



MÁSTER EN INGENIERÍA PARA LA MOVILIDAD Y LA SEGURIDAD

TRABAJO FIN DE MÁSTER DISEÑO Y CÁLCULO DE UN CUADRO DE BICICLETA EN FIBRA DE CARBONO

Autor: Alejandra Basurco Hernández de Santamaría
Director: Alberto Carnicero López, Ángel Rubio López

Madrid 2022

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

Diseño y cálculo de un cuadro de bicicleta en fibra de carbono


en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el

curso académico 2021/22 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.: Alejandra Basurco Hernández de Santamaría

Fecha: 28/ 08/ 2022

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO



Fdo.: Alberto Carnicero López, Ángel Rubio López

Fecha: 28/ 08/ 2022



MÁSTER EN INGENIERÍA PARA LA MOVILIDAD Y LA SEGURIDAD

TRABAJO FIN DE MÁSTER DISEÑO Y CÁLCULO DE UN CUADRO DE BICICLETA EN FIBRA DE CARBONO

Autor: Alejandra Basurco Hernández de Santamaría

Director: Alberto Carnicero López, Ángel Rubio López

Madrid 2022

DISEÑO Y CÁLCULO DE UN CUADRO DE BICICLETA EN FIBRA DE CARBONO

Autor: Alejandra Basurco Hernández de Santamaría

Director: Alberto Carnicero López y Ángel Rubio López

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO

Palabras clave: diseño, FEM, materiales compuestos, ingeniería.

1. Introducción

Este proyecto abarca el estudio y uso de diferentes herramientas y áreas para completar el diseño y cálculo de un cuadro de bicicleta en material compuesto como la fibra de carbono. Para ello, han sido necesarios recursos de ingeniería y conocimientos de gestión de proyectos, los cuales han permitido desarrollar, diseñar, analizar y validar el diseño planteado. De estos conocimientos, destaca el aprendizaje adquirido en simulaciones multifísicas, en el manejo de programas de modelado CAD, definición y uso de los materiales compuestos y la importancia del aligeramiento en el sector de la movilidad entre otros. Todos ellos han sido adquiridos en el transcurso del Máster de Ingeniería para la Movilidad y Seguridad.

Es un proyecto completo que permite mostrar y dar a conocer en profundidad nuevas tecnologías y materiales que están en auge debido a sus mejores propiedades tanto mecánicas como físicas.

Asimismo, este proyecto aplica la innovación al plantear un nuevo método de fabricación, el cual permite aunar nuevas y diferentes tecnologías como es la fabricación aditiva y nuevos materiales de impresión con los materiales compuestos, permitiendo su desarrollo en pequeña escala y a nivel individual.

Este proyecto me ha permitido desarrollar y mejorar mis habilidades de organización, planificación y gestión de proyectos; así como a emplear los conocimientos técnicos adquiridos en un proyecto real pudiendo aplicar mi criterio de diseño y de validación.

2. Descripción del proyecto

El diseño se basa en el modelado de un cuadro de bicicleta que corresponde a un modelo de montaña que debe cumplir con una serie de ensayos y requisitos descritos en la norma UNE-EN ISO 4210-6 (2015) *Ciclos. Requisitos de seguridad para bicicletas.*[5]

El diseño consiste en modelado del cuadro a partir de la unión de varias piezas, basado en un proceso de fabricación por partes usando láminas de preimpregnado en fibra de carbono y la fabricación aditiva como tecnología para la fabricación de los moldes.

El proceso de diseño llevado a cabo es el presentado en la Figura 1.

