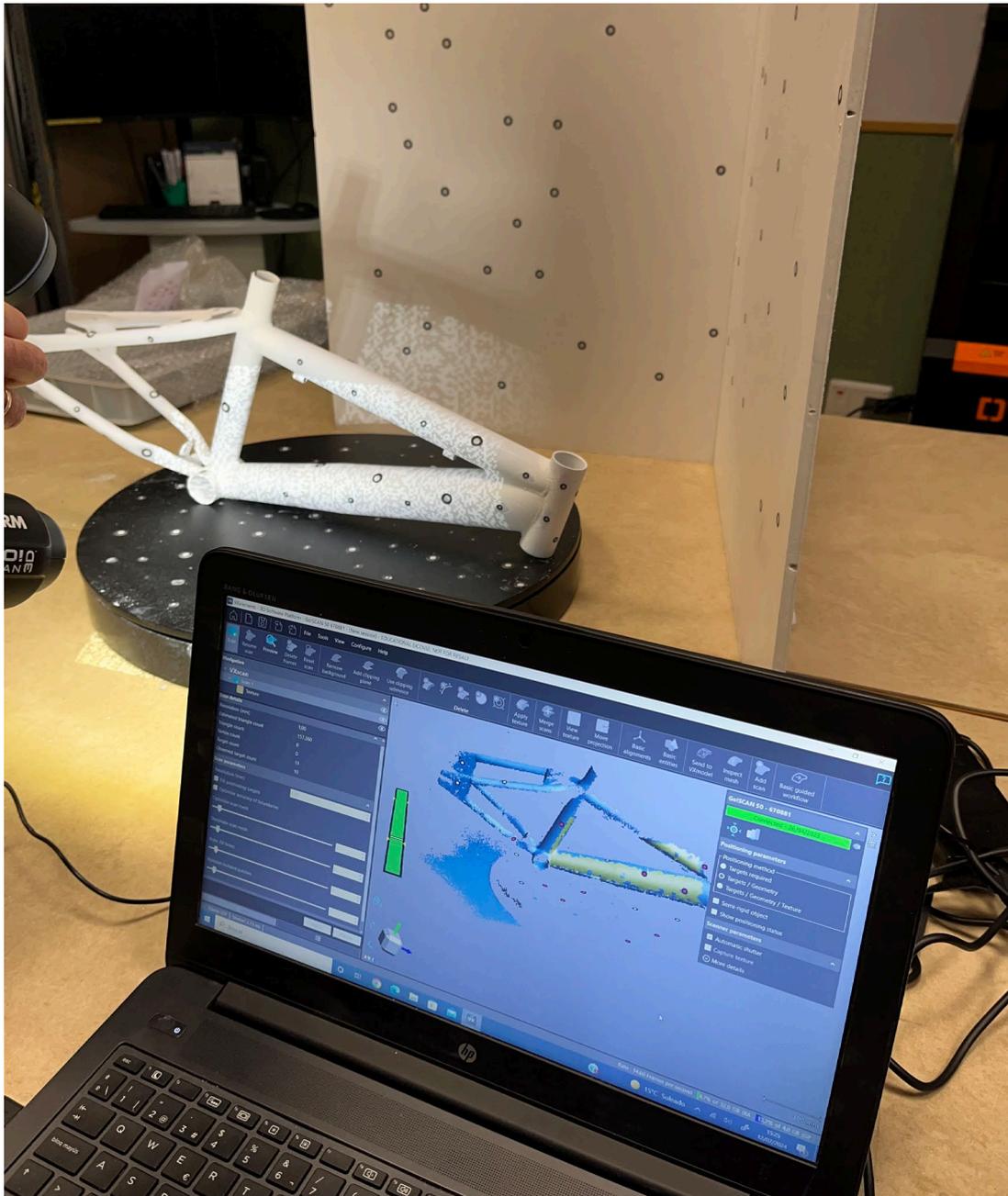


Figura 43 Sesión de escaneo emisión de QRs, fuente propia

Las siguientes imágenes muestran dos sesiones de escaneo donde el cuadro se encuentra en distintas posiciones, más tarde se unirán gracias a las pegatinas de referencia.

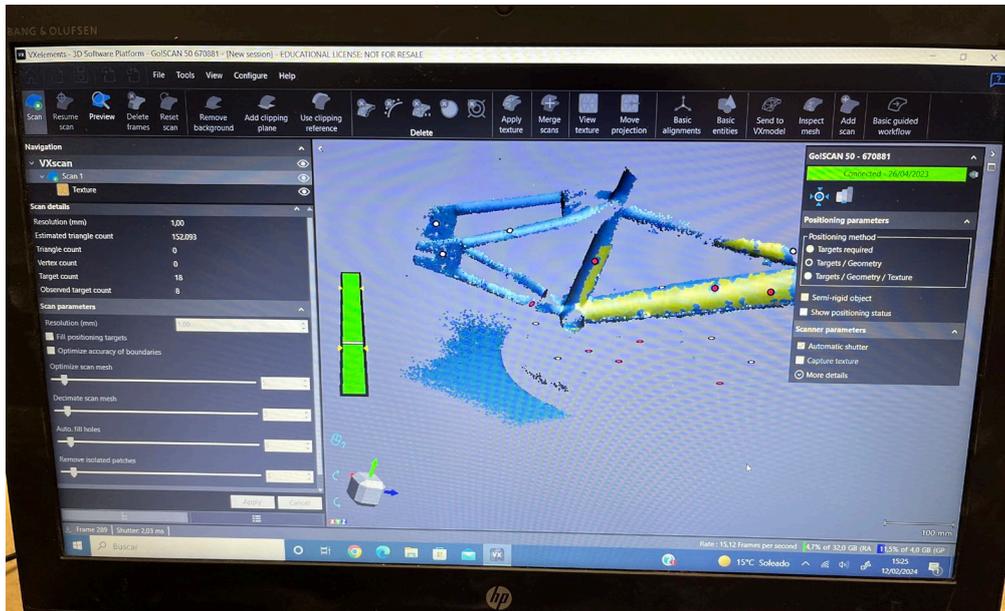


Figura 44 Sesión de escaneo con cuadro hacia arriba, fuente propia

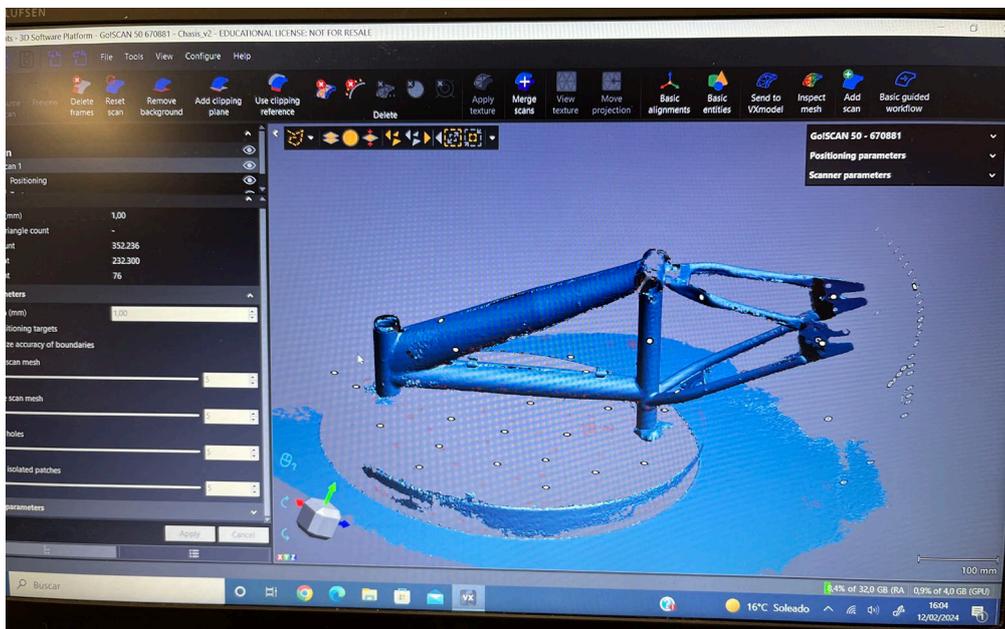


Figura 45 Sesión de escaneo con cuadro hacia abajo, fuente propia

4.3 TRABAJO DE LA NUBE DE PUNTOS Y DEL MALLADO

El paso previo al mallado es tener una nube de puntos completa. Para ello, se estudian todas las sesiones de escaneo, se han usado 8 sesiones en total. Todas las sesión de escaneo se han registrado en VXmodel [2]. De cada sesión se obtiene una nube de puntos única. De todas las nubes, cuatro tienen la posición del cuadro hacia arriba y las otras cuatro hacia abajo, por lo que hay que conseguir unir una al menos hacia arriba con una hacia abajo; para tener una nube que sea capaz de representar la pieza al completo. Para aumentar la calidad y detalle de la nube, se han unido dos nubes en cada posición. Y posteriormente, se han unido las dos nubes anteriores (es decir 4 nubes unidas). Tras este paso conseguimos tener una “cáscara” de puntos que conforma el sólido escaneado.

El siguiente paso es trabajar la nube para eliminar todo el ruido, rugosidades, imperfecciones, picos y cerrar los huecos que hayan podido quedar. Es muy importante dejar la nube lo más limpia y sencilla posible, ya que si no, puede dar problemas en el momento del mallado. A continuación, se mostrarán capturas de pantalla del proceso de limpiado y simplificado de la nube de puntos. Este paso es el más importantes de la ingeniería inversa ya que determinará la calidad del mallado. Una nube de puntos mal definida y trabajada puede llegar, incluso, a impedir el mallado.



Figura 46 Nube de puntos sin trabajar con cuadro hacia abajo, fuente propia

Se pueden ver las pegatinas de referencia en las capturas de las sesiones de escaneo.



Figura 47 Nube de puntos sin trabajar con el cuadro hacia arriba, fuente propia

En la siguiente captura se puede observar como en los escaneos con el cuadro colocado en su posición natural, la parte inferior no es registrada. La nube queda incompleta donde la luz blanca no llega.

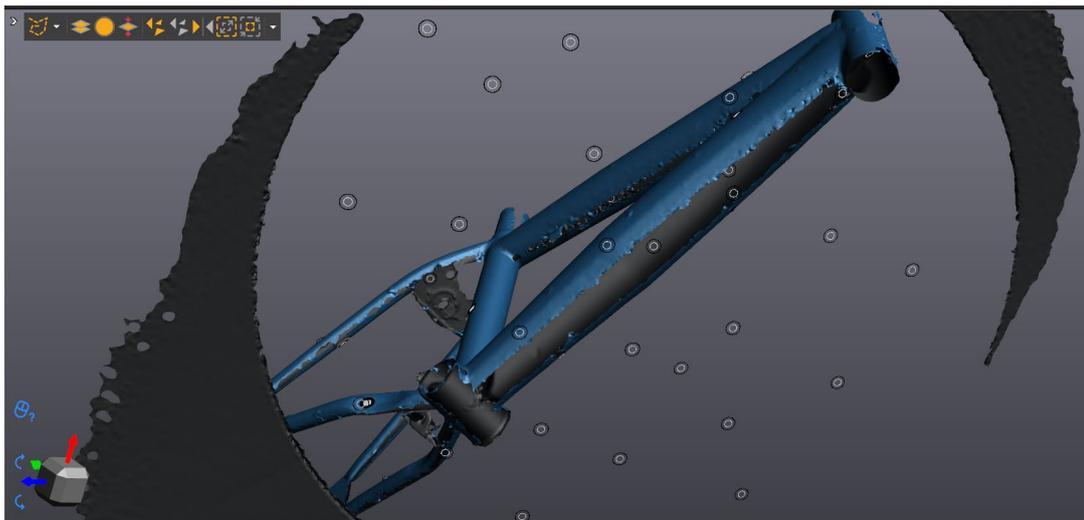


Figura 48 Captura de pantalla de nube de puntos incompleta, fuente propia

Las capturas que a continuación se irán mostrando son ejemplos de las correcciones que se han ido realizando, el número total de correcciones que hicieron falta para obtener una nube detallada limpia y terminada fue de 136 tareas (eliminación de puntos alejados, corrección de picos, cerrado de agujeros, suavizado de superficies).

Esta primera captura muestra el resultado de unir 4 nubes de puntos, una vez eliminado el ruido de fondo como son los puntos de la mesa giratoria o de los paneles de fondo. Las nubes se han podido unir gracias a las pegatinas de referencia que ayudan al software a ubicar la orientación del cuadro y una pegatinas de una sesión con pegatinas de otra sesión consiguiendo que las nubes se superpongan. Esta nube ya no presenta zonas con grandes huecos sin puntos, y sí presenta exceso de puntos en algunas zonas como por ejemplo en el eje de la horquilla de la bicicleta. Este exceso de puntos corresponde a la plastilina que se usó para fijar el cuadro boca abajo y evitar que se cayera mientras era escaneado.



Figura 49 Nube resultado de la unión de nubes incompletas, fuente propia

La segunda captura corresponde a la eliminación de los puntos de la plastilina. Se ha empleado una herramienta de selección de puntos para posteriormente eliminarlos.

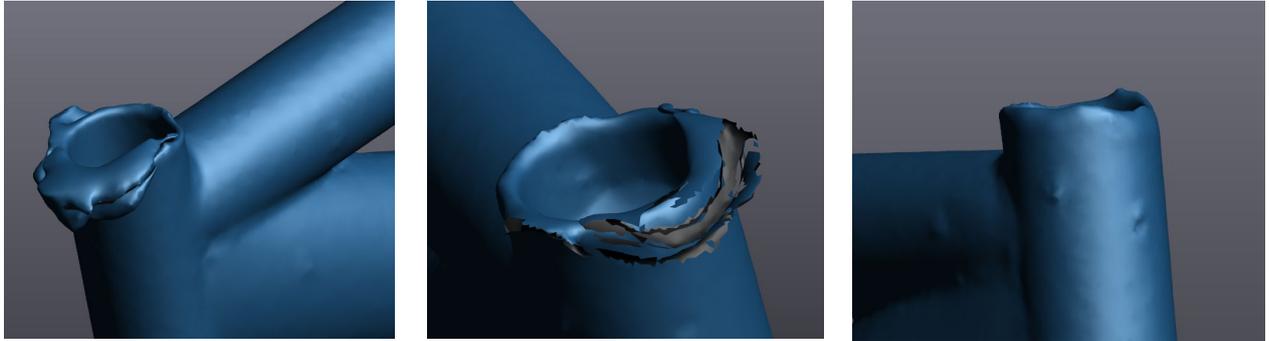


Figura 50 Proceso de eliminación de defecto mayor en nube de puntos, fuente propia

La siguiente tarea es la eliminación de los detalles asociados al grosor de las pegatinas de referencia.



Figura 51 Selección de defectos asociado a las pegatinas de referencia, fuente propia

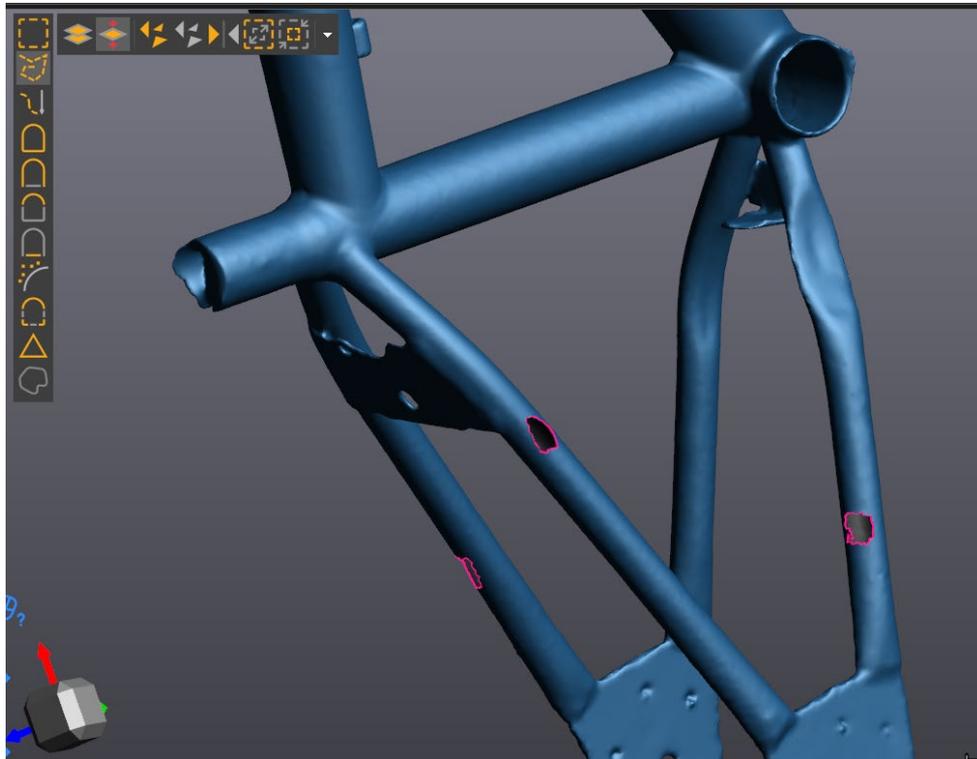


Figura 52 Eliminación de defectos de la nube de puntos

Las próximas capturas muestran la eliminación de un pico. Estos picos son muy difíciles de mallar por su geometría y espesor. Si se intenta mallar con los picos, la malla no se cierra y es inservible.

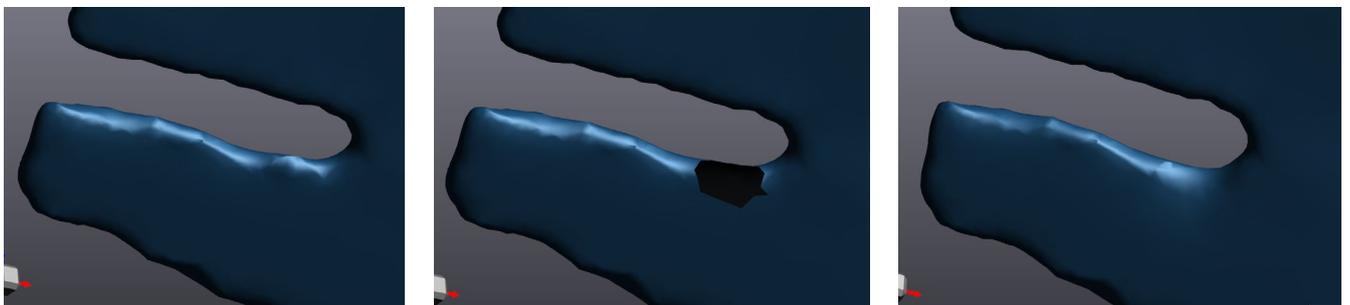
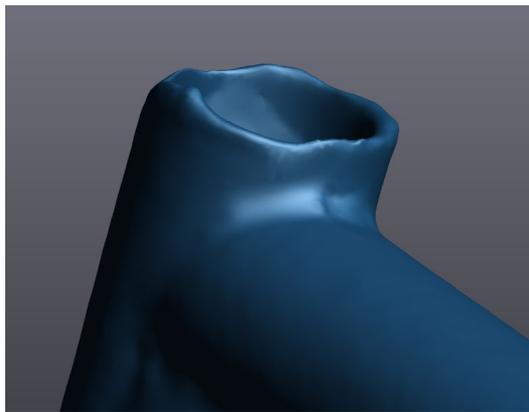
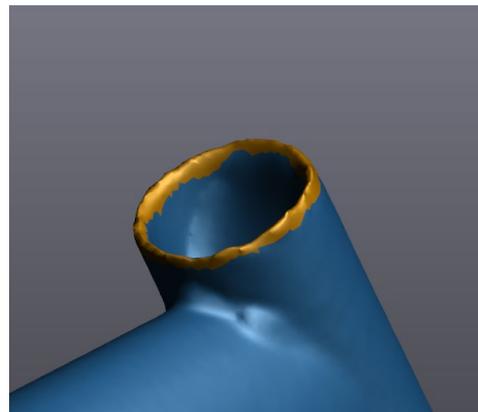


Figura 53 Proceso de eliminación de pico en la nube de puntos, fuente propia

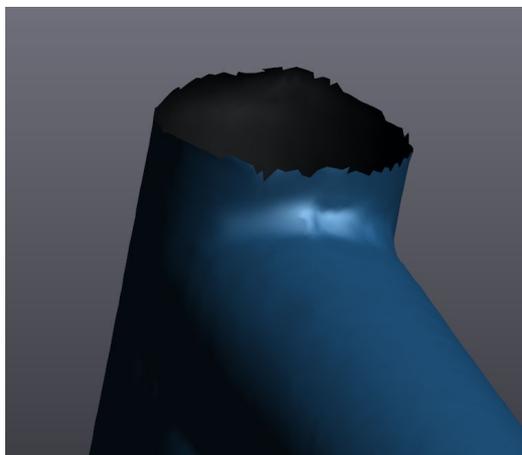
Los agujeros correspondientes a los ejes como el de la horquilla, o el del pedalier se han trabajado con la idea de recrearlos de nuevo en SolidEdge y en VXmodel sólo se prepara la zona para la edición más tarde.



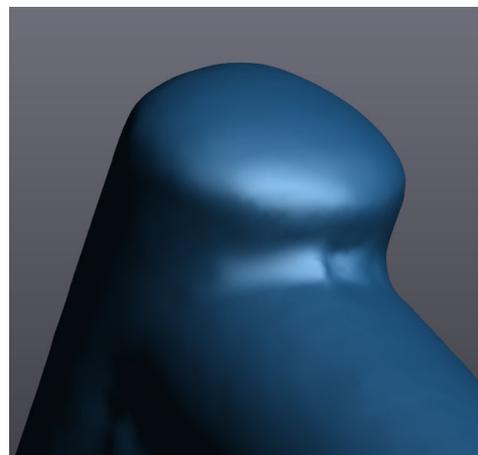
1) Identificación de la zona



2) Selección de la zona



3) Eliminación de los pico y defectos



4) Suavizado y redondeo de la zona

Figura 54 Trabajo de suavizado y protección de zonas a tratar en SolidEdge, fuente propia

La siguiente figura muestra uno de los elementos más conflictivos en la nube de puntos: las pequeñas “sierras o dientes” que se forman en zonas de poco espesor.