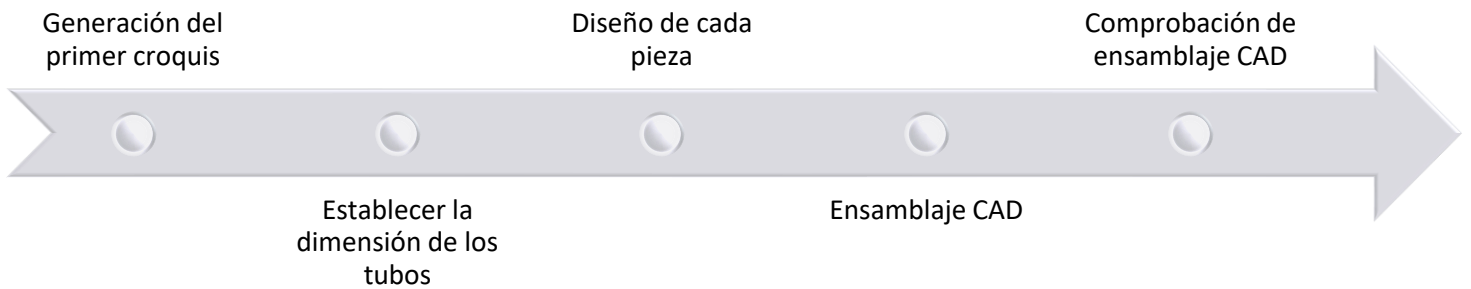


Figura 1: Proceso general de diseño CAD

Una vez llevado a cabo finalizado el diseño del modelo, el cuadro se compone de las siguientes partes mostradas en la Ilustración 1.

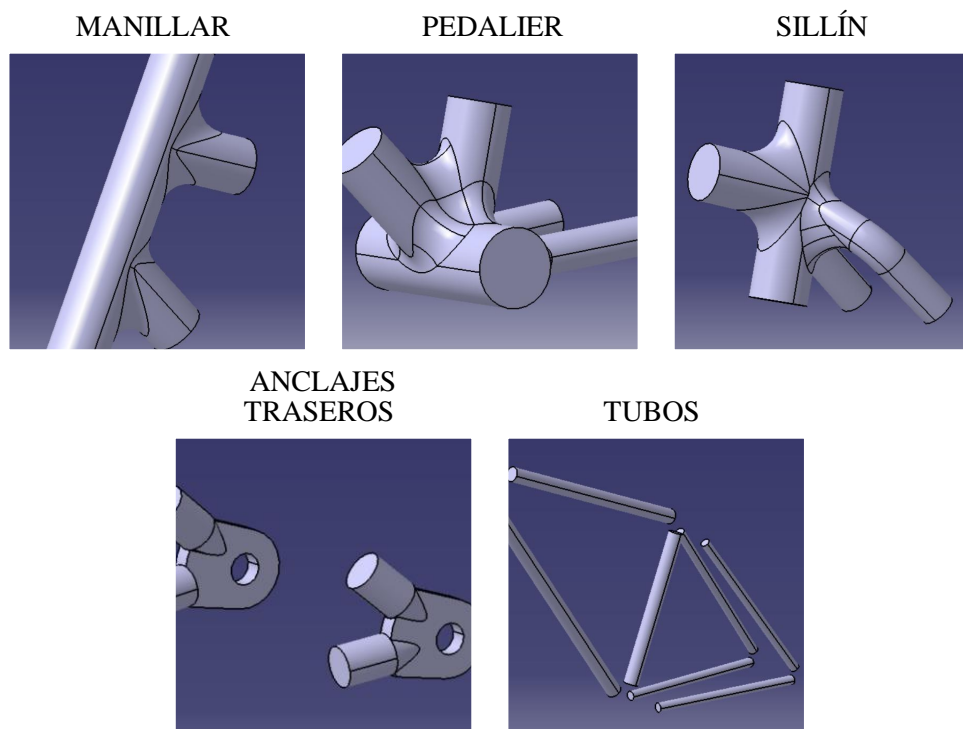


Ilustración 1: Componentes del cuadro diseñados

Formando el conjunto final del cuadro en la Ilustración 2.

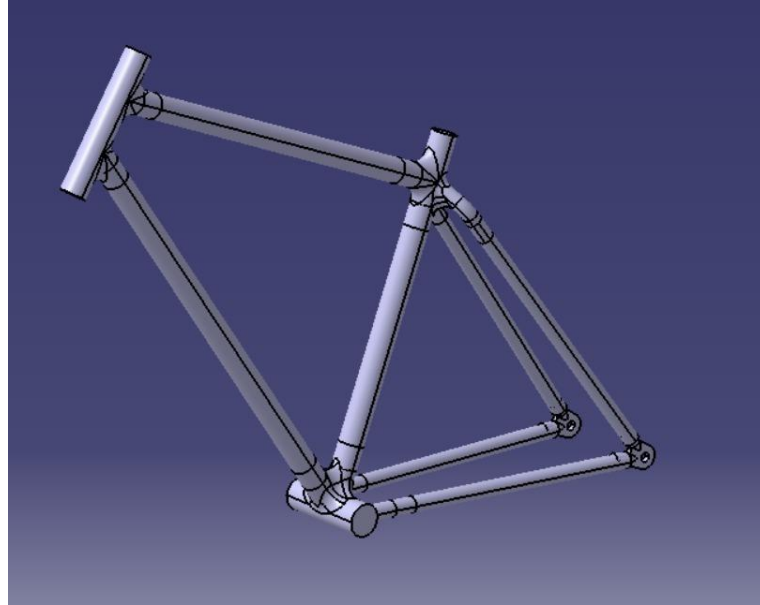
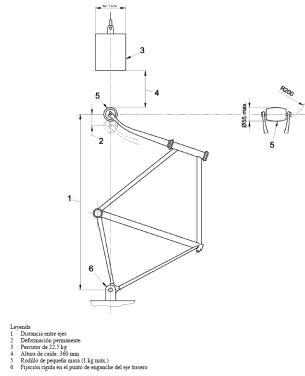