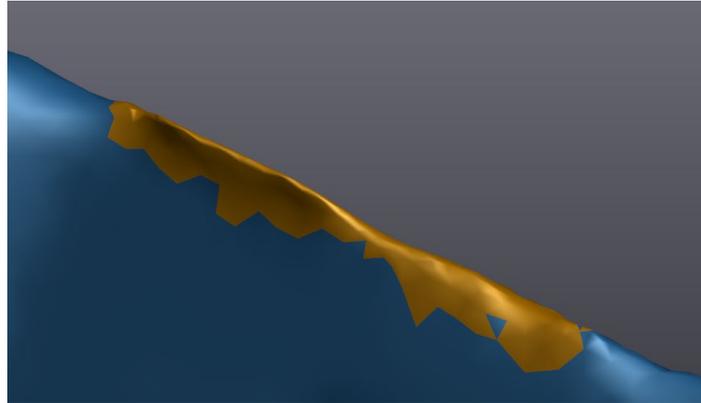


Figura 55 Elemento conflictivo en nube de puntos, fuente propia

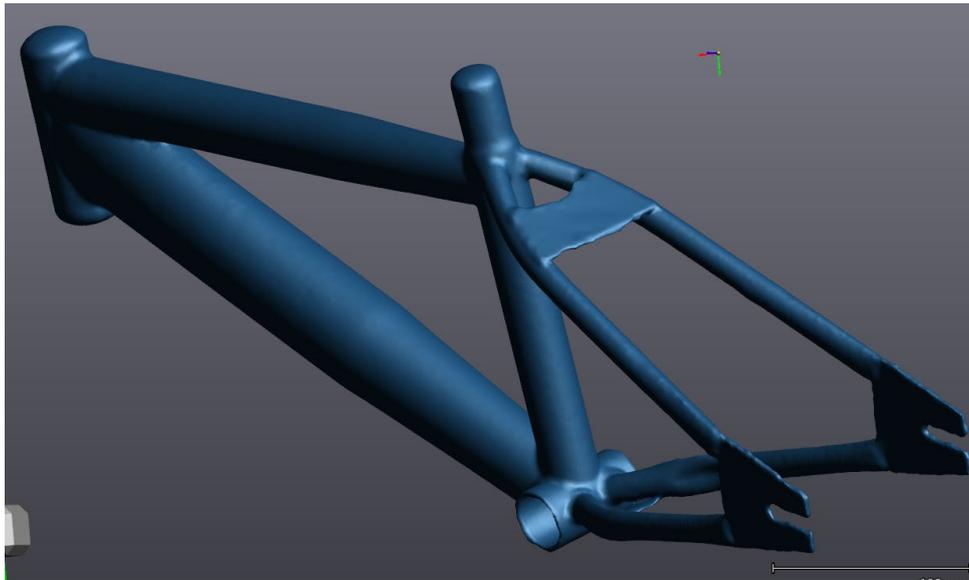


Figura 56 Nube de puntos terminada y lista para el mallado, fuente propia

Tras la eliminación y corrección de todos los defectos, el siguiente paso es el de mallar la nube de puntos. Para ello hay que tratar de definir el máximo número de superficies que se asemejen a planos o figuras geométricas como cilindros. Esto será de gran ayuda para cuando le pidamos al software que auto-malle ya que tendrá algunas referencias. Los conceptos de automallado se han analizado en “6.4.1 MESH2D Automatic Mesh Generator” [17].

Definición de los planos en las superficies que son de anclaje y colocación de los cilindros en las zonas necesarias, eje del pedalier y eje de la dirección .

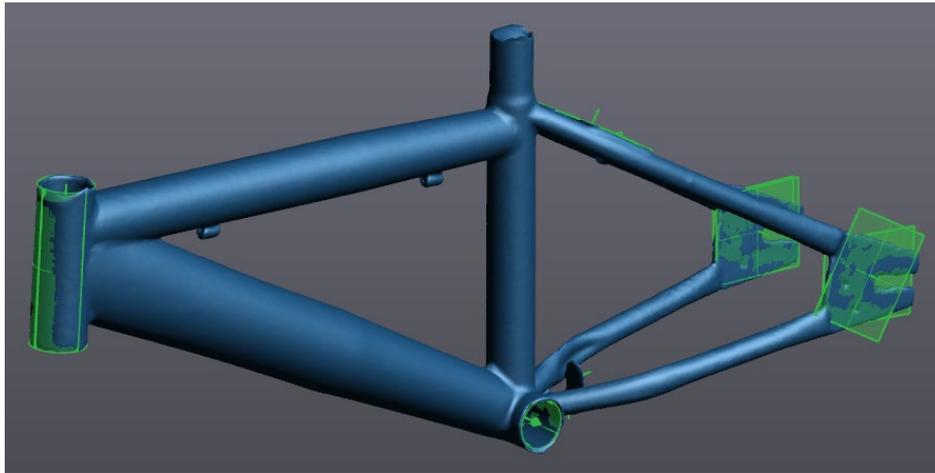


Figura 57 Colocación de planos y cilindros para el mallado Vxelementos, fuente propia

Detalle de los planos colocados en las superficies de anclaje del eje trasero:

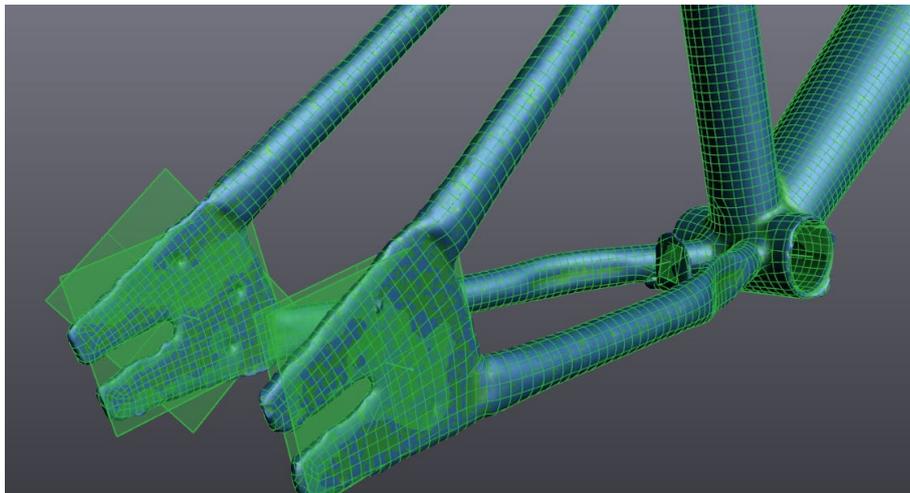


Figura 58 Detalle de los planos del mallado, fuente propia

La siguiente figura corresponde al mallado completo del cuadro de bicicleta y los parámetros seleccionados, 8 puntos de control 8 y 2500 parches (valores estándar).

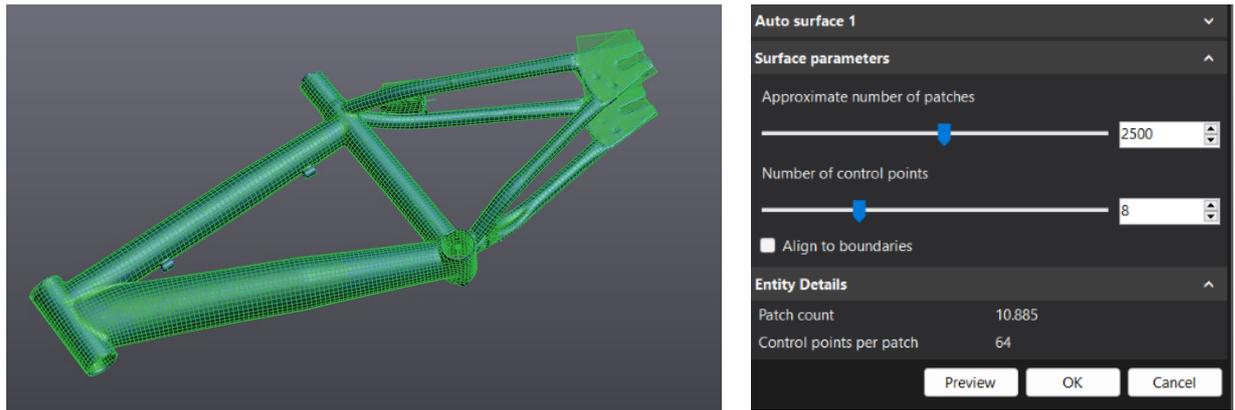


Figura 59 Mallado completo y selector de parámetros de mallado, fuente propia

Una vez se ha cerrado por completo la malla, se realiza la corrección de uno de los cilindros que se ha descolocado con el mallado automático.

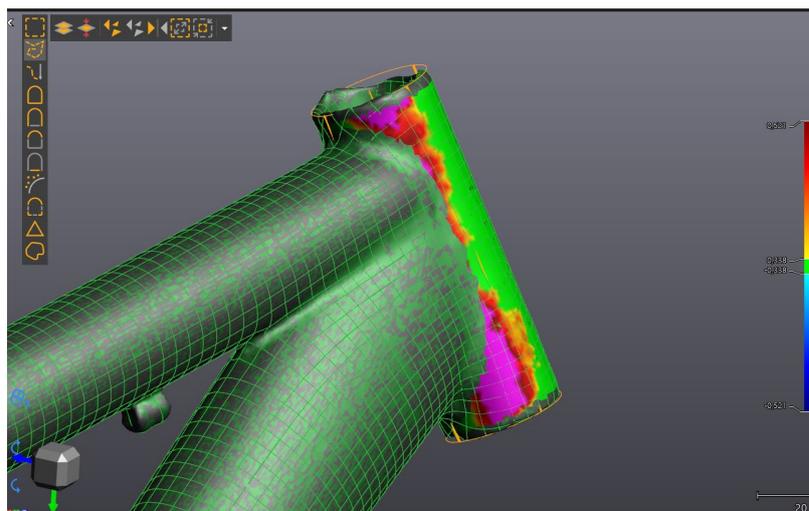


Figura 60 Corrección de un cilindro en la malla, fuente propia

Una vez se ha cerrado la malla, se puede convertir en sólido gracias a una herramienta que dispone VXmodel que permite convertir la malla a un archivo compatible con SolidEdge o SolidWorks.

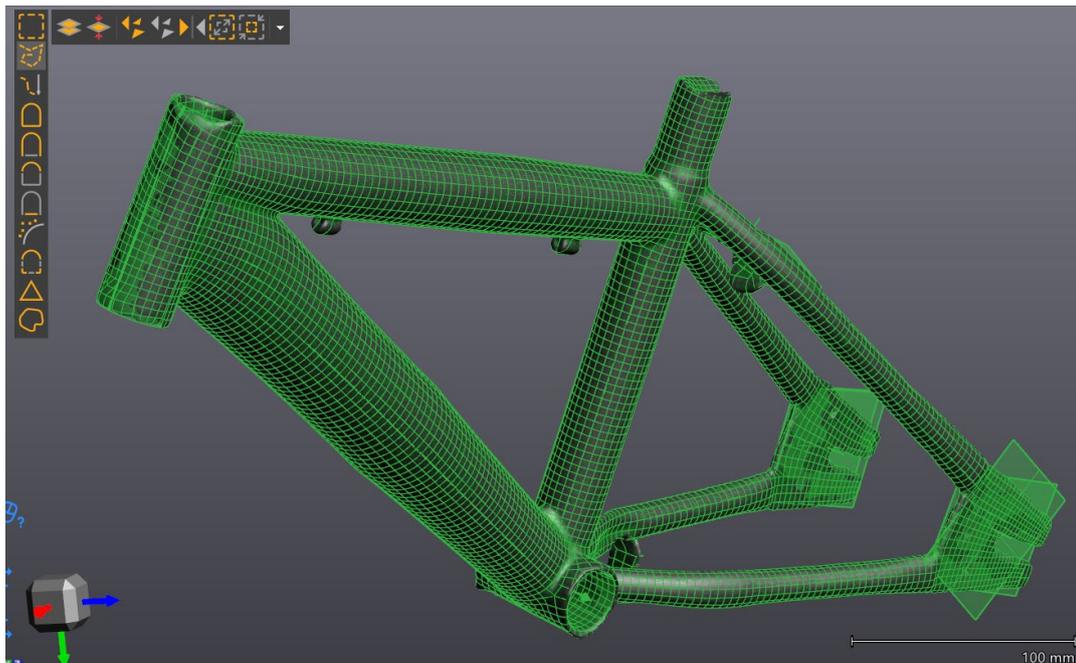


Figura 61 Malla cerrada en VXmodel, fuente propia

Este archivo presenta un defecto a la hora de trabajar el sólido. Para solucionarlo se debe convertir el sólido en un archivo tipo Nurbs. El siguiente apartado explica la conversión.

4.4 CONVERSIÓN A NURBS

Después de haber trabajado la nube de puntos y mallarla, el siguiente paso es convertir esa nube de puntos en sólido. VXmodel convierte automáticamente la malla en un sólido, pero presenta un problema, el sólido es convertido en una pieza de una única cara. Al tener ahora una sola cara, si se le aplica una fuerza en alguna parte de la superficie se le aplicará por igual en toda la superficie impidiéndonos definir espacios en la pieza. Para ello hay que dividir la superficie en pequeñas “parcelas” donde cada una sea una superficie distinta de la contigua.

A continuación, se muestra el flujo de trabajo de la ingeniería inversa:

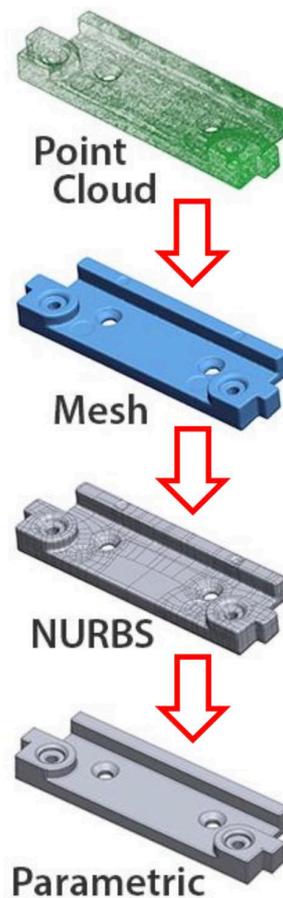


Figura 62 Flujo de trabajo de ingeniería inversa, Apuntes de ingeniería inversa ICAI [11]

En este proyecto el final de la ingeniería inversa es el nurbs. Ese formato es el que se va a trabajar en SolidEdge.

Para la conversión nurbs de la malla se va a emplear el software “Altair® Inspire™” que realiza la conversión de manera automática [23].



Figura 63 Modelo CAD del escaneo de una única superficie

El siguiente sólido ha sido la base para el trabajo en SolidEdge:

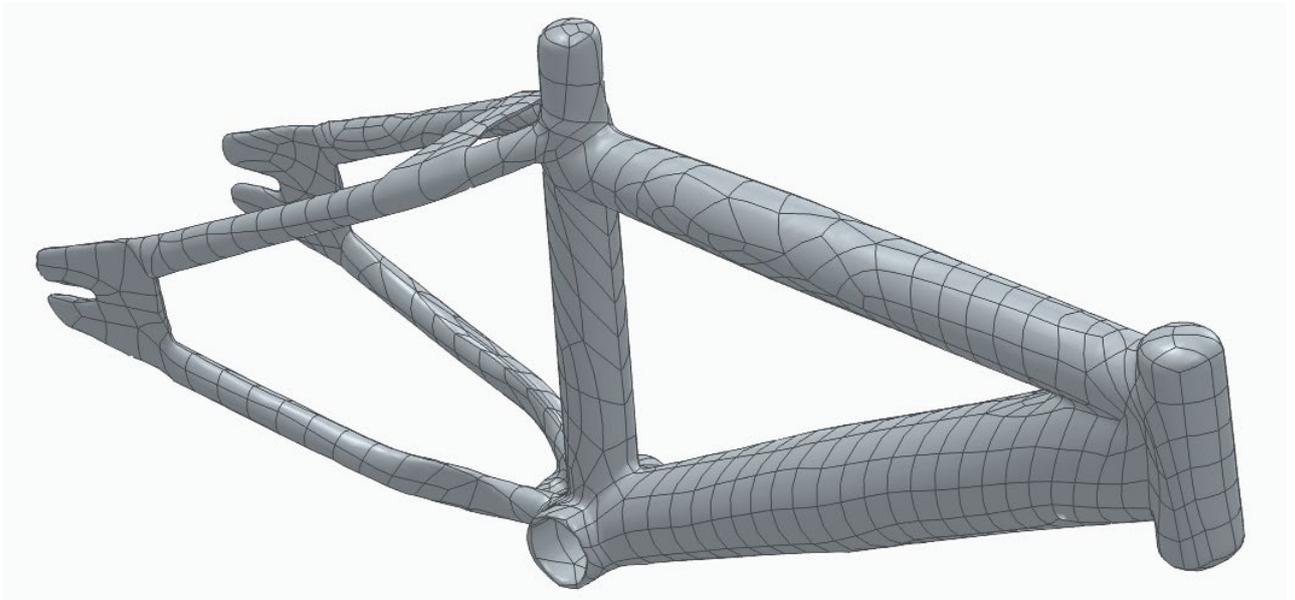


Figura 64 Modelo sólido del escaneo con superficie Nurbs

4.5 TRABAJO DE DISEÑO EN EL SÓLIDO

En este apartado se va a mostrar el trabajo realizado en SolidEdge [3]. El sólido recibido del escaneo es una versión simplificada del cuadro. Se tiene que reconstruir los detalles que se han perdido durante el escaneo y mallado.

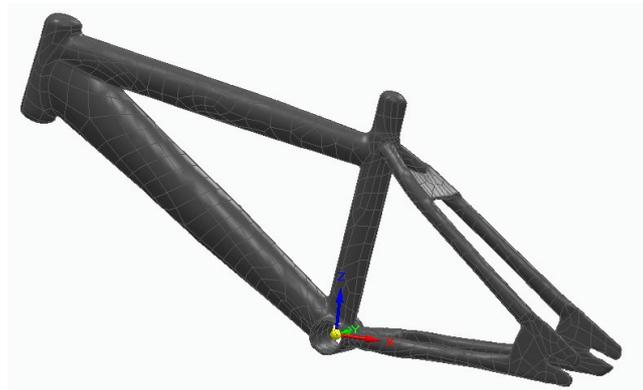


Figura 65 Sólido recibido del escaneo y pasado por Altair para obtener una superficie Nurse, fuente propia

Para poder editar las zonas del sólido, se requiere la colocación de planos sobre las superficies. La siguiente figura muestra un ejemplo de colocación de planos sobre la pieza. En este ejemplo se han trabajado las superficies superiores de los cilindros donde la tija del sillín y la dirección se apoyan.

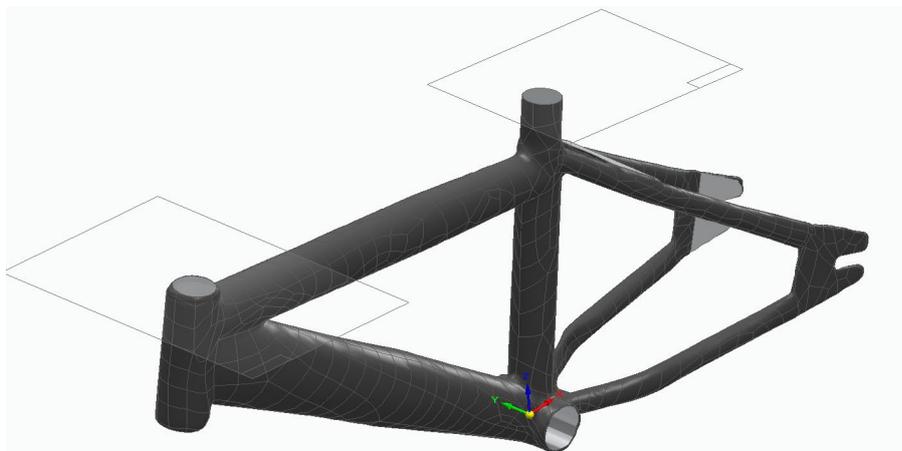


Figura 66 Planos para la edición de la pieza, fuente propia

En total se han necesitado 35 planos para reconstruir los detalles del cuadro original. La siguiente figura muestra los planos principales empleados para las tareas de edición del sólido.

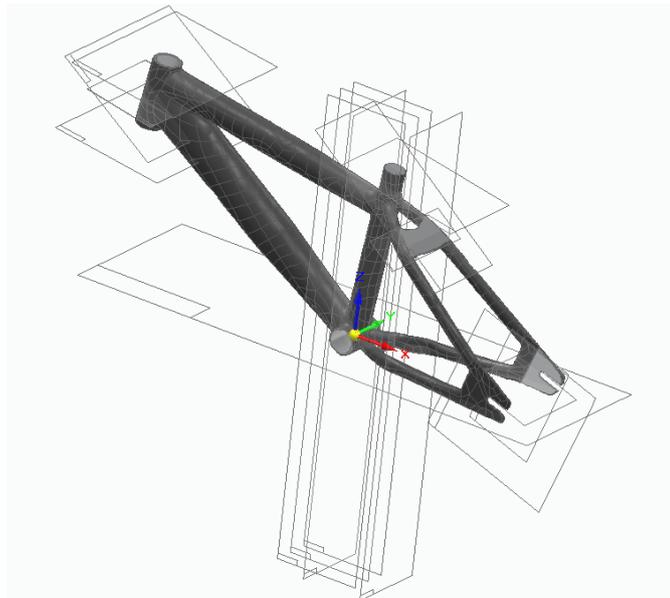


Figura 67 Sólido con los planos más significativos empleados en el diseño final de la pieza, fuente propia

Otra tarea muy importante es recrear los planos empleados para la sujeción de componentes. La siguiente figura es una zona lisa del cuadro empleada para el montaje del freno trasero de la bicicleta.

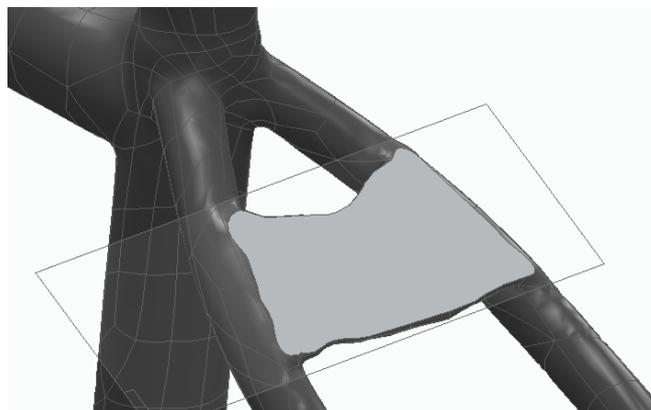


Figura 68 Placa de anclaje del freno trasero, fuente propia

A continuación se muestra el antes y después de la reconstrucción de uno de los anclajes del eje trasero del cuadro.

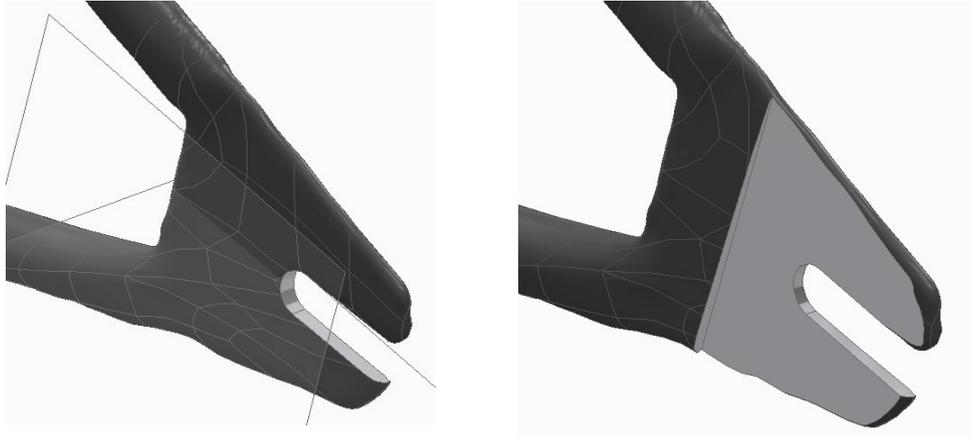


Figura 69 Anclaje derecho del eje trasero, fuente propia

En la siguiente figura se puede ver el resultado de reconstruir el eje del pedalier.

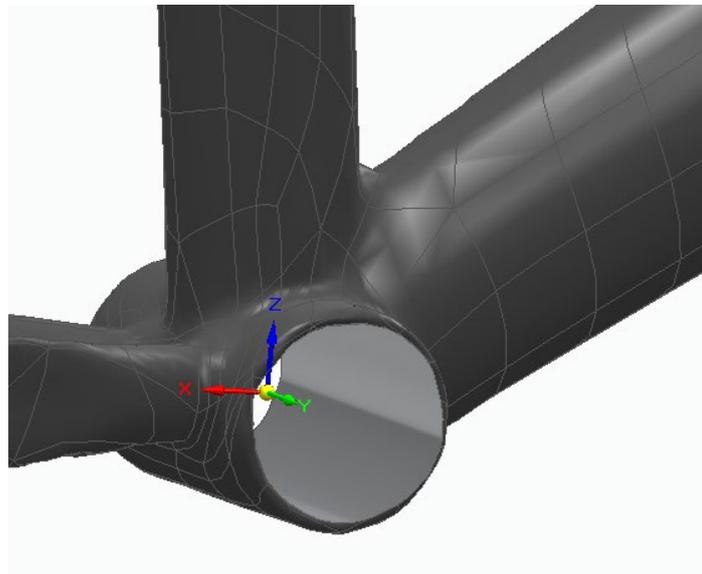


Figura 70 Eje del pedalier SolidEdge, fuente propia

Tras un largo trabajo de diseño, edición y reconstrucción el resultado es prácticamente idéntico al cuadro original escaneado. Se ha conseguido replicar todas las zonas de fijación de componentes y se han trasladado correctamente las dimensiones de los ejes del cuadro; los dos cilindros tienen las mismas dimensiones que en el cuadro original. Las siguientes figuras muestran el resultado.

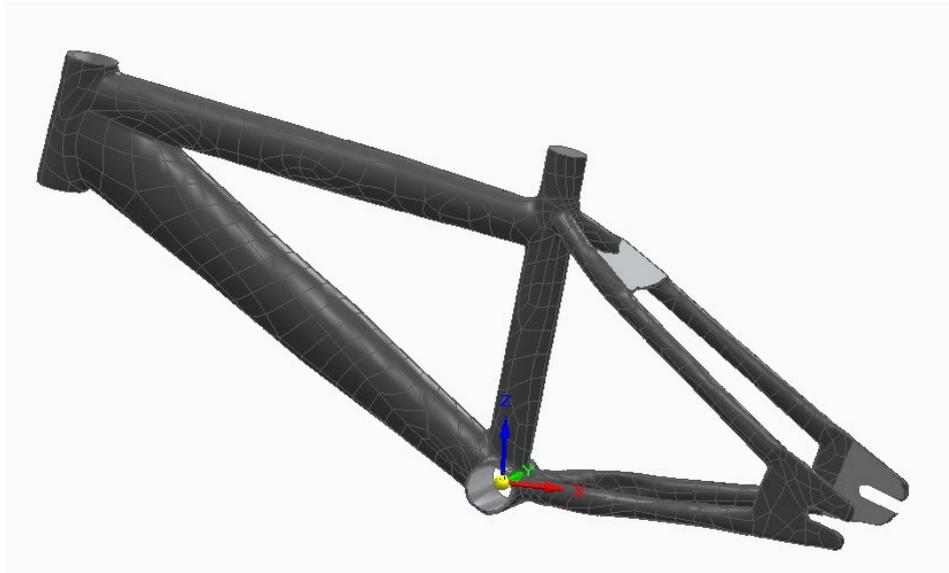


Figura 71 Cuadro escaneado terminado, fuente propia

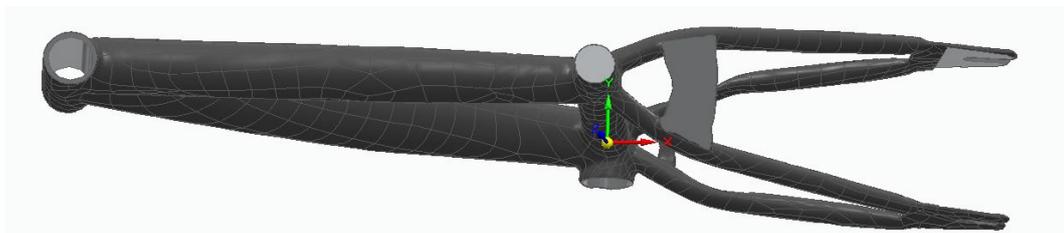


Figura 72 Vista superior del cuadro terminado, fuente propia

4.6 ASIGNACIÓN DEL MATERIAL

Dentro del módulo de simulación, SolidEdge dispone de una librería de materiales entre los que se encuentra la aleación de aluminio AL 6061-T6. Se ha seleccionado el aluminio 6061-T6 para el chasis.

Tabla 7 Seleccionador de material en SolidEdge, Aluminio 6061-T6, fuente propia

Mostrando propiedades de: Aluminio, 6061-T6 (Materials\Metales\Aleaciones de aluminio)

Estilo de cara: Aluminio  Administrar estilos...

Estilo de relleno: ANS138(Aluminio)  Administrar estilos...

Propiedades

Nombre de propiedad	Valor	Eliminar...	Editar ...
Densidad	2712.000 kg/m ³		
Coefficiente de expansión térmica	0.0000 /C		
Conductividad térmica	0.180 kW/m-C		
Calor específico	920.000 J/kg-C		
Módulo de elasticidad	68947.570 MPa		
Coefficiente de Poisson	0.330		
Límite elástico	275.790 MPa		
Tensión de rotura	310.264 MPa		
Elongación %	0.000		

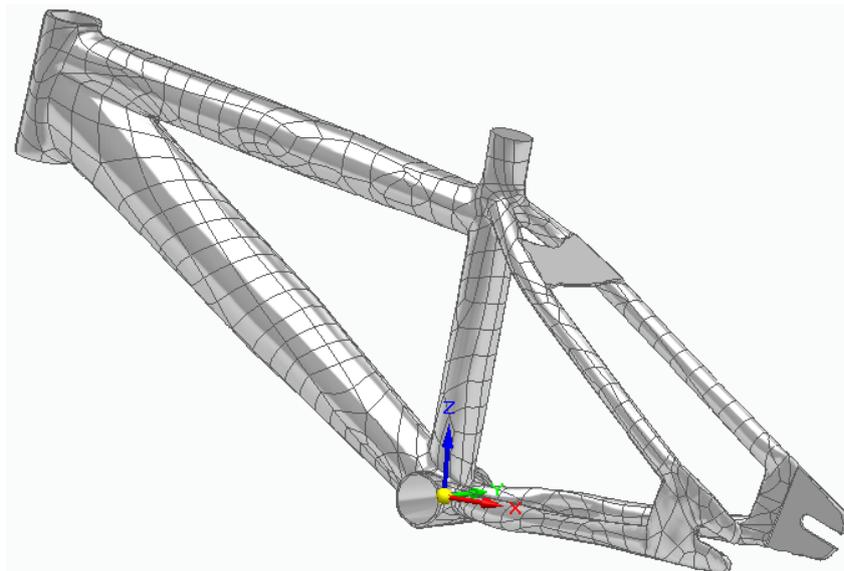


Figura 73 Cuadro escaneado modelo en aluminio 6061-T6

4.7 ASIGNACIÓN DE CARGAS Y RESTRICCIONES

En este apartado se va a mostrar el resultado de haber introducido las cargas marcadas por la norma como ya se explicó en el apartado 3.4. Además de introducir la carga del ensayo se deben introducir las condiciones de contorno. La fuerza se orienta como se indicó en el apartado 3.4, es decir, en el eje z dejando los otros dos ejes sin carga. Los elementos esféricos representan la articulación de la restricción de contorno.

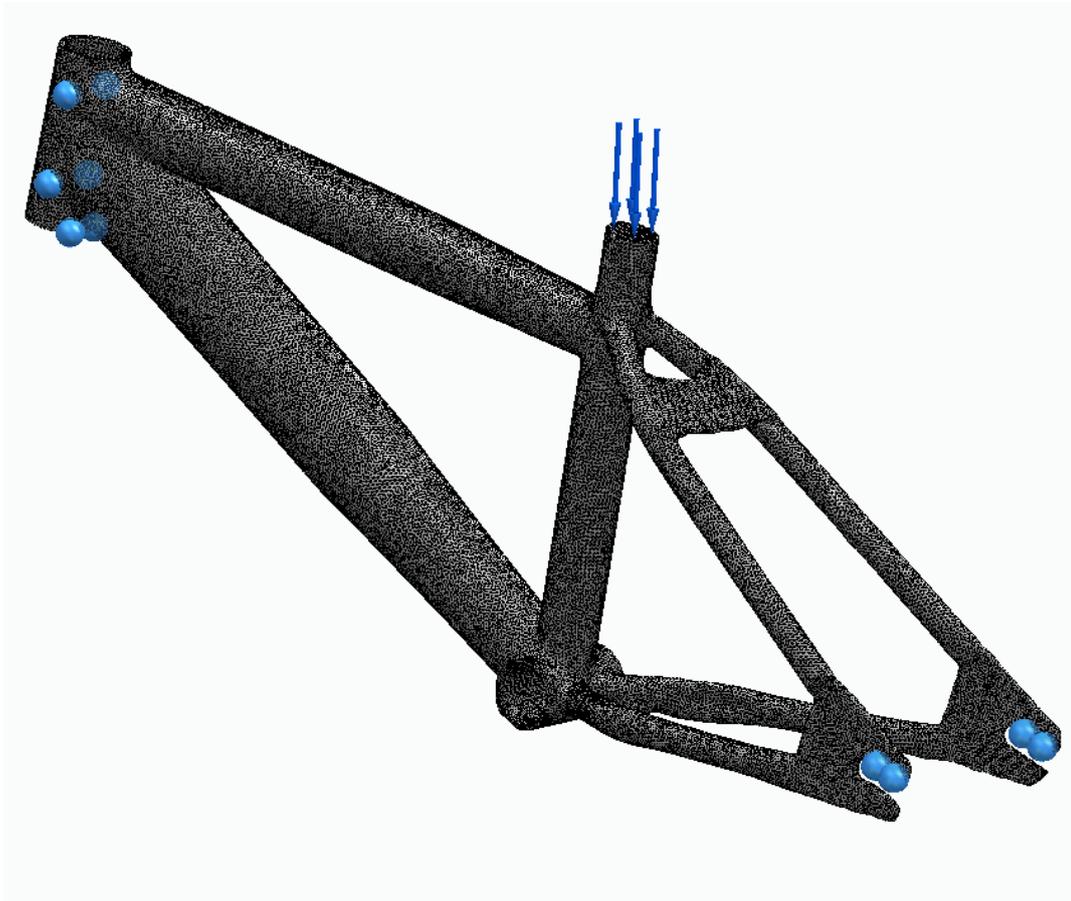


Figura 74 Asignación de cargas y restricciones, fuente propia

4.8 SIMULACIÓN FEM

Estos estudios estáticos corresponden a las simulaciones del cuadro. En ellos se evalúa el comportamiento con la carga estimada (la de la norma, $P=1200\text{N}$). Con este análisis se pretende determinar si el cuadro es suficientemente resistente para aguantar la carga establecida. Además de la carga, se ha considerado la carga de la gravedad.

En SolidEdge se accede al módulo de simulación y este dispone del modelo matemático para el análisis de elementos finitos. Una vez realizado el estudio se puede, con la ayuda de los diagramas, analizar la distribución de esfuerzos y el desplazamiento del chasis.

4.8.1 SIMULACIÓN DEL ENSAYO CON FUERZA UBICADA EN EL EJE DEL PEDALIER

La siguiente figura corresponde al diagrama de tensiones del ensayo. La fuerza está colocada en el eje del pedalier.



Figura 75 Estudio estático con fuerzas en pedalier (Esfuerzos), fuente propia

La siguiente figura corresponde al diagrama de desplazamientos tras el estudio estático con fuerza en el pedalier.

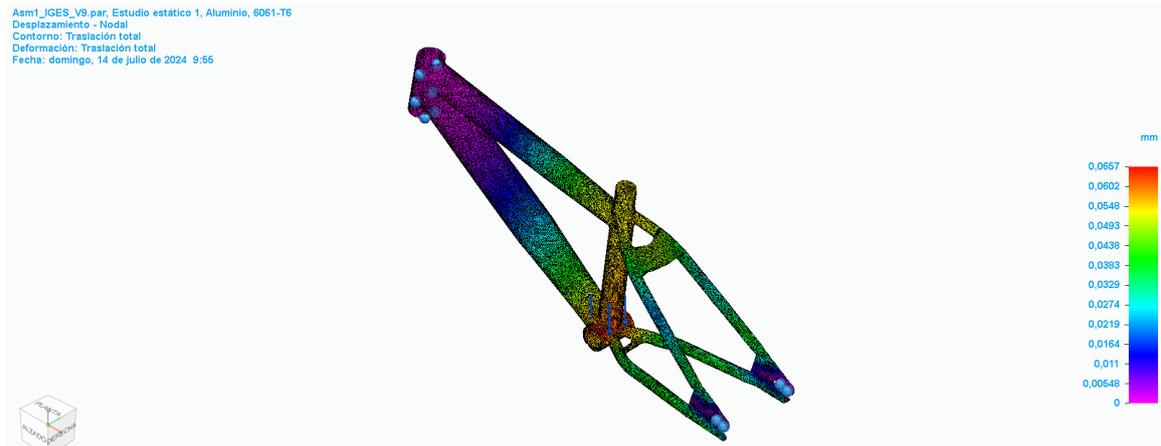


Figura 76 Estudio estático con fuerza en pedalier (Desplazamiento), fuente propia

4.8.2 SIMULACIÓN DEL ENSAYO CON FUERZA UBICADA EN EL SILLÍN

La siguiente figura corresponde al diagrama de tensiones del ensayo. La fuerza está colocada en el sillín y como en el ensayo anterior, se incluye la gravedad. (En el resto de las figuras la gravedad no aparece representada; se debe a un error de representación, la gravedad está aplicada en todos los ensayos)

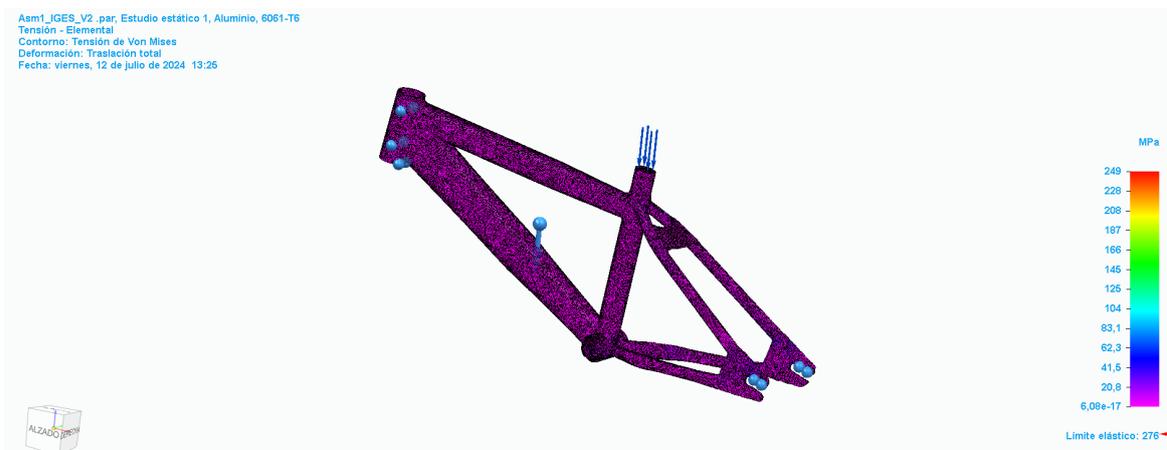


Figura 77 Estudio estático con fuerza en sillín (Esfuerzos), fuente propia

La siguiente figura corresponde al diagrama de desplazamientos tras el estudio estático con la carga en el sillín.

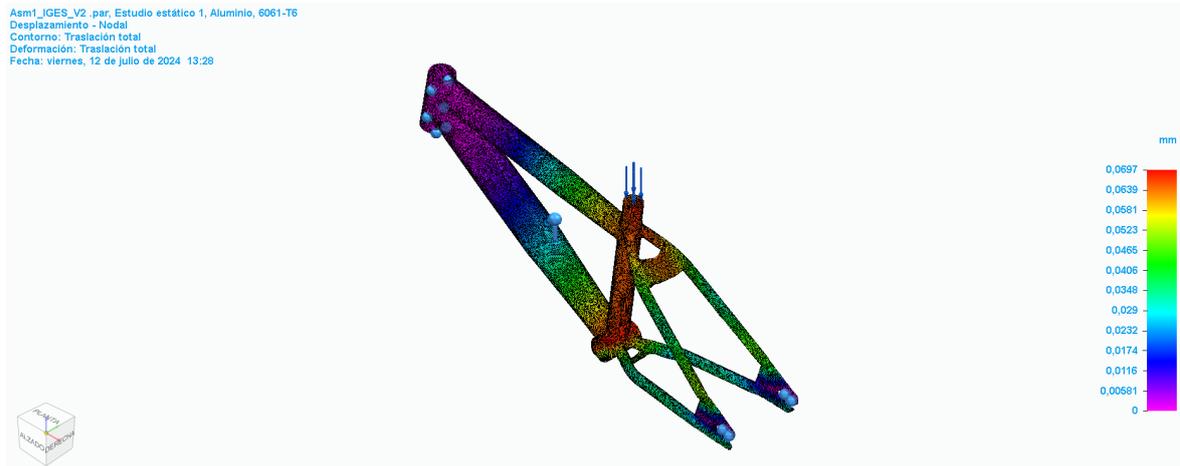


Figura 78 Estudio estático con fuerza en sillín (Desplazamiento), fuente propia

4.8.3 CONCLUSIÓN DE LOS ENSAYOS

Una vez realizados los dos estudios, se analizan los resultados que quedan recogidos en la siguiente tabla. (Limite elástico del aluminio 6061-T6: 276 MPa)

Tabla 8 Comparativa de los resultados de los ensayos, fuente propia

	Carga en pedalier	Carga en sillín
Tensión máxima exigida (MPa)	136	249
Desplazamiento máximo (mm)	0,0657	0,0697

Tras comparar los resultados se concluye que el ensayo más condicionante es el que sitúa **la carga en el sillín** al alcanzar una tensión y un desplazamiento mayor. **El ensayo más exigente para el cuadro es cuando se sitúa la carga de 1200N en el sillín.**

Durante el desarrollo del proyecto se ha probado algún otro material, pero solo como investigación para futuras ampliaciones del proyecto. A continuación, se muestra el resultado del ensayo estático para el aluminio 1060 cuyo límite elástico es 27,6 MPa, es decir, muy bajo. Como se puede observar el material queda descartado. Durante el ensayo se supera el límite elástico en la mayor parte de los puntos del chasis.