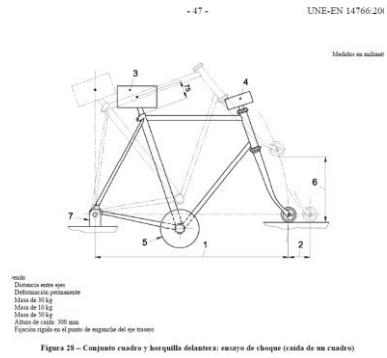
Ilustración 2: Conjunto final del cuadro de bicicleta

Posteriormente al diseño en CAD se llevan a cabo las simulaciones que siguen las especificaciones de la norma [5], con el objetivo de validar la propuesta de laminado en fibra de carbono. Se muestran en la Ilustración 3 los esquemas correspondientes a cada uno de los ensayos.

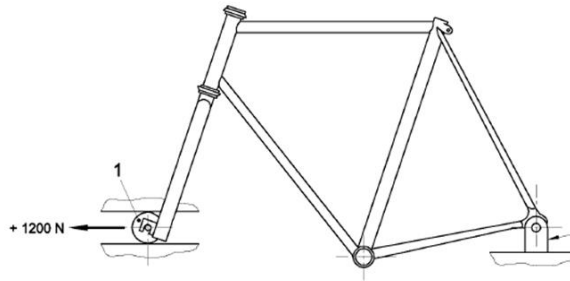
Ensayo caída de masa



Ensayo caída del cuadro

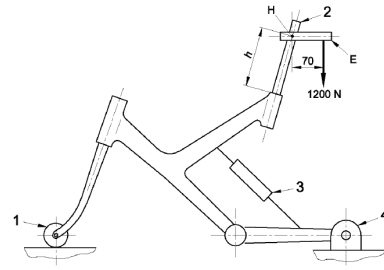


Ensayo con fuerzas horizontales



pivoteamiento que puede girar libremente
 pivoteamiento rígido para el punto de fijación del eje trasero

Ensayo con fuerzas verticales



pivoteamiento libremente
 pivoteamiento rígido o unión rígida para vainas pivotantes para el punto de fijación del eje trasero

Ilustración 3: Esquema de ensayos de la norma UNE-EN ISO 4210-6 (2015) [5]

Asimismo, se lleva a cabo un quinto ensayo, el cual está fuera de la norma y cuyo objetivo es el de someter al cuadro a una situación más extrema y encontrar puntos débiles. Este ensayo simula las cargas a las que podría estar sometido el cuadro durante el pedaleo en una pendiente. Se adjunta en la Ilustración 4 el esquema de esfuerzos de este ensayo.