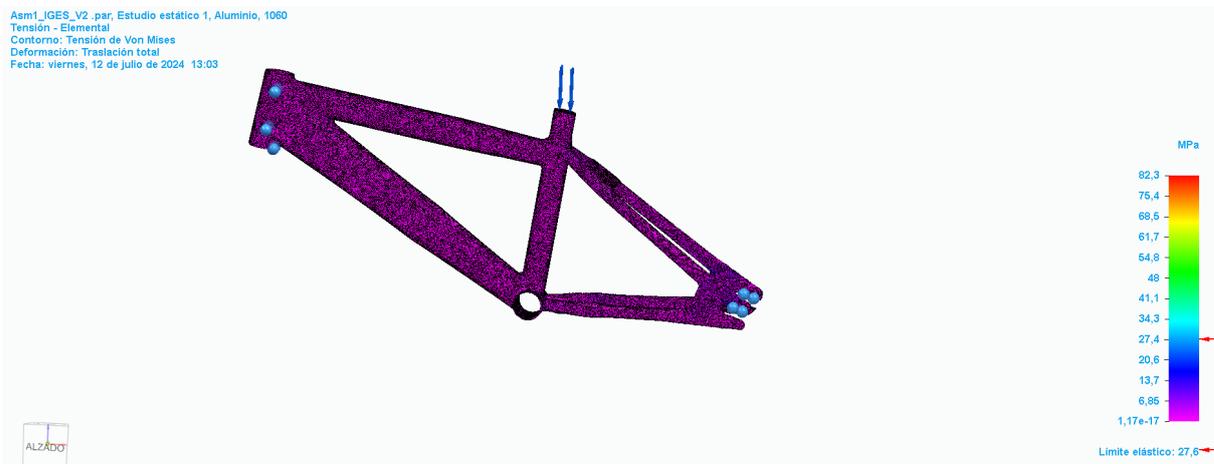


Figura 79 Ensayo estático del cuadro con fuerza en sillín y aluminio 1060, fuente propia

4.9 OPTIMIZACIÓN DEL CUADRO

Tras comprobar que no se alcanza el límite elástico en ningún punto del chasis en el estado de cargas del apartado 4.8. El paso siguiente es la aplicación de los criterios de diseño generativo. Una vez se hayan definido dichos criterios, se puede comenzar el proceso de iteración propio de la optimización topológica. Este proceso emplea un solucionador (NX Nastran) con el objetivo de generar alternativas de diseño garantizando que se cumple con la carga aplicada y las restricciones definidas. Tras el análisis de las alternativas se descartarán todas a excepción de aquella que tenga la topología óptima.

En la figura siguiente, se pueden ver zonas en color rojo. Estas zonas son las partes que se quiere proteger. Además de la zona roja hay una en verde, que sirve de ejemplo de cómo se elige la distancia que se quiere proteger desde la superficie. Las superficies planas se han protegido los 6 mm de alrededor. Los ejes (cilindros) se han protegido los 10 mm de alrededor. Una vez se selecciona la distancia, pasa de color verde a rojo y por tanto pasa a ser una “región a preservar” y se convierte en una restricción para el algoritmo.

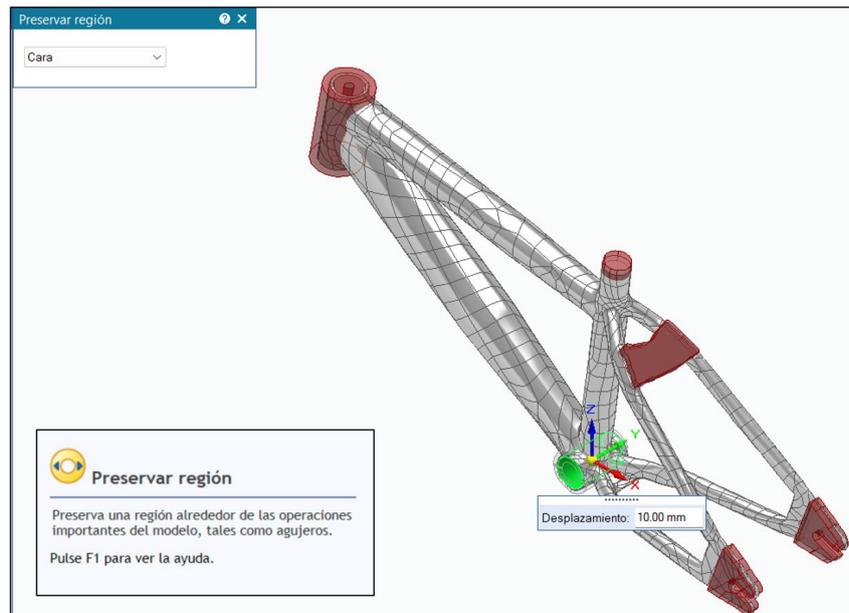


Figura 80 Selección de regiones que preservar, fuente propia

El siguiente paso es introducir las cargas y articulaciones como se muestra en la Figura 81.

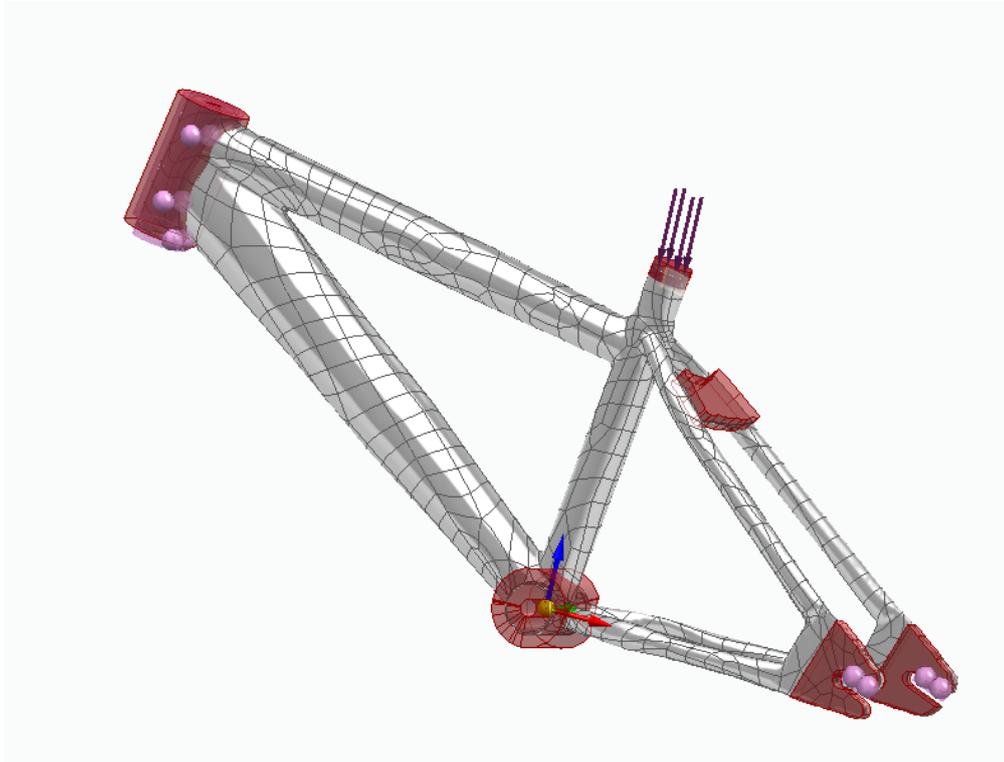


Figura 81 Cargas, condiciones de contorno y regiones a preservar, fuente propia

Tras la introducción de las restricciones, cargas y las zonas que se quieren preservar, ya se puede iniciar el proceso de iteración. El objetivo de estas iteraciones será lograr el cuadro con la masa mínima y el reparto de masa óptimo para soportar las cargas en las condiciones establecidas.

Hay que mencionar un detalle muy importante de este proyecto: el cuadro es tubular (hueco) y de aluminio 6061-T6 con un peso de 2.200 kg. El módulo de diseño generativo de SolidEdge va a tener en cuenta el volumen del cuadro y lo va a rellenar entero de aluminio 6061-T6 dando un peso del cuadro original de 3.361kg. Como se puede apreciar, el peso del cuadro real no se corresponde con el peso del cuadro en SolidEdge. Por un lado, es una ventaja disponer del volumen ya que nos permite tener un espacio de trabajo muy versátil, resultando sencillo eliminar material. Pero presenta un problema muy serio y es el de la masa. Para este proyecto se va a trabajar con la hipótesis de que el cuadro inicialmente

pesaba 3.361 kg. El objetivo sería optimizar lo suficiente para conseguir reducir el peso por debajo de los 2.200kg y así por lo menos obtener un cuadro que tenga mejor reparto de cargas. Como ampliación del proyecto sería muy interesante conseguir transformar el sólido en un sólido tubular en vez de relleno. El principal objetivo de este proyecto es el de investigar la posibilidad de realizar optimización topológica a una pieza proveniente de un escaneo 3D.

Se va a partir de la hipótesis de que el cuadro pesa 3.361 kg.

El procedimiento a seguir durante la fase de iteraciones es el de ir aumentando o reduciendo los dos parámetros que disponemos: “Porcentaje de masa” y “Calidad del estudio”.

Si vamos aumentando el porcentaje de masa que vamos quitando, lo que sucederá es que, o bien alcanzamos el límite de masa que se puede quitar y en ese caso alcanzamos el límite elástico, o bien no lo alcanzamos y entonces se tiene una pieza sobredimensionada en la cual la carga siempre será inferior a la que realmente soporta el cuadro.

Adicionalmente existe una tercera posibilidad, que es la que ha ocurrido en este proyecto y es que se alcance la capacidad máxima del software. SolidEdge dispone de un algoritmo que al alcanzar un determinado nivel de complejidad, no es capaz de resolver correctamente la optimización solicitada. Lo habitual es no alcanzar ese límite. Solid Edge es un software preparado para la simulación de piezas con una complejidad normal y un número de superficies razonable es de 30 superficies. El modelo con el que se está trabajando tiene más de 150 superficies por la división necesaria para poder trabajar con las cargas y demás restricciones del proyecto.

Teniendo en cuenta lo anteriormente expuesto se procede a comenzar el proceso de iteración.

Iteración N1

En la primera iteración se ha intentado realizar la optimización con un porcentaje de reducción de masa del 20% y una calidad del estudio de 40. Tiempo total del estudio: 1h y 7 min.

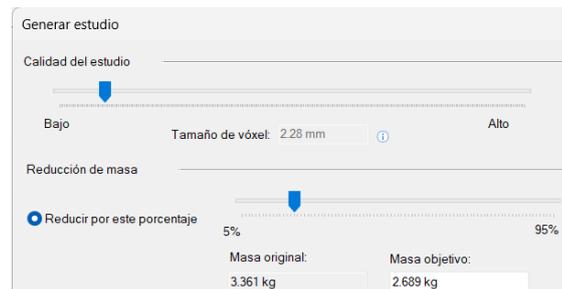


Figura 82 Menú de selección de parámetros, Calidad 40 y Reducción de masa del 20%

El resultado obtenido es el mostrado en la siguiente figura. Se puede ver cómo con una calidad del estudio de 40, SolidEdge no es capaz de mantener las restricciones impuestas como las regiones a proteger.

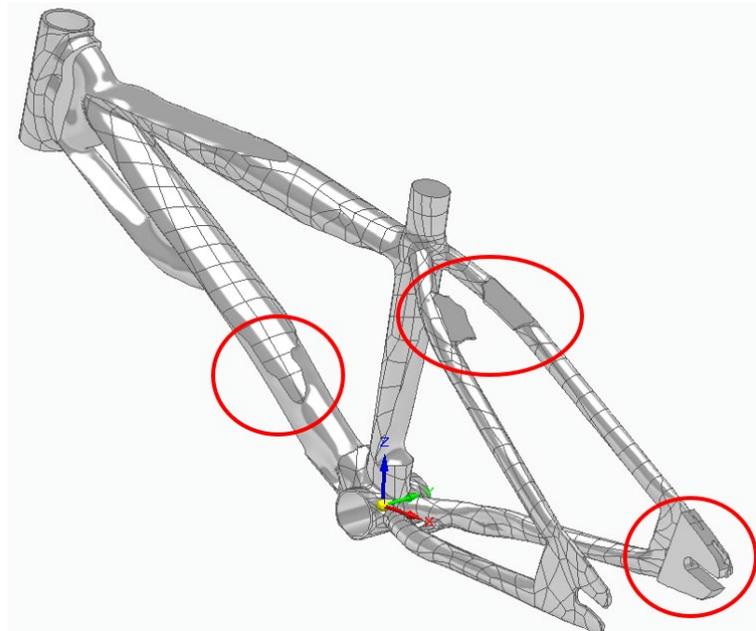


Figura 83 Simulación fallida iteración N1, fuente propia

Los círculos en rojo marcan los defectos presentados en el resultado. El primero que salta a la vista es el de la región donde se engancha el freno trasero. Esta zona se ha deshecho. El siguiente defecto que llama la atención es el anclaje derecho del eje trasero, que no ha sabido interpretar correctamente la restricción. Por último, la falta de simetría en la optimización en una de las dos grandes secciones del cuadro es otro de los defectos presentes.

La conclusión de esta iteración es que se necesita aumentar la calidad del estudio y ver si SolidEdge es capaz de optimizar el cuadro sin perder de vista las restricciones.

Iteración 2:

En la segunda iteración se ha intentado realizar la optimización con un porcentaje de reducción de masa del 20% y una calidad del estudio de 150. Tiempo total del estudio: 4h y 15 min.

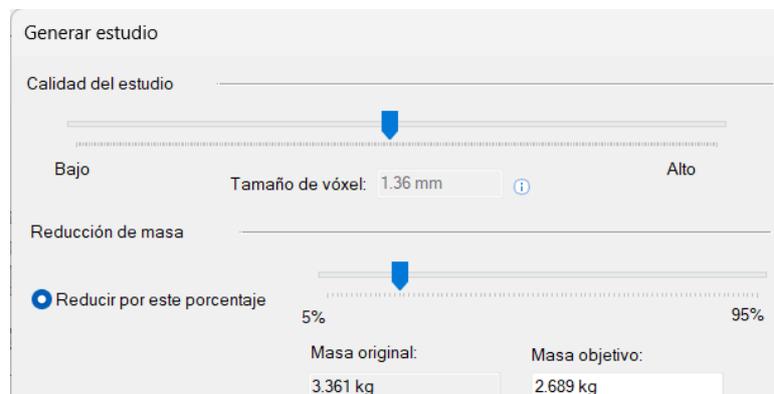


Figura 84 Menú de selección de parámetros, Calidad 150 y Reducción de masa del 20%

El resultado del estudio es el siguiente:

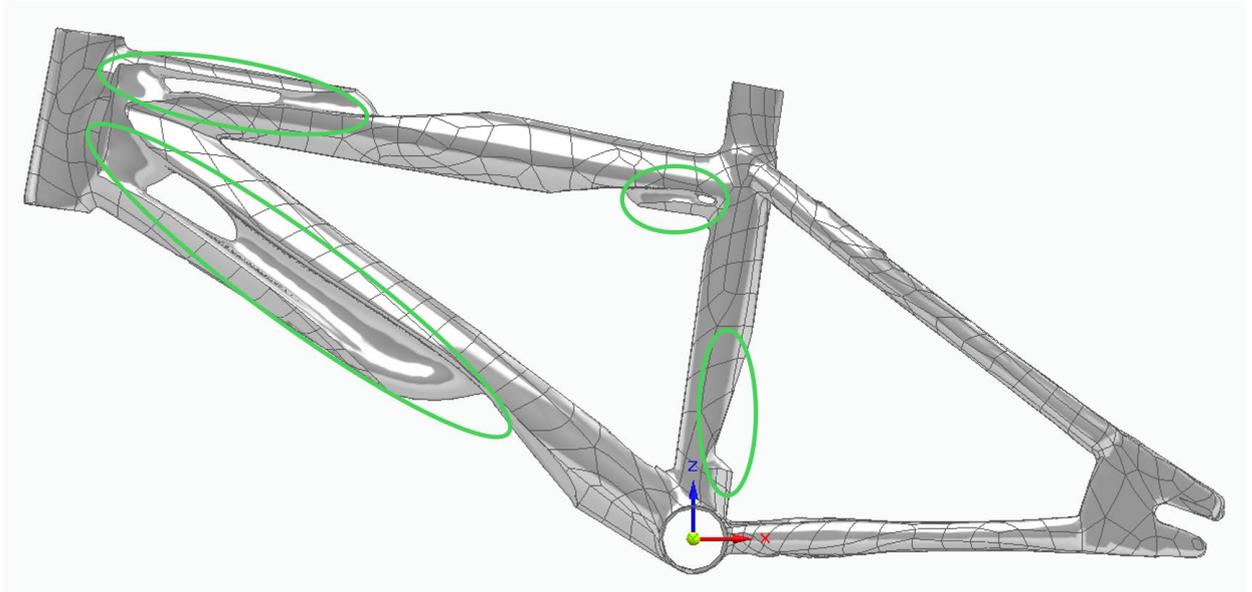


Figura 85 Simulación iteración N2, fuente propia

A simple vista parece que se ha obtenido un resultado razonable e interesante. Se observan la aparición de nervios en la pieza. Además se puede ver como la masa se reduce simétricamente.

Lo que no se ve a simple vista es que de nuevo el software no ha sido capaz de mantener las restricciones correctamente; esta vez en la articulación del soporte de la derecha donde debía conservar los 6 mm de alrededor de la región. La siguiente figura muestra el defecto. Se ha eliminado el material del entorno de la restricción manteniendo únicamente los 6 mm de la restricción de la articulación. El material de la zona a preservar se ha separado de la pieza, aun cuando hay una restricción en todo el plano del soporte del eje trasero.

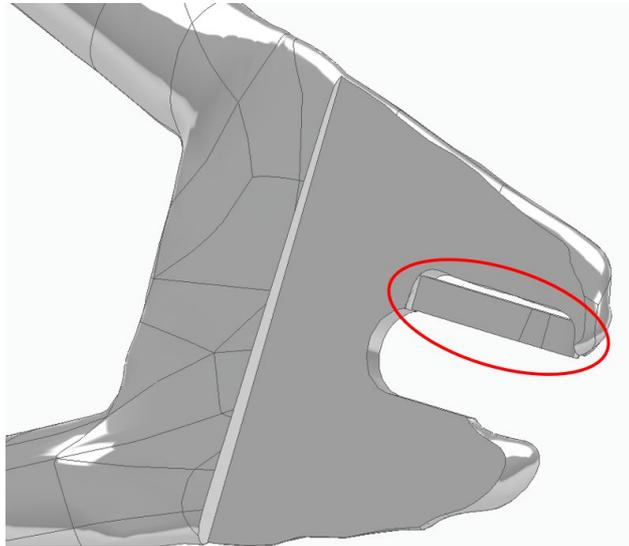


Figura 86 Iteración N2 defecto en soporte del eje trasero, fuente propia

Hasta la siguiente iteración se va a realizar un salto. En resumen las iteraciones N3, N4, y N5 han consistido en mantener el 20% e ir aumentando la calidad hasta hallar una calidad de estudio en la que SolidEdge sea capaz de trabajar. La calidad se ha aumentado a 200, 230 y 250 respectivamente. Los tiempos de computación para generar cuerpos optimizados se ha alargado hasta las 7 horas con 11 minutos por simulación. Llegados a este punto, se ha tomado la decisión de buscar un ordenador con la capacidad computacional necesaria. El laboratorio dispone de un ordenador específico para ingeniería inversa y optimización topológica. A partir de la iteración N4 se empezó a usar el ordenador con mayor potencia.

Iteración N6:

La sexta iteración se ha realizado con un porcentaje de reducción de masa del 25% y una calidad del estudio de 270. Tiempo total del estudio: 2h y 32 min.

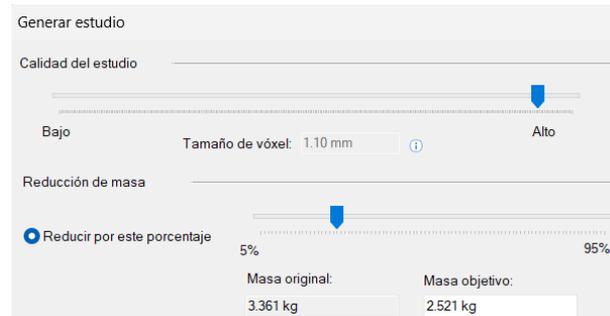


Figura 87 Menú de selección de parámetros, Calidad 270 y Reducción de masa del 25%

El resultado del estudio es el siguiente:

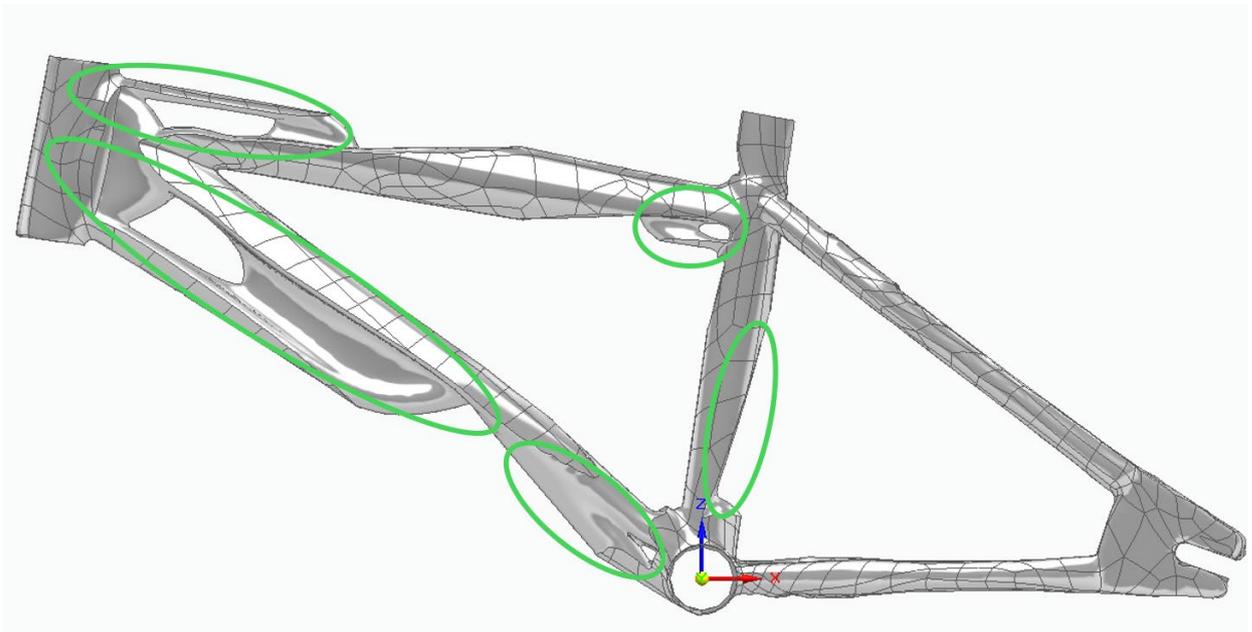


Figura 88 Simulación iteración N6, fuente propia

Esta simulación no presenta ningún defecto, es por tanto el primer modelo válido de optimización topológica. La nueva geometría presenta elementos muy interesantes mostrados en verde en la figura. A partir de aquí, se debe ir reduciendo la masa hasta

encontrar el límite. En cada iteración exitosa se ha comprobado con el diagrama de esfuerzos que se está por debajo del límite elástico. No se incluyen los diagramas de las iteraciones intermedias por un problema en la visualización de los diagramas en SolidEdge. Si se incluirá aún con el problema para la solución optimizada. En el apartado 4.11 se puede ver el diagrama de esfuerzos de la solución del proyecto.