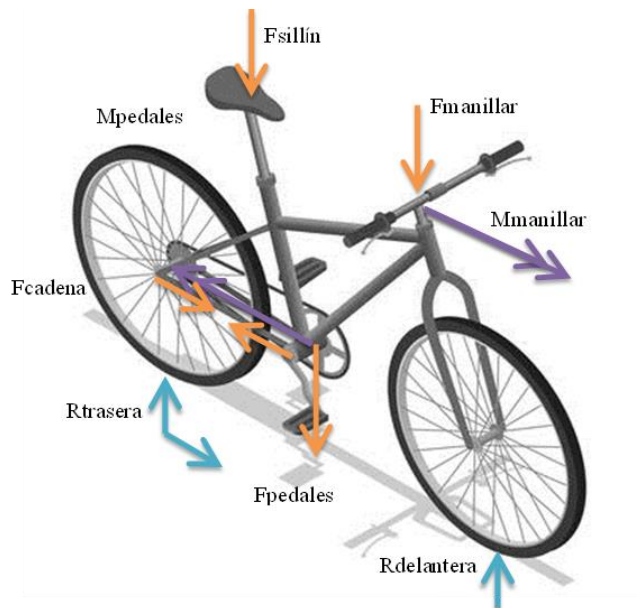


Ilustración 4: Esquema de esfuerzos del ensayo a pedaleo en pendiente

Para ello, se utiliza la herramienta ANSYS Workbench, software de simulación CAE multifísico para análisis y simulación por elementos finitos (FEA). Se han realizado con este software todos las simulaciones y ensayos del cuadro para validar el diseño. Dentro de ANSYS se han utilizado los siguientes módulos.

- ACP (Pre) – Modelizado de materiales compuestos
- Static structural – Análisis estáticos en implíto
- Explicit dynamics – Análisis de caída en explícito
- Modal – Análisis de frecuencia
- Harmonic response – Análisis estructural del cuadro ante diferentes frecuencias

3. Materiales y criterios de fallo

Tras sucesivas iteraciones, la propuesta de laminado que ha cumplido con los requisitos es la presentada en la Tabla 1.

Tabla 1: Estructura de laminado final

MANILLAR, SILLÍN Y PEDALIER					
Capa	Tipo	Grosor	Ángulo	Espesor total	Propiedades
					Material
1	WOVEN [3]	0.3	0	2.8	Tabla 2
2	WOVEN [3]	0.3	0		Tabla 2
3	UD [2]	0.2	45		Tabla 3
4	UD [2]	0.2	0		Tabla 3
5	UD [2]	0.2	-45		Tabla 3
6	UD [2]	0.2	0		Tabla 3
7	UD [2]	0.2	0		Tabla 3
8	UD [2]	0.2	-45		Tabla 3
9	UD [2]	0.2	0		Tabla 3
10	UD [2]	0.2	45		Tabla 3
11	WOVEN [3]	0.3	0		Tabla 2
12	WOVEN [3]	0.3	0		Tabla 2

Las propiedades de cada uno de los preimpregnados utilizados son los adjuntados en la Tabla 2, para el caso de los preimpregnados de tipo woven y en la Tabla 3, para los preimpregnados de tipo unidireccional.

Tabla 2: Propiedades del material VTC401-C200T-T300-2X2T-3K-42%RW [3]

Tensile strength	
Dentro del plano	573 MPa
Fuera del plano	34.3 MPa (1)
Tensile modulus	
Dentro del plano	52.7 GPa
Fuera del plano	7.7 GPa (1)
Flexure strength	
Dentro del plano	863 MPa
Fuera del plano	-
Flexure modulus	
Dentro del plano	51.7 GPa
Fuera del plano	-
Poisson's Ratio	
Dentro del plano	0.3
Fuera del plano	0.01 (1)

Tabla 3: Propiedades del material VTC401-UD100-12K-T700-40%RW-300 [1]

Tensile strength	
Dentro del plano	2354 MPa (1)
Fuera del plano	34.3 MPa (1)
Tensile modulus	
Dentro del plano	116 GPa (1)
Fuera del plano	7.7 GPa (1)
Flexure strength	
Dentro del plano	- MPa
Fuera del plano	-
Flexure modulus	
Dentro del plano	- GPa
Fuera del plano	-
Poisson's Ratio	
Dentro del plano	0.3 (1)
Fuera del plano	0.01 (1)

(1) Todos estos valores que se han introducido en ANSYS, son los mismos valores que los reflejados en la TDS del prepreg VTC401-UD300-T700-24K-37%RW-300P. [1] Esto se ha realizado así debido a la falta de datos en los TDS de los materiales utilizados.

Los tubos son tubos comerciales de 32x26 [6] y 20x16 [7] mm. En este caso, para aproximar sus propiedades mecánicas se ha laminado los tubos en ACP-Ansys como un apilado del mismo preimpregnado de tipo woven utilizado para las piezas de unión. Dichas propiedades se muestran en la Tabla 2.

La validación de la laminado de los preimpregnados de fibra de carbono se basa en los resultados de los criterios de fallo de los materiales compuestos, en concreto, de los criterios de Maximum Stress y Tsai-Wu. Se analiza el factor de seguridad como requisito de validación buscando un resultado mayor que 1.5.

4. Resultados

A continuación, se muestran los resultados obtenidos para cada uno de los requisitos planteados.

4.1. Ensayo caída de masa

En este ensayo, se hace caer un percutor de 22,5 kg sobre el cuadro desde una altura de 360mm. Los resultados obtenidos son los mostrados en Ilustración 5.

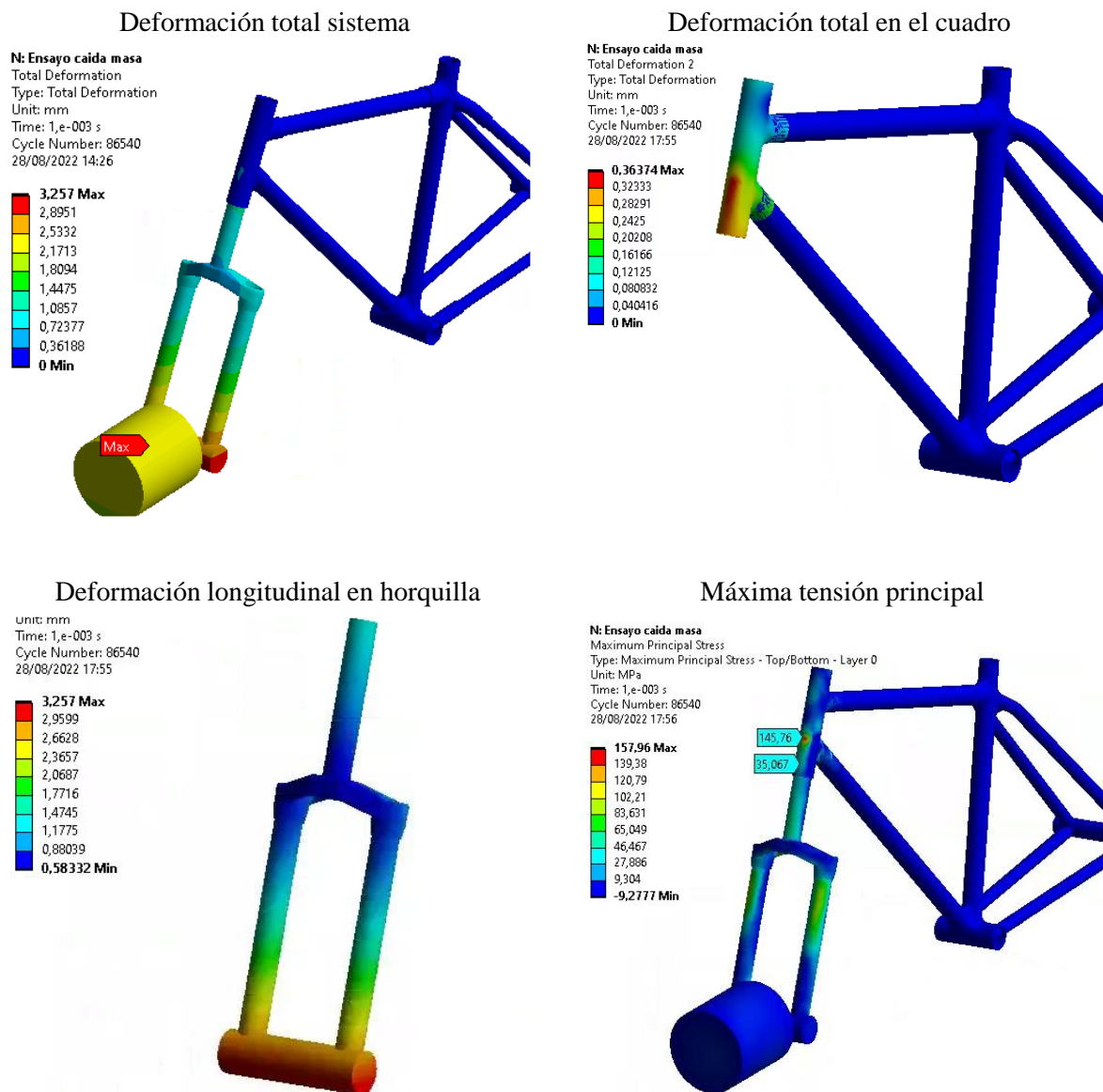


Ilustración 5: Resultados del ensayo de caída de masa

Se puede observar que la deformación producida en el cuadro es muy baja y, por tanto, el cuadro tras este ensayo no debería presentar ninguna fisura y/o rotura. Asimismo, las máximas tensiones producidas en el cuadro son inferiores a las propiedades del material compuesto en cuanto a resistencia a la tracción.