La siguiente imagen muestra otro punto de vista del primer modelo optimizado con éxito

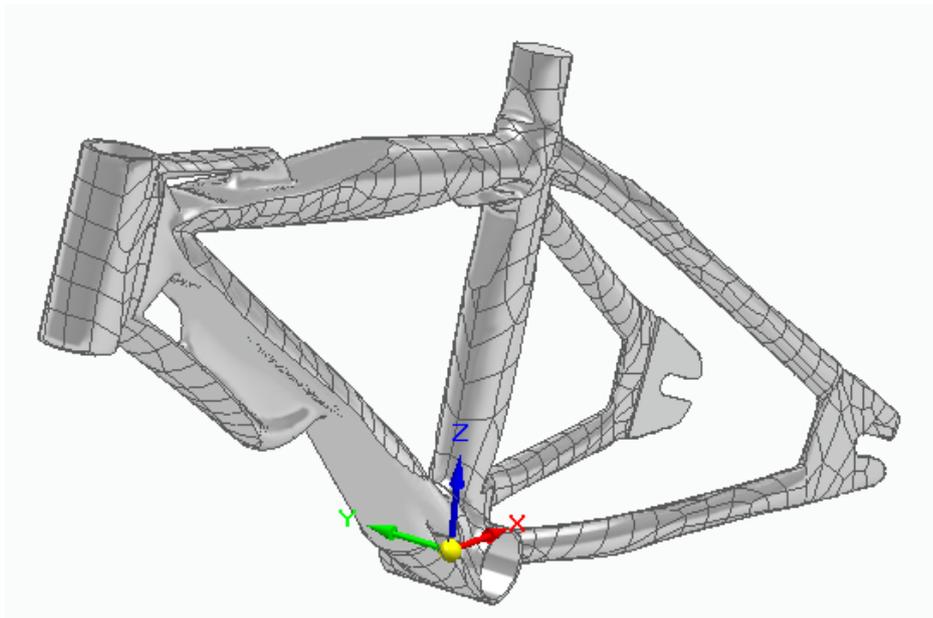


Figura 89 Simulación de la iteración N6, fuente propia

Iteración N7:

La séptima iteración se ha realizado con un porcentaje de reducción de masa del 35% y una calidad del estudio de 290. Tiempo total del estudio: 3h y 02 min.

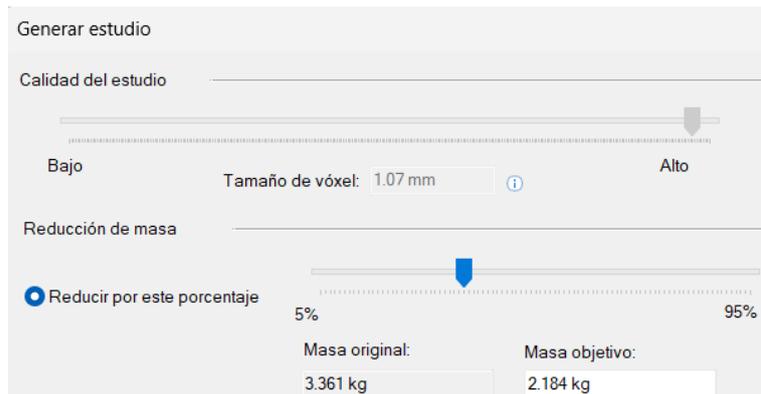


Figura 90 Menú de selección de parámetros, Calidad 290 y Reducción de masa del 35%

El resultado del estudio es el siguiente:

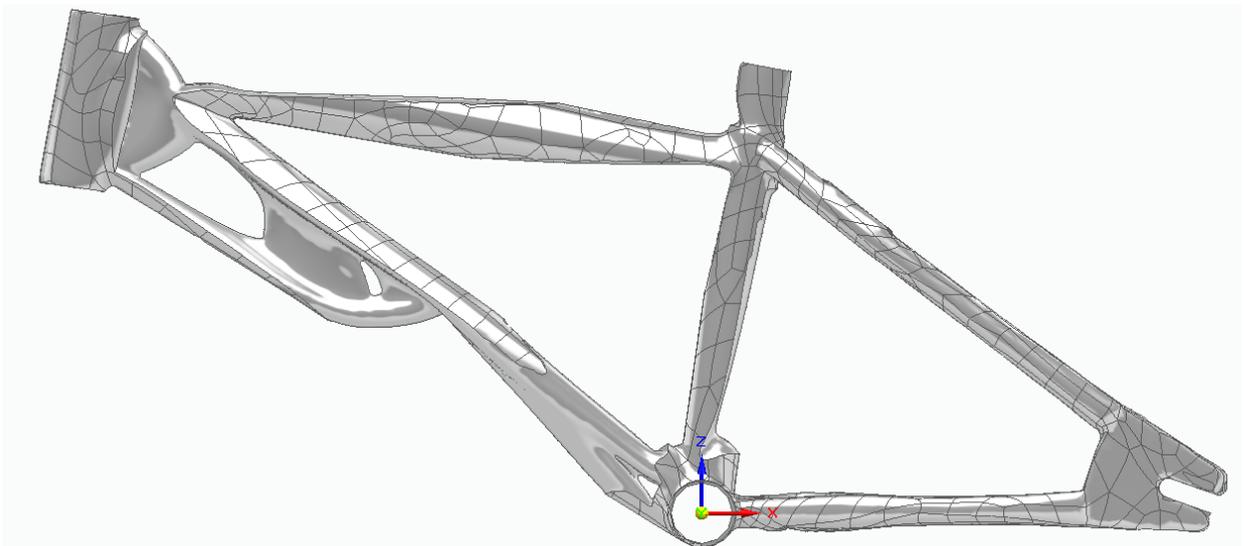


Figura 91 Simulación iteración N7, fuente propia

Este modelo optimizado topológicamente presenta una geometría sin defectos. Se ha aumentado a 290 la calidad del estudio para intentar ganar un poco más de calidad en los detalles. Es interesante ver como el algoritmo sólo reduce material en las dos barras de mayor grosor y evita modificar las de menor grosor. Esto se debe a que con una reducción del 35% el software considera que no vale la pena reducir en esas zonas; parece razonable dado que el grosor de las barras principales es excesivo para ser macizo en vez de tubular.

Se ha intentado realizar la misma reducción de masa pero con la calidad máxima de estudio posible 300. El programa cuando lleva 4h, fuerza el cierre de SolidEdge por error inesperado. Se ha intentado en repetidas ocasiones siempre con el mismo resultado. En vista de lo expuesto anteriormente no se va a aumentar más de 290 la calidad del estudio generativo.

Iteración N8:

La octava iteración se ha realizado con un porcentaje de reducción de masa del 45% y una calidad del estudio de 290. Tiempo total del estudio: 3h y 17 min.

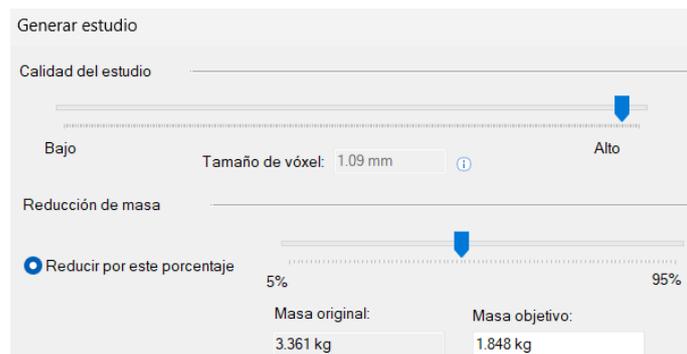


Figura 92 Menú de selección de parámetros, Calidad 290 y Reducción de masa del 45%

El resultado del estudio es el siguiente:

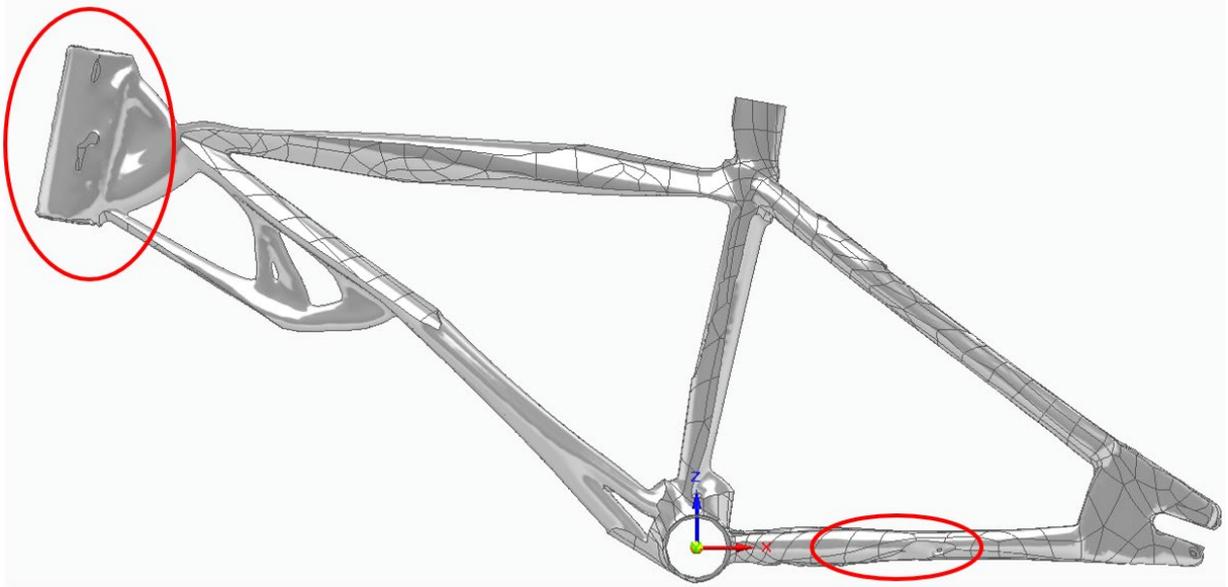


Figura 93 Simulación iteración N8, fuente propia

En rojo se puede ver como de nuevo SolidEdge no es capaz de trabajar correctamente las restricciones de las regiones a preservar. Por un lado el círculo en rojo de la izquierda muestra que se ha eliminado material de una región a preservar. A la derecha se ha detectado una retirada asimétrica de material. Esto nos indica que se ha encontrado un limitación en el software. Para la siguiente iteración, el procedimiento será buscar el porcentaje de masa que es capaz de retirar sin llegar a saltarse restricciones de diseño.

La figura siguiente es el mismo cuadro optimizado con defectos desde otro ángulo.

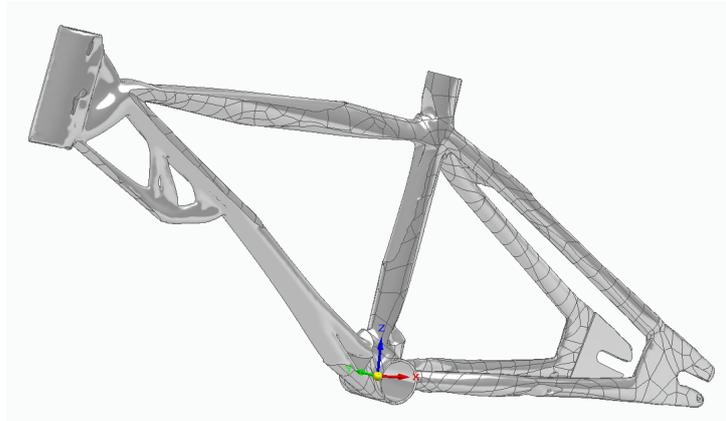


Figura 94 Simulación de la iteración N9, fuente propia

Iteración 9:

La novena iteración se ha realizado con un porcentaje de reducción de masa del 38% y una calidad del estudio de 290. Tiempo total del estudio: 2h y 56min.

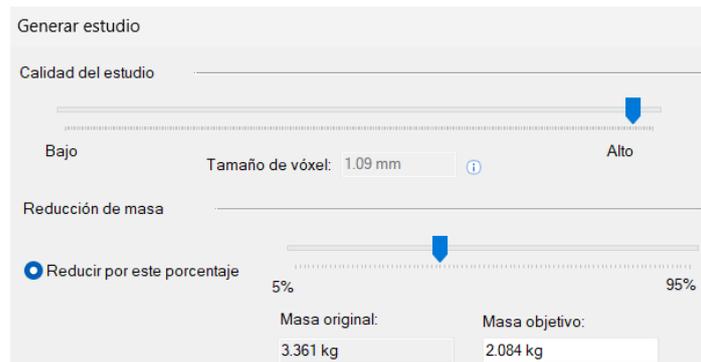


Figura 95 Menú de selección de parámetros, Calidad 290 y Reducción de masa del 38%

El resultado del estudio es el siguiente:

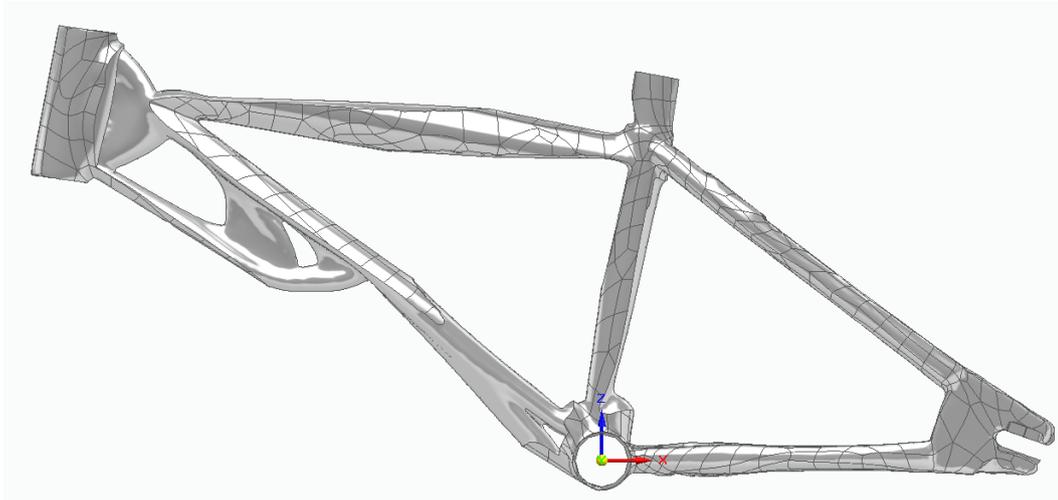


Figura 96 Simulación iteración N9, fuente propia

El modelo optimizado parece haber sido exitoso pero si se observa con detalle, los anclajes del eje trasero no han sido capaces de resolverse correctamente. La siguiente imagen muestra dos defectos presentados en esta iteración. Ninguna de las dos regiones a preservar se ha mantenido intacta. El defecto es el que se ha presentado ya en otra iteración; se reduce material en una zona crítica para el funcionamiento del chasis.

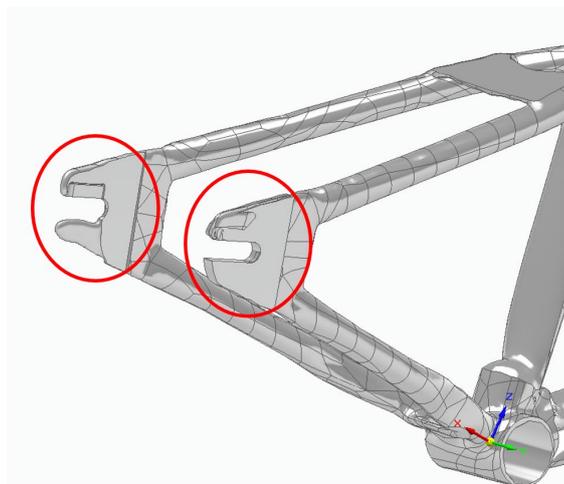


Figura 97 Defectos de la iteración N9, fuente propia

Resumen de las iteraciones:

La Tabla 9 muestra una lista de las iteraciones realizadas donde se ve el progreso de proceso de optimización topológica. El número total de iteración, contando las complementarias, ha sido de 34 iteraciones. Las iteraciones complementarias han sido iteraciones con variaciones mínimas respecto a su iteración de referencia. Han permitido valorar pequeños cambios que no representan un avance significativo en el proyecto.

Tabla 9 Recopilación de resultados de iteraciones , fuente propia

Iteración (Nº)	Reducción de masa (%)	Calidad	Tiempo de simulación (*nuevo ordenador)	Resultado	Iteraciones complementarias realizadas
1	20	40	1h y 7 min	Defectuoso	2
2	20	150	4h y 15 min	Defectuoso	4
3	20	200	5h y 23 min	Defectuoso	6
4	20	230	6h y 04 min	Defectuoso	5
5	20	250	7h y 11 min	Exitoso	0
6	25	270	2h y 32 min*	Exitoso	2
7	35	290	3h y 02 min*	Exitoso	0
8	45	290	3h y 17 min*	Defectuoso	2
9	38	290	2h y 56 min*	Defectuoso	4

Tras un análisis de las iteraciones, la que ofrece una mayor reducción de masa, sin llegar al límite del software ni llegar al límite elástico, es la iteración número 7. En ninguna de las iteraciones exitosas se ha alcanzado el límite elástico y por tanto no se llega a deformación plástica.

Las siguientes figuras muestran el resultado final de la optimización topológica.

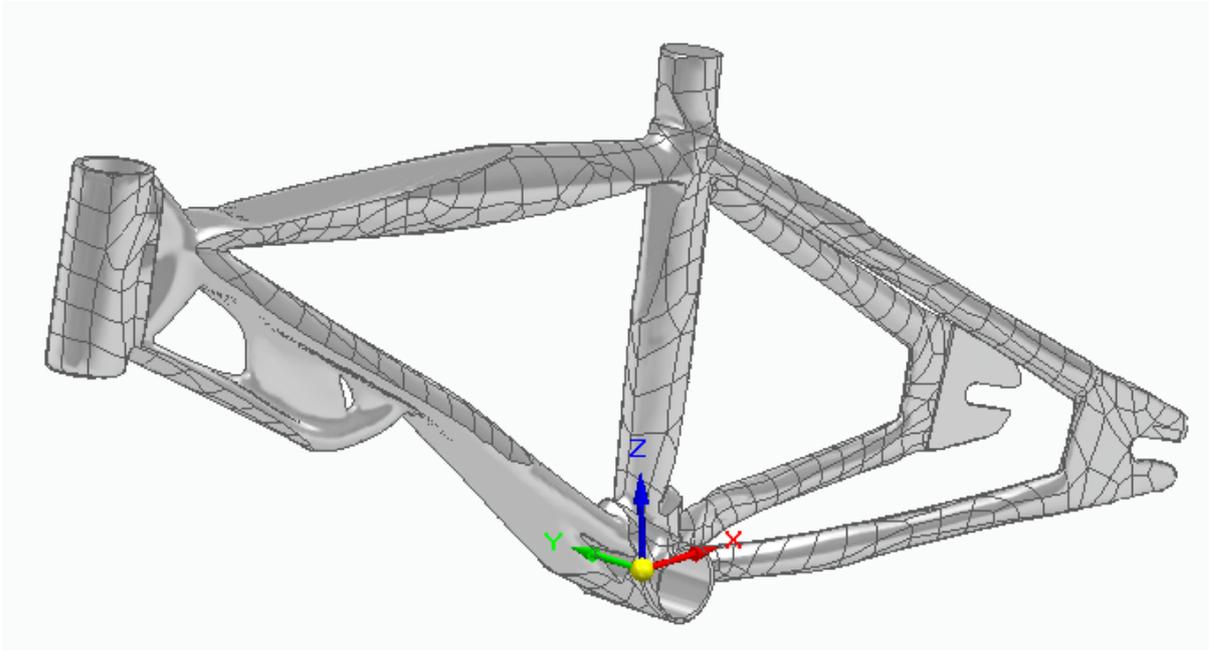


Figura 98 Resultado del proceso de optimización topológica con reducción de masa del 35%, fuente propia

Gracias a la optimización topológica se ha logrado reducir la masa del cuadro de 3.361 kg a 2.184 kg, mantenido sus características técnicas. Para llegar a esta solución, el programa ha creado las siguientes soluciones:

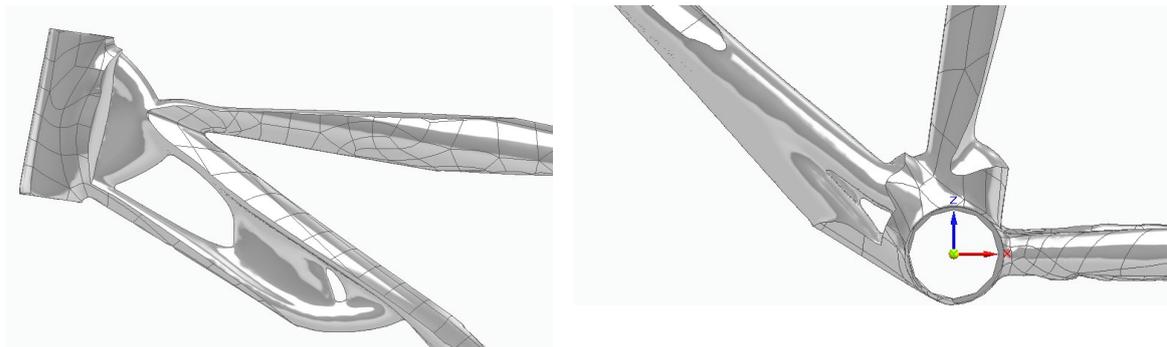


Figura 99 Detalles geométricos de la solución generada por el estudio, fuente propia

Comparativa de la geometría original respecto a la geometría tras la optimización:

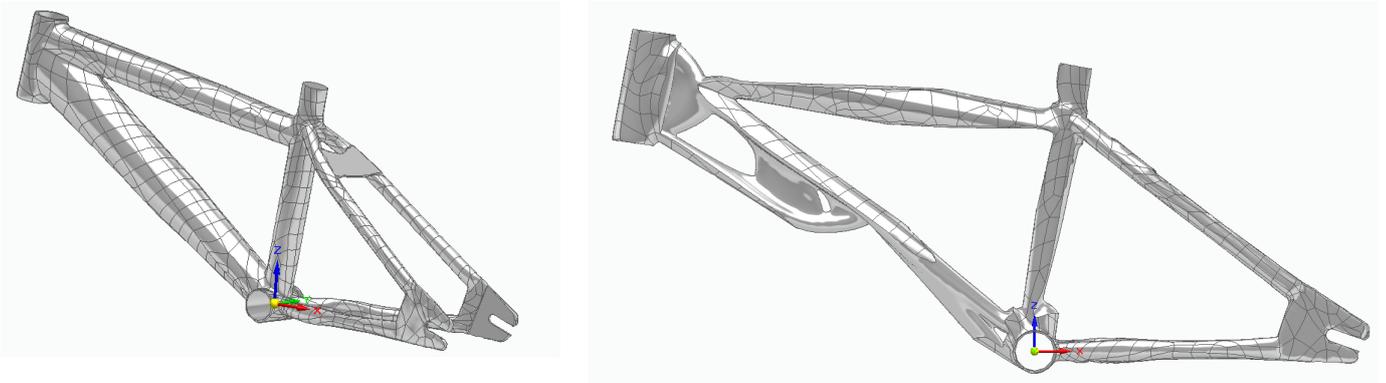


Figura 100 Comparativa de geometrías antes y después de la optimización, fuente propia

Se le ha realizado al nuevo cuadro un análisis con el método de elementos finitos no alcanzándose el límite elástico en ningún punto del cuadro. Los resultados se mostrarán en el apartado 4.11 tras el refinado de la geometría.

4.10 REFINADO DE LA GEOMETRÍA

El refinado de la geometría se ha realizado con el programa “Altair® Inspire™ 2024”, el mismo que se empleó para la conversión a nurbs, ahora se usa el software para el suavizado de las superficies con el objetivo de darle un acabado final a la pieza (el cuadro). La herramienta empleada es: “ajustar PolyNURBS”, que pule las superficies de la pieza dejándola libre de rugosidades y correctamente restringida.



Figura 101 Herramienta de Ajuste PolyNURBS en Altair Inspire [23]

A continuación se va a mostrar el proceso de suavizado y corrección del nuevo mallado:

1. Modelo CAD extraído de SolidEdge que se introduce en Altair inspire:

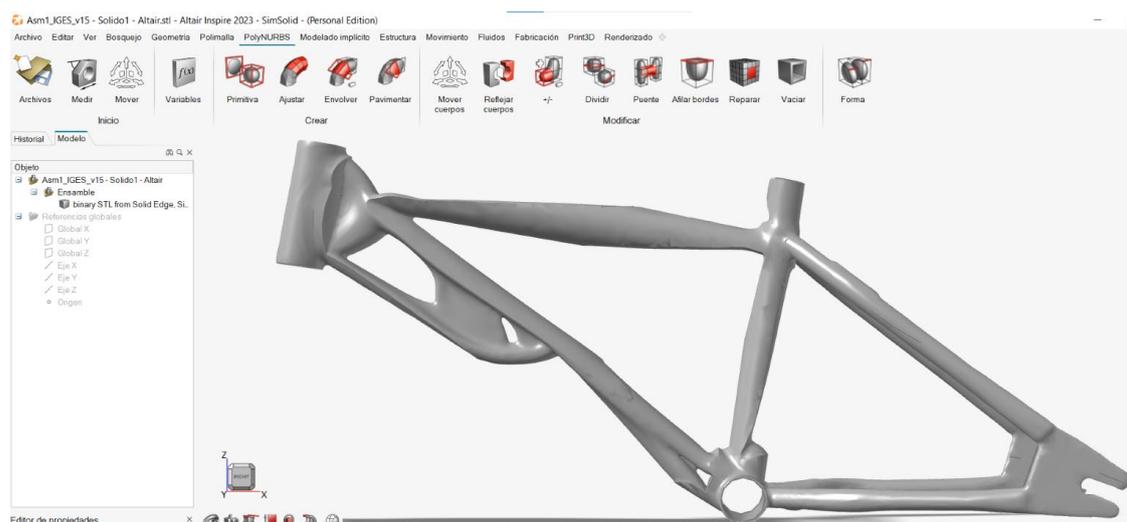


Figura 102 Modelo CAD de SolidEdge en Altair, fuente propia

2. Suavizado automático y reparación de huecos que se han quedado sin cerrar en la superficie



Figura 103 Reparación de la superficie PolyNurbs, fuente propia

3. Sólido final con la nueva superficie suavizada PolyNurbs:

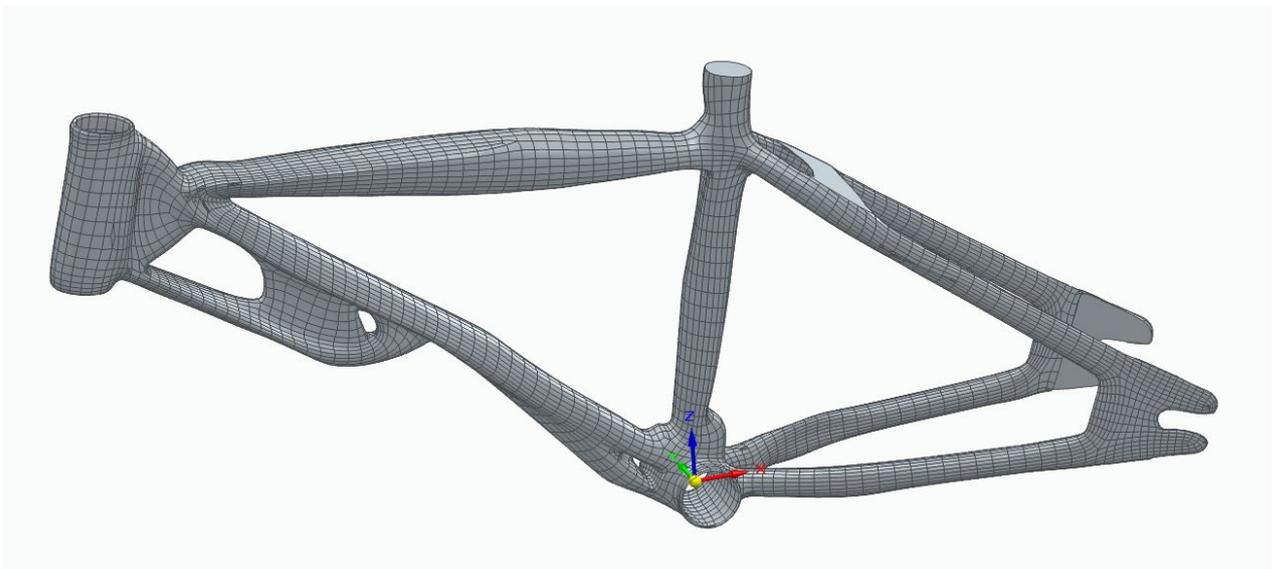


Figura 104 Sólido refinado, fuente propia

4.11 COMPROBACIÓN DE LA NUEVA GEOMETRÍA CON FEM

Como se expuso en el estado del arte, el método de elementos finitos consiste en la división de la pieza en elementos finitos. En este proyecto se ha escogido el tetraedros. Al dividir la pieza en elementos de tamaño tan pequeño y al ser el color de menor tensión el morado oscuro, la pieza en el diagrama de esfuerzos no se visualiza correctamente si no se hace “zoom” en partes concretas del cuadro. La gráfica del ordenador no es capaz de mostrar todos los elementos al completo.

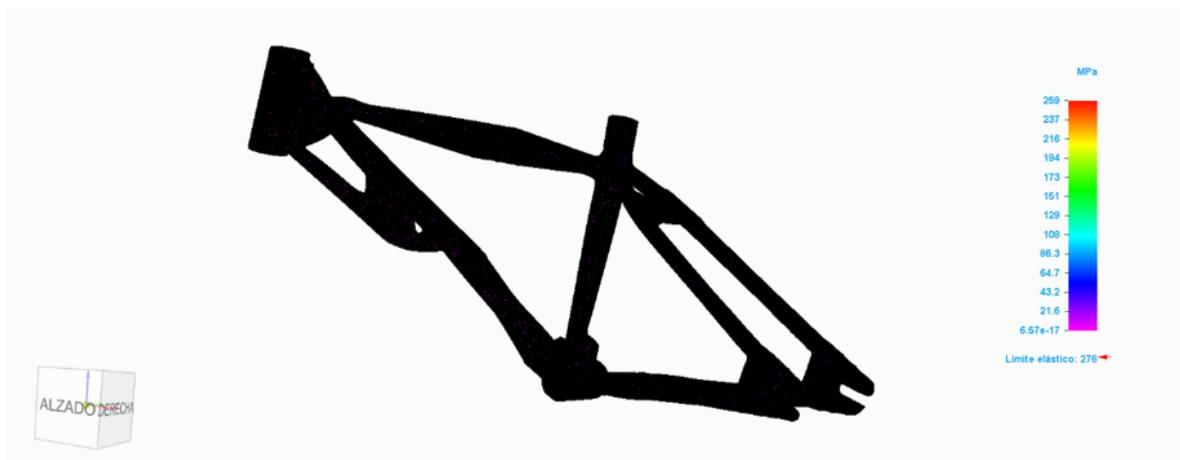


Figura 105 Diagrama de esfuerzos de sólido optimizado y suavizado, fuente propia

Las siguientes figuras son secciones concretas del cuadro en el diagrama de esfuerzos. Como se puede comprobar no se alcanza el límite elástico en ninguna zona, pero si se queda cerca. La pieza en algún punto concreto alcanza 259 MPa y el aluminio 6061-T6 tiene un límite elástico de 276 MPa. Esto nos indica que hemos alcanzado el límite de optimización y no hubiera mejorado aunque el software no hubiera limitado las iteraciones. Adicionalmente se observa que las zonas más críticas no son zonas que hayan sido especialmente trabajadas durante la optimización.

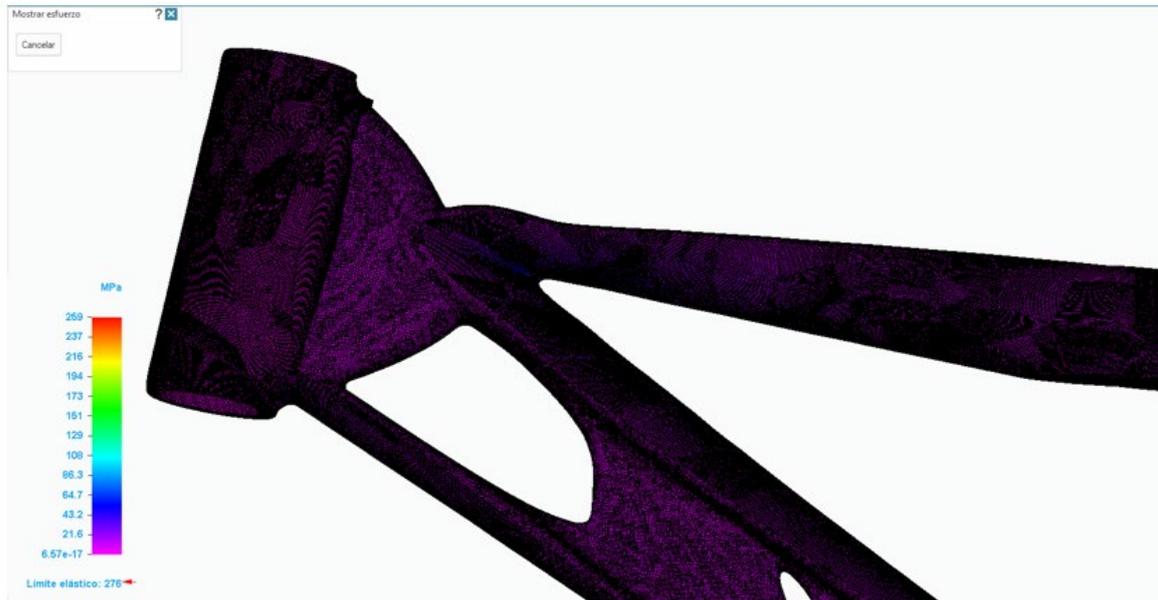


Figura 106 Diagrama de esfuerzos detalle en el eje de la dirección, fuente propia

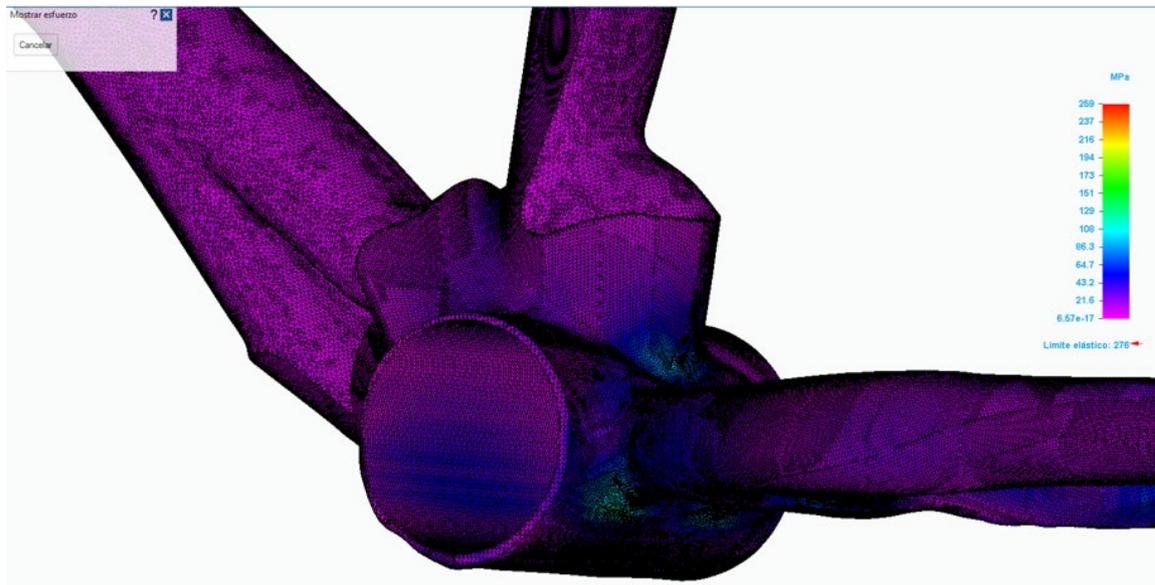


Figura 107 Diagrama de esfuerzos detalle en el eje del pedalier, fuente propia

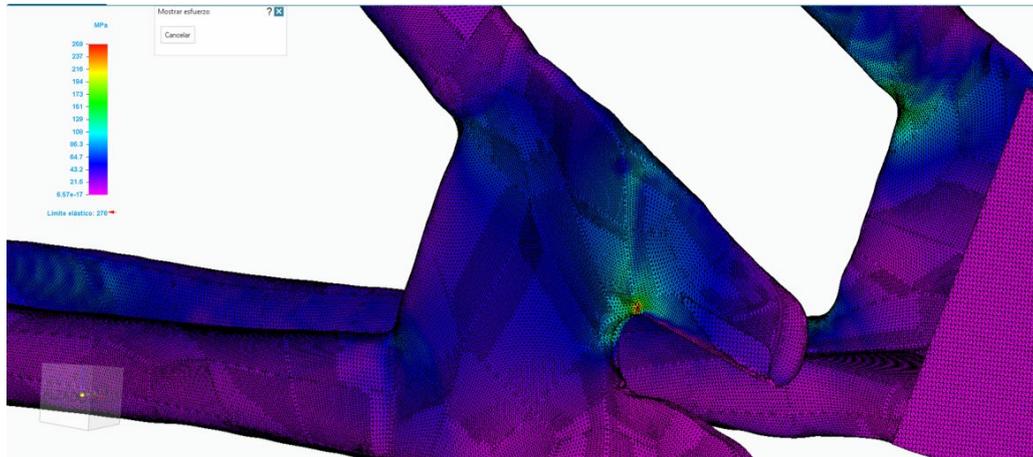


Figura 108 Diagrama de esfuerzos detalle en los soportes del eje trasero, fuente propia

Capítulo 5. FABRICACIÓN DE UN PROTOTIPO

5.1 TECNOLOGÍAS DE IMPRESIÓN 3D

Antes de elegir una tecnología de fabricación aditiva se van a presentar las distintas opciones que ofrece el laboratorio. A continuación se describirán brevemente las posibilidades.

- Fotopolimerización en tanque o cuba (Vat Polymerization) /SLA:

Esta tecnología está basada en el comportamiento de las resinas fotosensibles ante un láser de luz ultravioleta. La impresión se lleva a cabo en un tanque de resina sobre el cual incide una haz de luz UV, el cual traza por capas la sección transversal de la pieza diseñada. El proceso de fotopolimerización depende tanto de las propiedades de la resina, como de la longitud de onda del haz de luz. Este tipo de impresión consigue acabados de alta precisión en piezas de pequeño tamaño; es por ello que está muy extendido su uso en las industrias dentales, aeronáutica y sector del automóvil.

En la familia de fotopolimerización en tanque hay tres tipos diferentes de tecnologías: SLA, DLP y LCD. El laboratorio solo dispone de SLA, por lo que solo se tendrá en consideración esta técnica, además de que es la que mayor precisión ofrece.

Las impresoras en SLA pueden ser de dos tipos: “top-down” y “bottom-up”. La primera de ellas fue la que ha sido empleada desde el origen de esta tecnología; en ella el láser UV incide sobre la resina desde la parte superior del tanque. La segunda de ellas es más novedosa y la incidencia del láser es desde la parte inferior del tanque, atravesando la cuba de impresión. La tecnología “bottom-up” es de mayor resolución, Figura 109.

Las resinas empleadas son: resina estándar, resina de alta dureza o de ingeniería, resina dental, resina calcinable, resina transparente y flexible. Cada una de estas resinas está enfocada a un ámbito de la ingeniería diferente.

Todas las piezas elaboradas a partir de fotopolimerización en tanque son isotrópicas; eso significa que tienen las mismas propiedades mecánicas y técnicas en todas las direcciones de la pieza. Es una de las diferencias más significativas con el FDM.

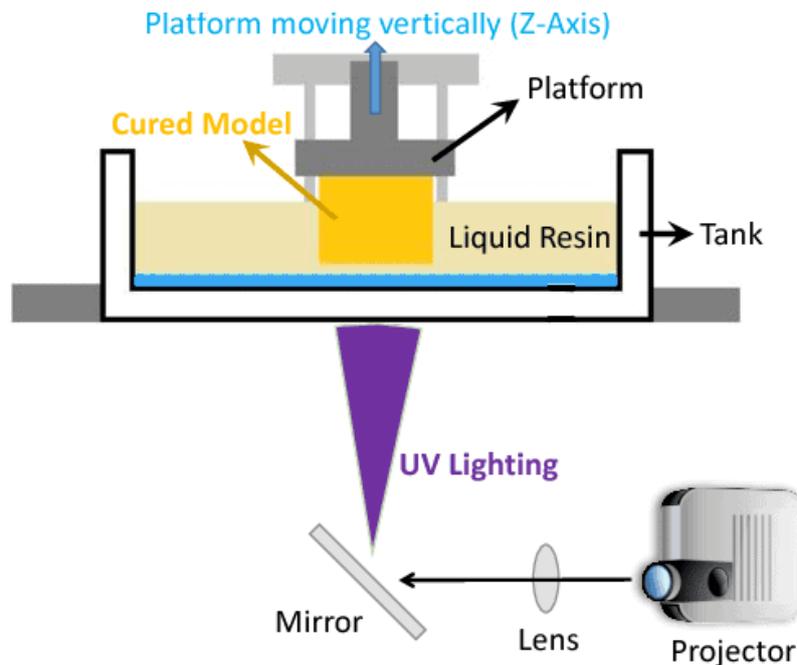


Figura 109 Impresión en SLA bottom-up, fuente XometryPro

- Extrusión de material (Material Exrtusion) /FDM:

Esta tecnología es la más extendida y empleada actualmente en impresión 3D. Para su funcionamiento se emplea un extrusor que a través de una boquilla deposita filamento. El filamento se va fundiendo gracias a la boquilla caliente. A medida que la boquilla va dibujando la pieza por planos, el filamento se deposita por capas y se va enfriando (solidificando), dando lugar a la pieza diseñada, Figura 110. Es la tecnología de impresión más popular gracias a la liberación de la patente, lo que hace que estas impresoras sean las más desarrolladas, lo que se suma a sus otras dos grandes ventajas: el bajo coste y la facilidad para aprender a usarlas.

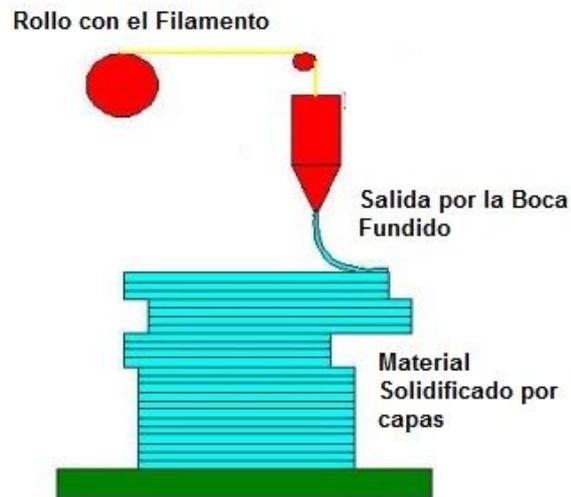


Figura 110 Funcionamiento de las impresoras FDM, fuente educa2Madrid

El material más empleado en las impresoras de tipo FDM es el PLA. Este material es biodegradable y está fabricado con materiales naturales. La temperatura habitual para conseguir fundirlo y que fluya correctamente por la boquilla es 230 °C. Para conseguir un buen acabado superficial es necesario emplear un espesor de capa fino. Si no, se generaría una pieza con un acabado rugoso. Una de las limitaciones más importantes es la resistencia. Estas piezas pueden variar el patrón de relleno y no suelen emplearse para la fabricación de elementos macizos. Aún teniendo en cuenta la estructura interna del relleno, la resistencia de la pieza es muy sensible a la dirección de aplicación de fuerzas. A tracción, en la dirección perpendicular a las capas, la resistencia no es buena; la mayor resistencia se consigue con las fuerzas en diagonal a las capas. Por último, el tamaño de las piezas se limita al del volumen de impresión, que no suele ser muy grande.