Tabla 4: Factor de seguridad del ensayo de caída de masa

Ensayo caída de masa		
Tensión máxima [MPa]	Máxima resistencia a tracción de la capa [MPa]	Factor de seguridad
158	574	3.6

El factor de seguridad calculado en la Tabla 4, indica un valor mínimo de 3,6, lo suficientemente alto como para asegurar ningún riesgo de fractura o grieta en el cuadro.

La deformación para el tiempo simulado es de un máximo de 3,2mm en dirección X, por lo que la distancia entre ejes tras el ensayo no llegaría a los 10 mm límite establecidos de deformación permanente en la norma.

En conclusión, el diseño cumple con todos los requisitos por lo que el apilado de capas es adecuado para este ensayo.

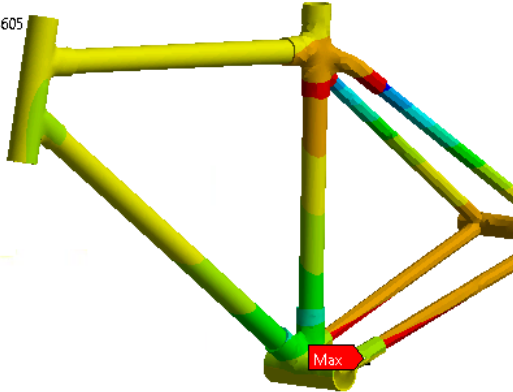
4.2. Ensayo caída del cuadro

Este ensayo simula las consecuencias de dejar caer el cuadro desde una altura de 300 mm teniendo fijado únicamente el desplazamiento del eje trasero, permitiendo así su rotación. Los resultados se adjuntan en la Ilustración 6.

Deformación longitudinal del cuadro

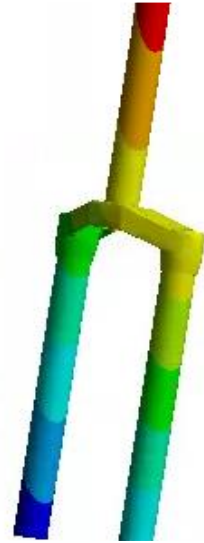
Z: Copy of Ensayo de caída cuadro 3
 Directional Deformation 2
 Type: Directional Deformation(X Axis)
 Unit: mm
 Global Coordinate System
 Time: 2,5e-003 s
 Cycle Number: 234605
 28/08/2022 18:01

1,046 Max
 0,65481
 0,26366
 -0,1275
 -0,51865
 -0,90981
 -1,301
 -1,6921
 -2,0833
 -2,4744 Min



Deformación longitudinal de la horquilla (mm)

2,2558 Max
 1,5608
 0,86585
 0,17085
 -0,52415
 -1,2191
 -1,9141
 -2,6091
 -3,3041
 -3,9991 Min



Máxima tensión principal en el cuadro

Z: Copy of Ensayo de caída cuadro 3
 Maximum Principal Stress 2
 Type: Maximum Principal Stress - Top/Bottom - Layer 0
 Unit: MPa
 Time: 2,5e-003 s
 Cycle Number: 234605
 Custom
 Max: 4259
 Min: -4,5631
 28/08/2022 18:05

100
 82,573
 65,146
 47,718
 30,291
 12,864
 -4,5631

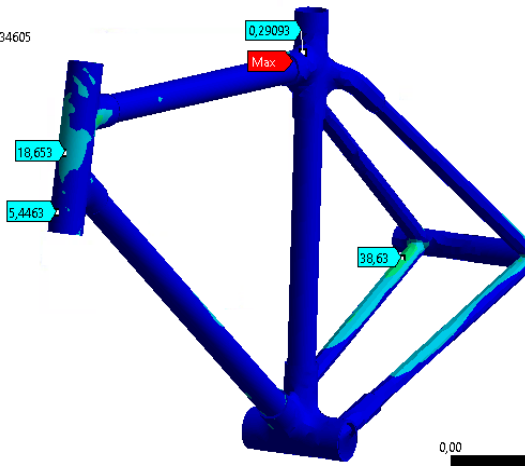


Ilustración 6: Resultados del ensayo de caída del cuadro

En base a los resultados se puede observar que la deformación longitudinal del cuadro para el tiempo de simulación es de 2,25 mm en la horquilla, por lo que se cumple el requisito de la deformación máxima admisible de la flecha tras el ensayo. Por otro lado, las tensiones máximas principales sufridas en el cuadro no son lo suficientemente altas como para resultar en rotura o fisura del cuadro.

Tabla 5: Factor de seguridad ensayo caída del cuadro

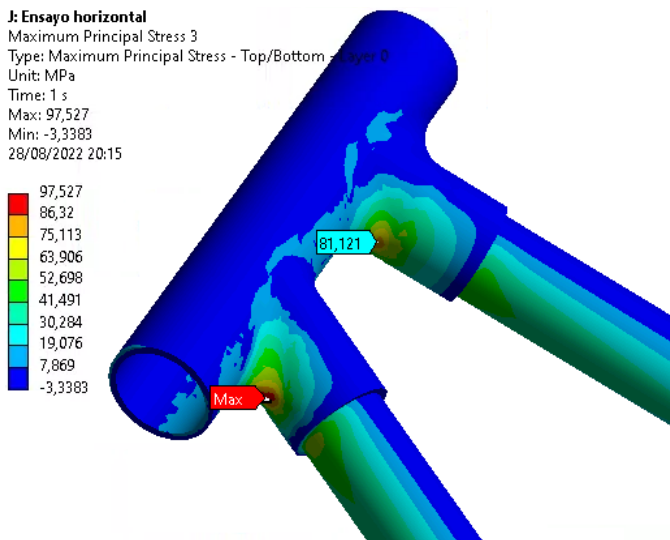
Ensayo caída del cuadro		
Tensión máxima [MPa]	Máxima resistencia a tracción de la capa [MPa]	Factor de seguridad
35	574	16.4

En cuanto al factor de seguridad en este ensayo, en la Tabla 5 se indica el factor de seguridad correspondiente al punto de tensión máximo, indicando que no hay riesgo de rotura o fallo en el cuadro.

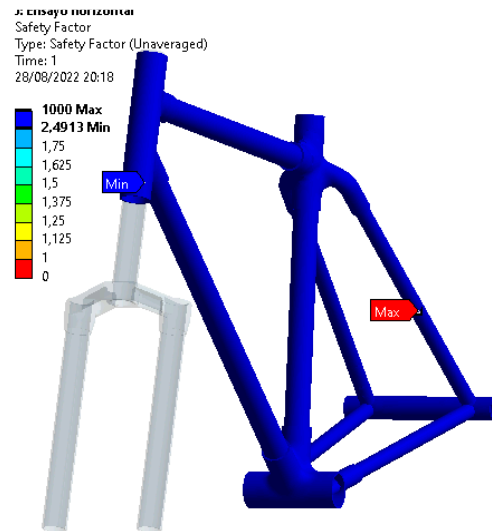
4.3. Ensayo con fuerzas horizontales

Para este ensayo, se ejerce una fuerza horizontal de 1200N en dirección opuesta al cuadro en la parte inferior de la horquilla. Se muestran los resultados obtenidos en la Ilustración 7.

Máxima tensión principal en el cuadro



Maximum stress criterion



Tsai-Wu criterion

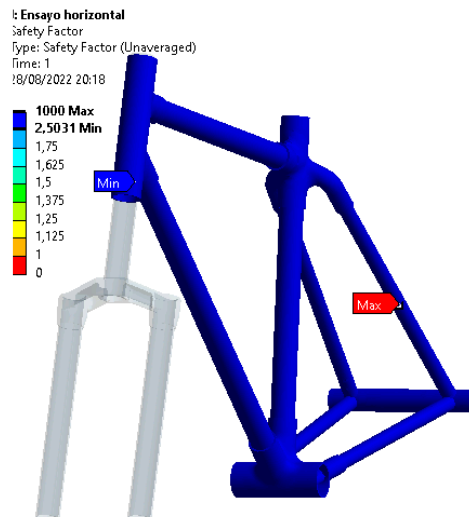


Ilustración 7: Resultado del ensayo con fuerzas horizontales

Observando las imágenes anteriores se puede observar que en ninguno de los casos se producen fallos en el material compuesto con unos factores de seguridad muy por encima del establecido como criterio de conformidad. El valor mínimo en el cuadro del factor de seguridad es de 2,5.