- **Fusión por lecho de polvo (Power Bed Fusion) /MJF-DMLS:**

En este proyecto se ha empleado la tecnología de fusión de lecho de polvo (PBF). Esta técnica de impresión en 3D se basa en la fabricación aditiva por capas; deposita capas de material sucesivamente en el polvo y las va fundiendo con la fuente de energía, Figura 112.

Esta técnica destaca respecto a otras tecnologías de fabricación aditiva porque es capaz de fabricar componentes tanto en plásticos como en aleaciones de metales como el titanio. La mayor ventaja que ofrece esta técnica de impresión 3D es su fiabilidad a la hora de imprimir piezas con estructura interna, debido a su precisión dimensional que consigue mantener las propiedades mecánicas en las tres direcciones. Es ideal para piezas que van a trabajar con esfuerzos en cualquier dirección. En este caso la pieza al ser el cuadro de una bicicleta, que es la estructura que une todos los componentes, necesita tener una estructura fiable.

La impresión por fusión de lecho de polvo permite imprimir las piezas sin soportes durante su impresión; esto ofrece una gran ventaja ya que la pieza que sale es el producto final, no necesita un postprocesamiento más que limpiar el polvo de la superficie de las piezas.

La impresora que dispone el laboratorio de fabricación con esta tecnología es la HP JET FUSION 580C (PBF-MJF) Figura 111. Emplea una tecnología desarrollada por HP llamada MultiJetFusion (MJF). A diferencia del resto de fusión de lecho en polvo que emplean un láser para la solidificación, la HP usa una lámpara que alcanza temperaturas muy elevadas para solidificar el agente de fusión. Con ello se consigue que el polvo de poliamida, la base, quede intacto mientras que el agente mezclado con la poliamida si se solidifica. El polvo que no se solidifica es reutilizable en esta impresora hasta un 80% del polvo es reciclado. Las capas que crea la impresora HP son de 0,1 mm.

Otra ventaja es que se pueden conseguir piezas de colores gracias a que se añade en los extremos de cada capa puntos con color. El límite de tamaño en esta tecnología lo pone la impresora con el tamaño de la cuba de impresión.

Lo ideal habría sido emplear material metálico, pero no se dispone en el laboratorio de impresoras que impriman en metal y el coste habría sido muy superior al del PA12 que emplea la HP del laboratorio.



Figura 111 Impresora HP MultiJetFusion 580 c, Fuente: web HP

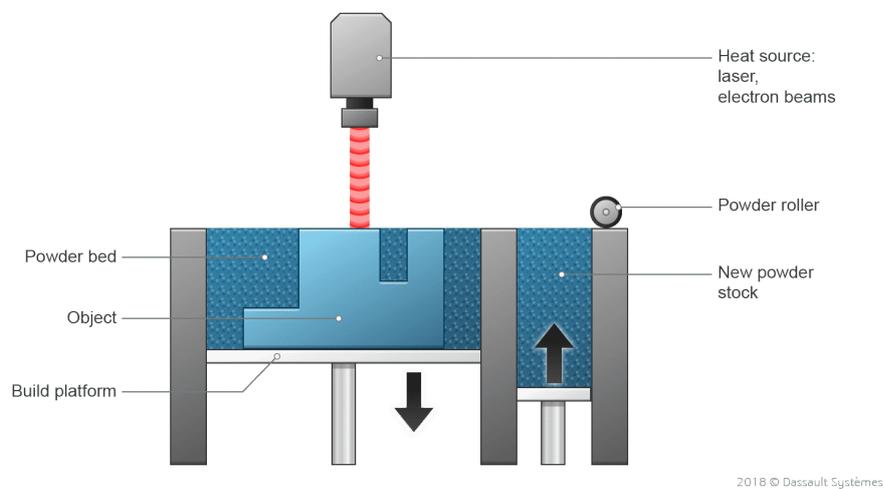


Figura 112 Funcionamiento de la impresión por fusión de lecho de polvo, fuente Dassault Systèmes

5.2 METODOLOGÍA DE LA FABRICACIÓN ADITIVA (IMPRESIÓN 3D)

La metodología de fabricación aditiva tiene distintas fases durante el desarrollo de un producto (Figura 113). Estas fases son : predesarrollo, desarrollo y postdesarrollo. La primera fase el predesarrollo, consiste en un análisis del potencial de la impresión 3D para el producto que se desea diseñar; además en esta fase se debe recopilar los requisitos técnicos para comprobar si es compatible con la fabricación aditiva. La segunda fase, el desarrollo, se divide en dos partes, el diseño y la implementación. En la de diseño se crea el modelo del producto y en la de implementación se construye un prototipo para su evaluación y análisis. Por último la fase de postdesarrollo, que es la fase es la más larga, consiste en acompañar al producto durante todo su ciclo de vida, empezando con la producción del producto, pasando por el mantenimiento y finalizando con la retirada del producto ya obsoleto.



Figura 113 Metodología de la fabricación aditiva, fuente: Diapositivas de Tecnologías de la Fabricación 4^o, ICAI [24]

Este proyecto se centra en la fase de desarrollo. Esta fase cuenta con una línea de trabajo muy clara para llevar a cabo la fabricación del prototipo. Se debe pasar del modelo 3D a un modelo de tipo “.STL” que es un archivo compatible con los software de impresión 3D y por último se deben realizar ajustes finales en el programa propio de la impresora para garantizar una impresión exitosa.

5.3 IMPRESIÓN DEL PROTOTIPO EN 3D Y PREPARACIÓN DEL PROTOTIPO

El proceso de impresión, una vez seleccionada el tipo de impresión, es muy sencillo. En este caso se empleará la HP MultiJetFusion 580c que viene equipada con el software “HP Smart stream 3d build manager”. Para poder pasar el modelo 3d al programa, sólo hay que guardar el archivo como un “.STL”. Pero antes hay que configurar algunos parámetros para realizar la conversión. A continuación se muestra el menú de configuración para la conversión.

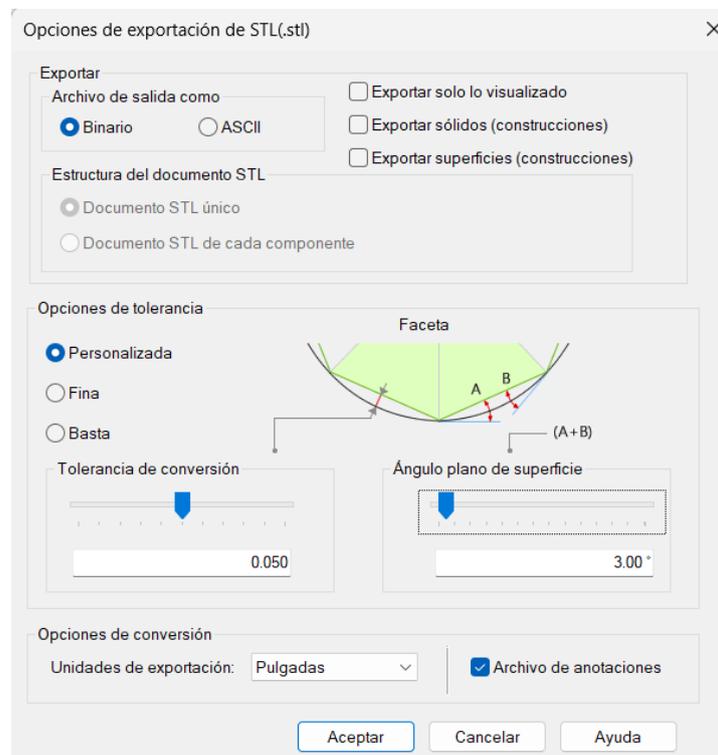


Figura 114 Opciones de exportación a STL, fuente propia

El siguiente paso consiste en pasar los archivos .STL al programa de la HP y escalar correctamente la pieza. En la Figura 115 se puede ver el resultado de introducir los archivos en el programa de la impresora.

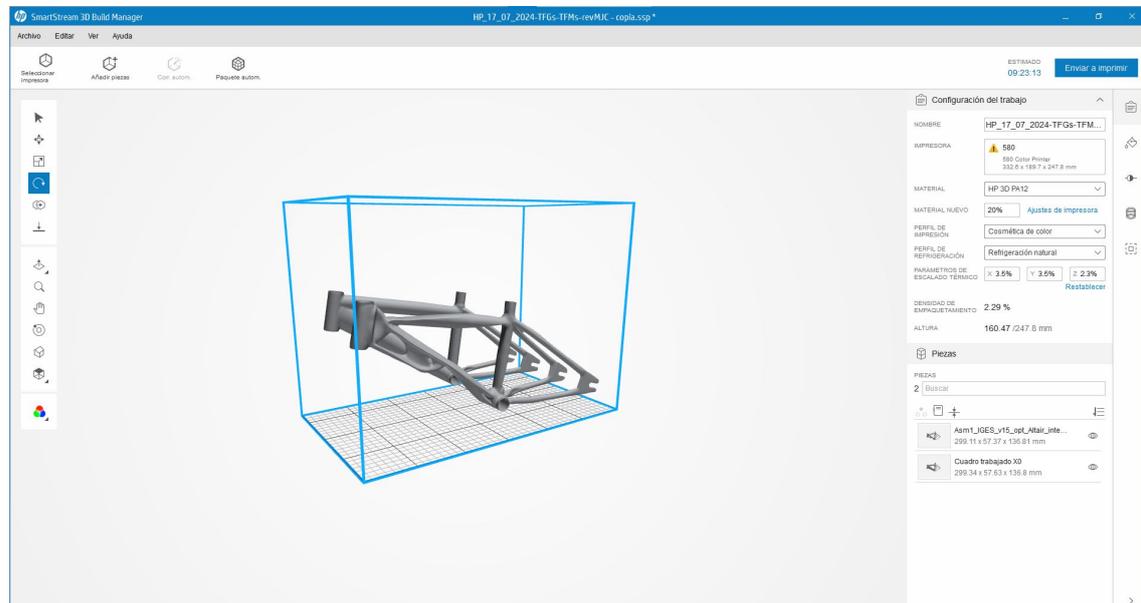


Figura 115 Captura de pantalla de HP SmartStream 3D build manager, fuente propia

No ha sido necesario especificar el tipo de relleno ni el tipo de mallado interno porque en esta impresora el relleno es completo, las piezas son macizas. El material de impresión del prototipo y del modelo escaneado es Poliamida PA12.

Se han impreso el cuadro escaneado sin optimizar y el cuadro optimizado con una reducción masa del 35%, ambos en escala 1:2, la máxima compatible con el volumen de impresión de la HP. Adicionalmente se quería imprimir uno en escala 1:1 para realizar un ensayo de funcionalidad volviendo a montar todos los componentes en el cuadro. El planteamiento era dividir en dos el cuadro, en dos archivos y realizar la impresión en dos partes para que cupiera en la impresora. No se ha podido llevar a cabo la impresión del cuadro en 1:1 por la indisponibilidad de la impresora para llevar a cabo la fabricación. Los dos cuadros en escala 1:2 se imprimieron en la última tirada de impresión del curso. La Figura 116 muestra el volumen de la impresora de la última tirada de la impresora, arriba en azul y verde se pueden ver ambos cuadros. El tiempo de impresión de los dos cuadros es de 9h y 23 minutos (Figura 115).

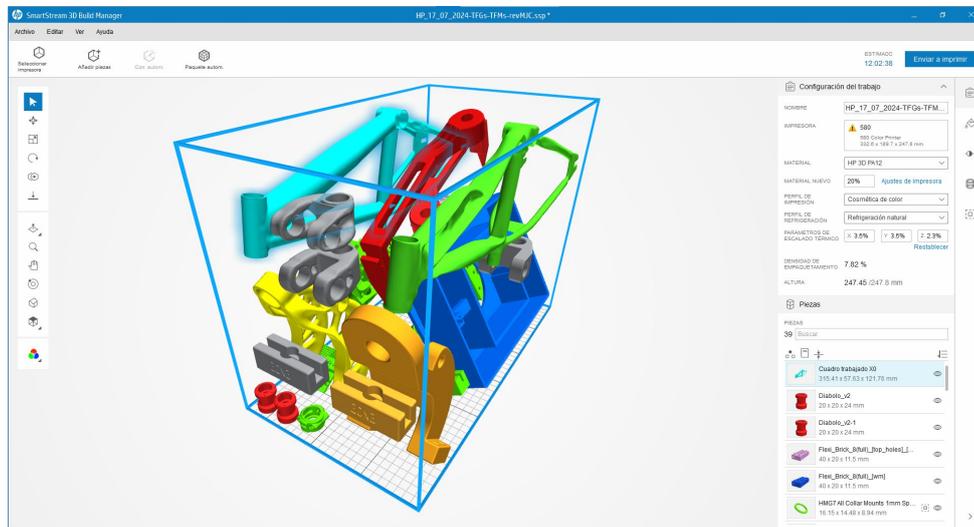


Figura 116 Última tirada de impresión del curso con ambos cuadros y más piezas de otros proyectos, fuente propia

Una vez se han impreso los cuadros, la siguiente tarea es sacarlos de la impresora. Después de extraer las piezas, hay que quitarle los restos de polvo que tienen por encima (este polvo se recicla para otras rondas de impresión).

Las piezas limpias sin el polvo tienen un terminado que no es el definitivo un tacto rugoso (ver Figura 117, Figura 118 y Figura 119).



Figura 117 Cuadro escaneado impreso en 3D por MJF, fuente propia



Figura 118 Cuadro optimizado (Reducción de masa del 35%), impreso en 3D por MJF, fuente propia



Figura 119 Cuadro optimizado (hacia abajo), impreso en 3D por MJF, fuente propia

Todavía hay que trabajar la piezas para conseguir que tengan el acabado de una pieza terminada. El resultado esperado es el de la Figura 120 conseguido en una simulación de diseño en 3D.



Figura 120 Resultado esperado para el producto final, fuente propia

Para conseguir el acabado esperado se le tiene que aplicar una capa de imprimación (Figura 121 y Figura 122) y después tres capa de pintura.



Figura 121 Aplicación de la imprimación en el cuadro fabricado por Impresión 3D, fuente propia



Figura 122 Cuadros con imprimación aplicada, fuente propia

Resultados finales de los cuadros terminados (escala 1:2):



Figura 123 Cuadros terminados I, Izq: cuadro escaneado Der: cuadro optimizado, fuente propia



Figura 124 Cuadros terminados II, Izq: cuadro escaneado Der: cuadro optimizado, fuente propia

La Figura 125 es una comparativa visual de los tres cuadros. Permite hacerse una idea del tamaño de los prototipos impresos.

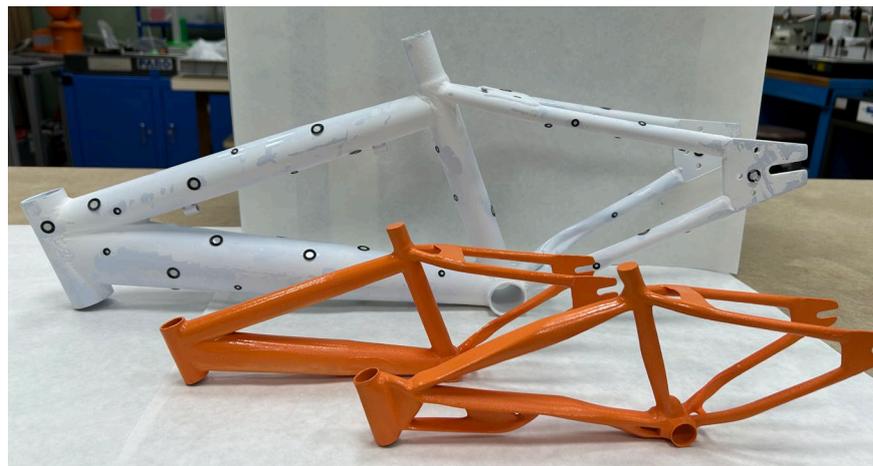


Figura 125 Cuadro original 1:1 y cuadros por fabricación aditiva 1:2, fuente propia

La reducción de masa del cuadro tras la optimización se sigue cumpliendo en los cuadros producidos con fabricación aditiva.

Cuadro escaneado impreso en PA12, masa de 144g:



Figura 126 Cuadro escaneado con masa de 144g, fuente propia

Cuadro optimizado impreso en PA12, masa 93g (35% menos que la versión de partida).



Figura 127 Cuadro optimizado con masa de 93g, fuente propia

Capítulo 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

6.1 PRESUPUESTOS

Se van a realizar presupuestos de los dos prototipos impresos en el laboratorio de la Escuela (ICAI), con la impresora HP MJF 580c de polvo (PA12). Además se analizará la posibilidad de imprimir el cuadro a escala real en Aluminio 6061-T6 en el mercado.

6.1.1 COSTE DE LOS PROTOTIPO EN PA12

Para la obtención de los presupuestos se ha empleado un Excel desarrollado en la Escuela (ICAI) para realizar una estimación de los costes de cada pieza. Por otro lado se tiene la factura (Figura 128) de lo que ha costado la tirada de impresión por lo que se puede sacar el coste real de cada pieza.



2024-07-17 10:43 PM	dc1926d4-7e59-4b... ON3Qh+vJHvc+EG7...	HP Jet Fusion 580 Color 3D Printer	580 5697MCA003	PA12Z	1,238 cm³	80%	7.92%	Color Cosmetic	Yes	€809.42
------------------------	---	--	-------------------	-------	-----------	-----	-------	----------------	-----	---------

Figura 128 Captura de pantalla de la factura de la impresión del 17/09/2024, fuente laboratorio de ICAI

El resumen de los costes de la fabricación de los prototipos en el laboratorio de ICAI es el siguiente:

Tabla 10 Resumen de costes de fabricación en 3D en ICAI, fuente propia

Prototipo (ud)	Modelo escaneado	Modelo optimizado (reducción de masa del 35%)
Volumen (cc)	147,67	95,98
Coste real de factura (€)	96,54	62,73
Coste estimado (€)	74,17	50,99

6.1.1.1 Cuadro escaneado (1:2)

Tabla 11 Análisis de costes del prototipo del cuadro escaneado (1:2)

ANÁLISIS DE COSTES PARA PROTOTIPADO DE PIEZAS EN IMPRESORA 3D -HP 580		
DATOS AMORTIZACIÓN MÁQUINA		
Precio máquina (€)	80,000	
Coste mantenimiento anual (€)	2,000	
Años de amortización	5	
Días impresión/año	48	
Impresiones/día	1	
Precio impresión (€)	375.00	
Precio Impresión venta-público (€)	375.00	
DATOS COSTE MATERIAL		
Coste material: (€/kg)	100.00	
Coste material: (€/cc)	0.11	
Volumen Total (cc)	15634.75	
Densidad de Empaquetado	7.00%	
DATOS COSTE TÉCNICO ANALISTA		
Coste técnico analista del modelo - inc. limpieza (€/h)	20	
CONCEPTOS PRESUPUESTADOS	Opción Sólido	Costes parciales
Material modelo (cc)	147.67	15.54 €/ud
Impresión	-	50.60 €/ud
Tiempo técnico-analista (h)	0.20	4.00 €/ud
Tiempo Limpieza (h)	0.20	4.00 €/ud
Cantidad de piezas	1.00	
Coste unitario (€) en ICAI + IVA	74.14 €/Ud	
Coste total (€) en ICAI + IVA	74.14 €	

6.1.1.2 Cuadro optimizado (1:2)

Tabla 12 Análisis de costes del prototipo del cuadro optimizado (1:2)

ANÁLISIS DE COSTES PARA PROTOTIPADO DE PIEZAS EN IMPRESORA 3D -HP 580		
DATOS AMORTIZACIÓN MÁQUINA		
Precio máquina (€)	80,000	
Coste mantenimiento anual (€)	2,000	
Años de amortización	5	
Días impresión/año	48	
Impresiones/día	1	
Precio impresión (€)	375.00	
Precio Impresión venta-público (€)	375.00	
DATOS COSTE MATERIAL		
Coste material: (€/kg)	100.00	
Coste material: (€/cc)	0.11	
Volumen Total (cc)	15634.75	
Densidad de Empaquetado	7.00%	
DATOS COSTE TÉCNICO ANALISTA		
Coste técnico analista del modelo - inc. limpieza (€/h)	20	
CONCEPTOS PRESUPUESTADOS	Opción Sólido	Costes parciales
Material modelo (cc)	95.98	10.10 €/ud
Impresión	-	32.89 €/ud
Tiempo técnico-analista (h)	0.20	4.00 €/ud
Tiempo Limpieza (h)	0.20	4.00 €/ud
Cantidad de piezas	1.00	
Coste unitario (€) en ICAI + IVA	50.99 €/Ud	
Coste total (€) en ICAI + IVA	50.99 €	

6.1.2 COSTE DE FABRICACIÓN EN ALUMINIO 6061-T6

6.1.2.1 Cuadro por fabricación convencional (1:1)

La bicicleta infantil tiene un coste total de 120€ (datos sacado de la web de decatlón [25]). Si quitamos el coste de todos los componentes, el precio del cuadro de aluminio es de 50€, siendo este fabricado con métodos convencionales (soldadura de tubos).

Tabla 13 Coste de la bicicleta en tienda, fabricada por métodos convencionales [25]

Componentes	Coste (€)
Cuadro	50
Frenos delanteros y traseros	17
Horquilla	14
Dirección (manillar)	8
Sillín y tija	9
Ruedas delanteras y traseras (neumático y llantas)	16
Ruedines	6

6.1.2.2 Cuadro optimizado (1:1) y fabricado por impresión 3D en aluminio (1:1)

Se ha solicitado presupuesto en dos empresas distintas, en ambos casos han contestado que no es posible actualmente realizar un presupuesto del modelo 3D enviado en escala 1:1. Este problema surge del tamaño máximo de las impresoras de aluminio (Figura 129).

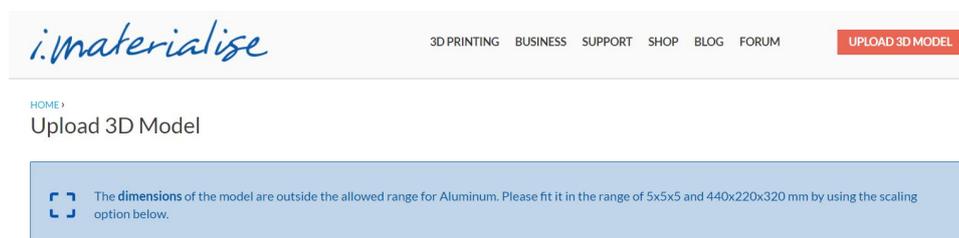
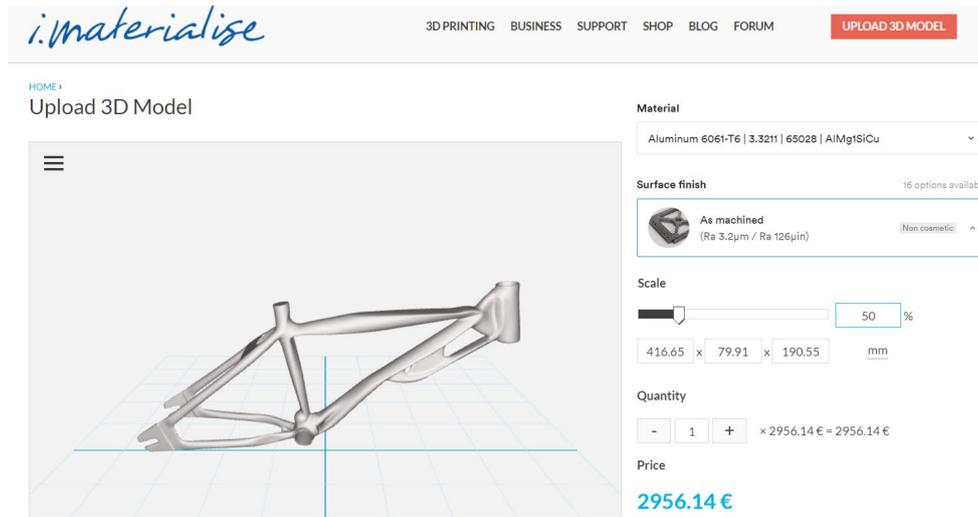


Figura 129 Problema con el generador de presupuestos

En todo caso se han generado los presupuesto para el cuadro en aluminio 6061-T6 a escala 1:2 y los presupuestos son : Figura 130 y Figura 131. Las empresas han sido “I.MATERIALISE” y “PROTOLABS”.



The screenshot shows the i.materialise website interface. On the left, there is a 3D model of a bicycle frame on a grid. On the right, there are configuration options: Material (Aluminum 6061-T6 | 3.3211 | 65028 | AlMg1SiCu), Surface finish (As machined, Ra 3.2µm / Ra 126µin), Scale (50%), and Quantity (1). The total price is displayed as 2956.14 €.

Figura 130 Presupuesto I.MATERIALISE Fabricación impresión 3D aluminio, [26]



[View DFM analysis](#)

Asm1_IGES_v15_opt_Altair.igs

Price per part	3012,14€
Quantity	1
Total	3012,14€
Technology	CNC machining
Material	Aluminum 6061-T6 3.3211 65028 AlMg1SiCu
Color	No color
Part markings	No
General tolerance	ISO 2768 Medium
Tightest linear tolerance	within general tolerance
Engineering fits	No
Has threads	No
Internal corners	2 mm radii
Technical drawing	—
Custom requirements	—

Figura 131 Presupuesto PROTOLABS Fabricación impresión 3D aluminio, [27]

6.2 ANÁLISIS Y COMPARATIVA

Tras realizar un análisis del rendimiento del cuadro original con el optimizado con el método de elementos finitos, ahora es el momento de analizar los costes. Lo primero que hay que decir es que **ambos métodos de fabricación no son comparables**. El método tradicional está pensado para la fabricación de productos en grandes cantidades y la personalización y el rendimiento no son la prioridad. La fabricación aditiva es una tecnología todavía en desarrollo que permite una personalización del producto hasta el último detalle, pero que presenta todavía unos costes muy elevados. El objetivo de las dos fabricaciones no es el mismo, por lo que el análisis de costes se realiza sólo a modo de demostración pero en ningún caso las tecnologías son comparables. La Tabla 14 muestra un resumen de los costes.

Tabla 14 Resumen de costes de fabricación, fuente propia en base a [26], [27], [25]

Modelo	Material	Coste
Prototipo escaneado 1:2	PA12	96,54 €
Prototipo optimizado 1:2	PA12	62,73 €
Modelo Fabricación aditiva 1:2	Aluminio 6061-T6	2956,14 €
Modelo Fabricación tradicional cuadro bicicleta infantil 1:1	Aluminio 6061-T6	50 €
Modelo Fabricación tradicional cuadro de alto rendimiento de adulto 1:1	Aluminio 6061-T6	≈ 700 €

Como era de esperar los costes de la fabricación aditiva son elevadísimos respecto a los de la fabricación tradicional. Tras estos resultados parece razonable, decir que el sector del deporte no es un nicho de mercado para la fabricación aditiva. Dado los altos costes, aún con la mejora de rendimiento que acompañan a la fabricación aditiva combinada con la optimización topológica, el ciclismo actualmente no es un objetivo claro para la fabricación aditiva. Sí puede ser una vía de innovación y desarrollo para futuras bicicletas que poco a poco vayan incluyendo innovaciones derivadas de la optimización tipológica e impresión en 3D.

Si se deja a un lado el aspecto económico, el cuadro permite aumentar el rendimiento del ciclista lo que representa una importante mejora para deportistas profesionales. En la Figura 132 se pueden comparar ambos cuadros. A simple vista el cuadro se beneficia de la optimización topológica gracias a su importante reducción de peso. Esta reducción de peso viene acompañada de la garantía de que se siguen manteniendo la resistencia y rigidez del cuadro.



Figura 132 Comparativa de los prototipos del cuadro, fuente propia

Capítulo 7. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Durante el desarrollo de este proyecto de investigación se ha analizado y optimizado el proceso de “diseño y producción” de un chasis de bicicleta. Para poder llevarlo a cabo se ha empleado la ingeniería inversa para el escaneo de un chasis, la optimización topológica para la mejora de rendimiento del cuadro y por último las tecnologías de fabricación aditiva para la producción de los prototipos. Con la ayuda de todas estas tecnologías se ha conseguido mejorar el rendimiento del chasis y así aumentar el rendimiento del sistema (la bicicleta), permitiendo mejorar la eficiencia en cada pedalada. Este proyecto ha permitido sacar las siguientes conclusiones:

- La tecnología de escaneo 3D ha demostrado ser capaz de llevar un modelo físico al ámbito digital (modelo CAD). El escaneado del chasis ha sido un rotundo éxito.
- La optimización topológica ha permitido reducir considerablemente la masa del cuadro, garantizando la resistencia estructural.
- La aplicación de los criterios de diseño generativo ha optimizado el flujo de trabajo, permitiendo llegar a resultados más rápido.
- La reducción de la masa gracias a la optimización topológica permite aumentar el rendimiento general de la bicicleta, menos masa que frenar y menos masa que empujar.
- Los costes de la fabricación aditiva para un chasis de bicicleta como el de este proyecto no son viables para este sector.
- La optimización topológica combinada con la impresión 3D tendría más sentido en sectores donde el ahorro de masa y mejora del rendimiento se vean acompañado de una gran mejora en el rendimiento económico que sea capaz de suplir el aumento de precios de este tipo de tecnologías de fabricación. Un ejemplo claro del nicho de mercado de estas tecnologías es el sector aeronáutico donde prima el rendimiento y el ahorro de peso.

Este proyecto de investigación me ha permitido adquirir numerosas habilidades que vienen acompañadas de nuevos conocimientos. A continuación haré una breve lista con los conocimientos más importantes que me llevo de este trabajo final de máster.

- Aprendizaje del proceso de escaneo y de la herramienta de tratado de datos escaneados VXelements. A lo largo de este proyecto he tenido la oportunidad de enfrentarme a retos nuevos en el campo de la ingeniería inversa. Estos retos vienen acompañados de conocimientos y valiosas habilidades en este campo.
- Aprendizaje del proceso de optimización topológica y del diseño generativo. He podido estudiar a fondo las posibilidades que ofrece la optimización de la mano de SolidEdge, el programa en el que se ha llevado a cabo todo el trabajo de diseño y optimización del chasis.
- Simulaciones y ensayos: he aprendido a realizar simulaciones y ensayos en piezas con un programa de uso profesional. He descubierto el potencial y las innumerables posibilidades que ofrece el análisis de elementos finitos en toda la ingeniería.
- Primer contacto con la fabricación aditiva. He podido entender el proceso de fabricación por impresión en 3D y he aprendido las dificultades de enfrentarse al reto que conlleva el pasar de un modelo CAD en el ordenador a un prototipo físico fabricado en un laboratorio.

De cara a futuros trabajos en la línea de investigación que ha seguido este proyecto, me gustaría dar mis impresiones y recomendaciones.

- Creo que es necesario conocer en profundidad una aplicación de ingeniería inversa como parte de la estrategia de optimización de la nube de puntos. Disponer de VXelements y asistir al curso de la profesora Silvia Fernández ha sido fundamental para conseguir llegar al nivel de detalle alcanzado en el tratamiento de la nube de puntos. Como punto de partida para la optimización de nubes, el manejo de una herramienta de tratamiento de datos es imprescindible.
- Creo que hay un grandísimo potencial en la ingeniería inversa. Este proyecto no ha podido desarrollar ni investigar la posibilidad real de conseguir trasladar el cuadro

tubular al modelo CAD, se ha tenido que partir de las hipótesis de trabajo mencionadas en el desarrollo del proyecto. Como futura línea de investigación es fundamental analizar la capacidad de convertir una nube de puntos en una pieza tubular.

- SolidEdge es un gran programa de diseño de piezas y de optimización topológica, pero parece que no ha podido rendir al 100% de su capacidad por el tipo de pieza trabajado en este proyecto. El chasis de bicicleta parece haber encontrado los límites del programa debido a la representación del cuadro en el modelo CAD.
- La optimización topológica ofrece un gran potencial a la hora de simular. Por limitación de tiempo no se ha podido explorar tanto como habría querido los distintos materiales y como la colocación de cargas en distintas ubicaciones pueden afectar al proceso de optimización y al diseño generado.

Capítulo 8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] N. Unidas, «Objetivos de desarrollo sostenibles,» Naciones Unidas, 2024. [En línea]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>.
- [2] Creaform, «VXelements,» Creaform, 2024. [En línea]. Available: <https://www.creaform3d.com/es/soluciones-de-metrologia/plataformas-de-software-de-aplicaciones-3d>.
- [3] Siemens, «Solid Edge,» Siemens, 2023. [En línea]. Available: <https://solidedge.siemens.com/es/>.
- [4] N.A, «Vecteezy arte,» 2023. [En línea]. Available: <https://es.vecteezy.com/artevectorial/5317418-conjunto-de-iconos-de-tipos-de-bicicleta-estilo-simple>.
- [5] I. S. G. Pavón, «Objetivo Triatlón,» Diciembre 2023. [En línea]. Available: <https://objetivotriatlón.com/la-fibra-de-carbono-de-las-bicicletas-en-peligro-por-su-alto-y-negativo-impacto-ambiental/>.
- [6] Materialise, «Materialise,» Julio 2022. [En línea]. Available: <https://www.materialise.com/en/inspiration/articles/canyon-sustainable-concept-bike>.
- [7] M. G., «Canyon y su bicicleta de montaña más duradera gracias a la impresión 3D,» 3D native, España, 2022.
- [8] J. P. Galán, «Ingeniería y Diseño,» Madrid, 2024.

- [9] Altertecnica, «Ingeniería inversa para maquinaria. Qué es y para qué sirve,» Altertecnica, 2024.
- [10] 3. scantech, «3D Scantch,» Abril 2024. [En línea]. Available: <https://www.3d-scantech.com/es/what-3d-scanning-can-do-for-reverse-engineering/>.
- [11] S. F. Villamarín, «Métodos de Escaneo 3D para ingeniería inversa,» ICAI, Madrid, 2024.
- [12] D. Miles, «¿Qué es el diseño generativo y cómo puede aprovecharse en la fabricación?,» Autodesk, Madrid, 2022.
- [13] L. Rodriguez, «Autodesk Spain: Aplicación de Diseño Generativo dentro del diseño,» Autodesk Spain, 9 noviembre 2023. [En línea]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=X8OQQwkI8k8>.
- [14] H. G. Marín, «TFM Optimización topológica como medio de generación de ideas para el diseño de productos,» Valencia, 2021.
- [15] Lucia.c, «Impresión 3D en la nueva motocicleta de BMW,» *3D native*, Mayo 2018.
- [16] Lucia.C, «Renault Trucks mejora sus motores con la fabricación aditiva de metal,» *3D native*, enero 2017.
- [17] M. O. a. S. Keates, *Finite Elements Applications- A Practical Guide to the FEM process*, Cham, Switzerland: Springer, 2018.
- [18] O. C. Zienkiewicz, *El método de los elementos finitos*, Barcelona: Editorial Reverté, 2007.
- [19] A. C. Sans, «Mejora de la calidad de mallas para elementos finitos,» Barcelona, 2003.

- [20] R. Interempresas, «De las prótesis estandarizadas a las personalizadas gracias a la fabricación aditiva,» *Interempresas*, p. 3, 25 Junio 2020.
- [21] Aenor, «Método de ensayos del cuadro y de la horquilla,» Asociación Española de Normalización y Certificados, Madrid, 2015.
- [22] Aenor, «Requisitos de seguridad para bicicletas infantiles UNE-EN ISO 8098,» Aenor, Madrid, 2015.
- [23] A. Inspire™, «Altair® Inspire™,» Altair® Inspire™, 2024. [En línea]. Available: <https://www.altair.com.es/inspire/>.
- [24] M. J. Calzado, «Fabricación aditiva, tecnologías de fabricación,» ICAI Comillas, Madrid, 2023.
- [25] Decathlon, «Decathlon,» Decathlon, 07 2024. [En línea]. Available: <https://www.decathlon.es/es/>.
- [26] I.MATERIALISE, «I.MATERIALISE,» I.MATERIALISE, Agosto 2024. [En línea]. Available: <https://i.materialise.com/en>.
- [27] PROTOLABS, «PROTOLABS,» PROTOLABS, Agosto 2024. [En línea]. Available: <https://www.hubs.com/>.
- [28] F. G. Castillo, «Ponencia de Métodos de elementos finitos,» Felipe Gabaldón Castillo, 2007. [En línea]. Available: <http://w3.mecanica.upm.es/~felipe/mef0708/prep-hdout-1x2.pdf>.

ANEXO I

Ficha técnica del escáner Go!SCAN50 empleado en el proyecto:

TECHNICAL SPECIFICATIONS			
	Go!SCAN 20™	Go!SCAN 50™	
WEIGHT	930 g	950 g	That's less than a liter of milk.
DIMENSIONS	154 x 178 x 235 mm	150 x 171 x 251 mm	Think about a box of tissues.
MEASUREMENT RATE	550,000 measures /sec.		Every second, more than 500,000 different measurements are recorded to create the 3D model.
SCANNING AREA	143 x 108 mm	380 x 380 mm	Go!SCAN 20: about the size of a typical greeting card. Go!SCAN 50: half the size of a movie poster.
LIGHT SOURCE	White light (LED)		Similar to your LED flashlight!
RESOLUTION	0.200 mm	0.500 mm	Smaller than a grain of sand (but please don't try to scan one...)
ACCURACY	Up to 0.100 mm		Thinner than a human hair!
VOLUMETRIC ACCURACY*	0.300 mm/m		Depends on the size of the part you are scanning...
POSITIONING METHODS	Geometry and/or color and/or targets		Very flexible, taking advantage of all the information naturally available.
STAND-OFF DISTANCE	380 mm	400 mm	About the same distance you would instinctively place your favorite book or e-reader
DEPTH-OF-FIELD	100 mm	250 mm	Greater depth-of-field = more flexibility in the stand-off distance.
PART SIZE RANGE (RECOMMENDED)	0.05 - 0.5 m	0.3 - 3.0 m	From the size of a chicken egg to a sub-compact car: the possibilities are very wide!
TEXTURE RESOLUTION	50 to 250 DPI	50 to 150 DPI	Enough to provide a clean and crisp texture.
TEXTURE COLORS	24 bits		Millions of colors for the widest palette of possibilities.
SOFTWARE	VXelements		Simple but powerful 3D software platform, included with the scanner.
OUTPUT FORMATS	.dae, .fbx, .ma, .obj, .ply, .stl, .txt, .wrl, .x3d, .x3dz, .zpr		Don't even try to find software that won't open these files...!
COMPATIBLE SOFTWARE	3D Systems (Geomagic® Solutions), InnovMetric Software (PolyWorks), Dassault Systèmes (CATIA V5 and SolidWorks), PTC (Pro/ENGINEER), Siemens (NX and Solid Edge), Autodesk (Inventor, Alias, 3ds Max, Maya, Softimage).		A pretty complete list isn't it?
CONNECTION STANDARD	1 x USB 2.0		Same as your smartphone or camera.
OPERATING TEMPERATURE RANGE	15-40 °C		Meaning pretty much any normal indoor conditions.
OPERATING HUMIDITY RANGE (NON-CONDENSING)	10-90%		

*With positioning targets or with an object presenting adequate geometry/color texture for positioning.

Ficha técnica material HP PA12:

HP 3D High Reusability PA 12

Strong, lowest cost,¹ quality parts



Technical specifications⁸

Category	Measurement	Value	Method
General properties	Powder melting point (DSC)	187°C / 369°F	ASTM D3418
	Particle size	6.0 µm	ASTM D1451
	Bulk density of powder	0.425 g/cm ³ /0.015 lb/in ³	ASTM D1895
	Density of parts	1.01 g/cm ³ /0.036 lb/in ³	ASTM D792
Mechanical properties	Tensile strength, max load, ⁹ XY, XZ, YX, YZ	48 MPa/6960 psi	ASTM D638
	Tensile strength, max load, ⁹ ZX, ZY	48 MPa/6960 psi	ASTM D638
	Tensile modulus, ⁹ XY, XZ, YX, YZ	1800 MPa/261 ksi	ASTM D638
	Tensile modulus, ⁹ ZX, ZY	1800 MPa/261 ksi	ASTM D638
	Elongation at break, ⁹ XY, XZ, YX, YZ	20%	ASTM D638
	Elongation at break, ⁹ ZX, ZY	15%	ASTM D638
	Flexural strength (@ 5%), ¹⁰ XY, XZ, YX, YZ	70 MPa/10150 psi	ASTM D790
	Flexural strength (@ 5%), ¹⁰ ZX, ZY	70 MPa/10150 psi	ASTM D790
	Flexural modulus, ¹⁰ XY, XZ, YX, YZ	1800 MPa/261 ksi	ASTM D790
	Flexural modulus, ¹⁰ ZX, ZY	1800 MPa/261 ksi	ASTM D790
	Izod impact notched (@ 3.2 mm, 23°C), XY, XZ, YX, YZ	3.6 kJ/m ²	ASTM D256 Test Method A
	Izod impact notched (@ 3.2 mm, 23°C), ZX, ZY	3.5 kJ/m ²	ASTM D256 Test Method A
Thermal properties	Shore Hardness D, XY, XZ, YX, YZ, ZX, ZY	80	ASTM D2240
	Heat deflection temperature (@ 0.45 MPa, 66 psi), XY, XZ, YX, YZ	175°C/347°F	ASTM D648 Test Method A
	Heat deflection temperature (@ 0.45 MPa, 66 psi), ZX, ZY	175°C/347°F	ASTM D648 Test Method A
	Heat deflection temperature (@ 1.82 MPa, 264 psi), XY, XZ, YX, YZ	95°C/203°F	ASTM D648 Test Method A
Reusability	Heat deflection temperature (@ 1.82 MPa, 264 psi), ZX, ZY	95°C/203°F	ASTM D648 Test Method A
	Refresh ratio for stable performance	20%	
Accuracy	Dimensional accuracy	±0.2 mm/0.008 inches to ±0.2% ¹¹	
Recommended environmental conditions	Recommended relative humidity	50-70% RH	
Certifications	USP Class I-VI and US FDA guidance for Intact Skin Surface Devices, RoHS, ¹² EU REACH, PAHs, UL 94, UL 746A, Statement of Composition for Toy Applications		

Ordering Information

	HP 3D High Reusability PA 12	HP 3D High Reusability PA 12	HP 3D High Reusability PA12 Production Material	HP 3D High Reusability PA12 ¹³
Product number	V1R10A	V1R16A	V1R34A	V1R20A
Weight	13 kg/28.7 lb	130 kg/286.7 lb	130 kg/286.7 lb	600 kg/1322.8 lb
Capacity	30L ¹⁴	300L ¹⁴	300L ¹⁴	1400L ¹⁴
Dimensions (xyz)	600 x 333 x 302 mm	800 x 600 x 1205 mm	800 x 600 x 1205 mm	1143 x 1143 x 1500 mm
Printer compatibility	HP Jet Fusion 3D 4210/4200 Printing Solution	HP Jet Fusion 3D 4210/4200 Printing Solution	HP Jet Fusion 3D 4210 Printing Solution	HP Jet Fusion 3D 4210 Printing Solution
Fast cooling compatibility	Compatible	Compatible	Compatible	Compatible

Eco Highlights

- Powders and agents are not classified as hazardous¹⁵
- Cleaner, more comfortable workplace—enclosed printing system, and automatic powder management¹⁶
- Minimizes waste due to industry-leading reusability of powder¹⁷

Find out more about HP sustainable solutions at hp.com/ecosolutions

Dynamic security enabled printer. Only intended to be used with cartridges using an HP original chip. Cartridges using a non-HP chip may not work, and those that work today may not work in the future. More at: hp.com/go/learnaboutesupplies.

Learn more at hp.com/go/3DMaterials