Consultando los resultados se puede apreciar que la flecha máxima no podría alcanzar en ningún caso el límite establecido por la norma. Asimismo, los resultados tensionales están muy por debajo de los límites propios del material compuesto utilizado.

4.4. Ensayo con fuerzas verticales

Para este ensayo, se ejerce una fuerza vertical de 1200N en dirección opuesta al cuadro en la parte superior del sillín. Se muestran los resultados obtenidos en la Ilustración 8.

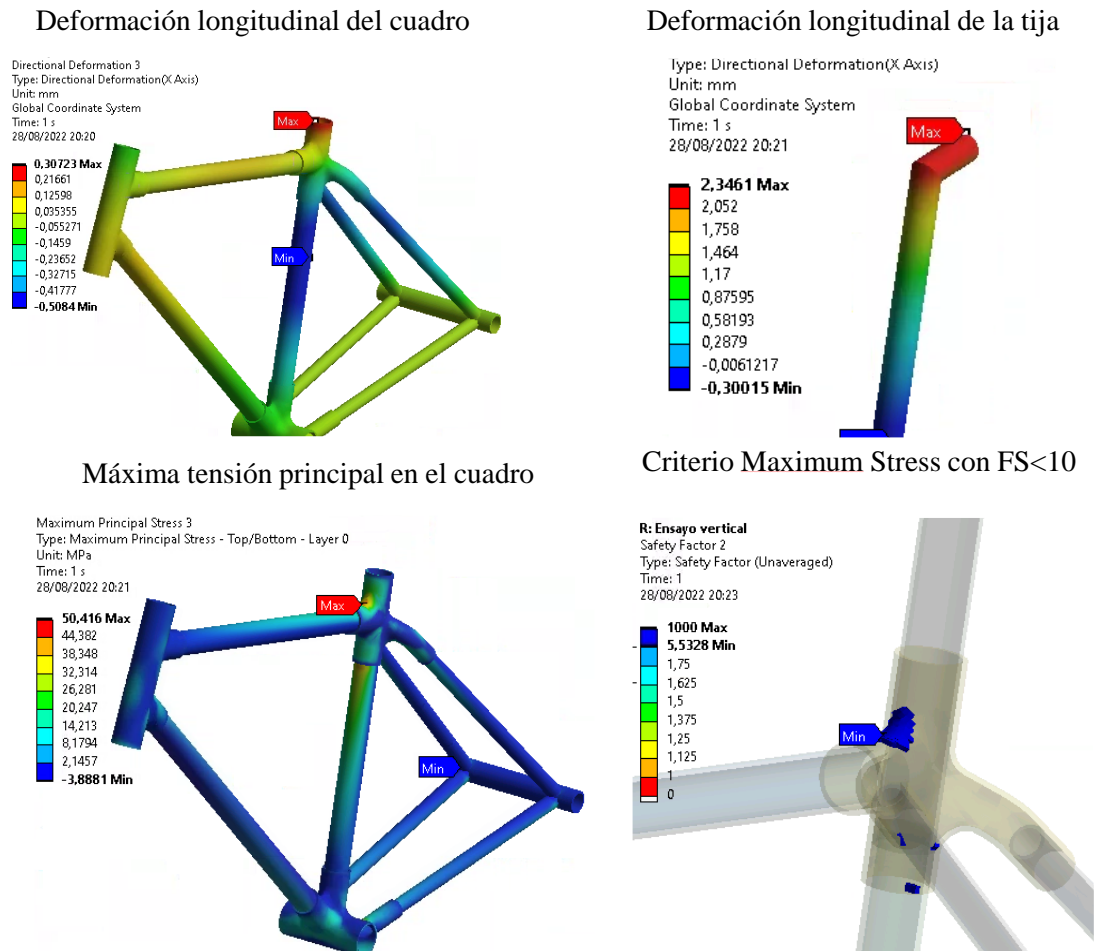


Ilustración 8: Resultados del ensayo con fuerzas verticales

Tras analizar los resultados se puede apreciar que el estado tensional del cuadro tras el ensayo está por debajo de los límites del material compuesto. Asimismo, los resultados de los diferentes criterios de fallo dan unos factores de seguridad muy altos, siendo el valor mínimo de 5,5, lo que significa que el riesgo de cualquier fallo en el material compuesto es mínimo.

En lo referente al segundo requisito, los resultados de deformación en la tija, son menores que el límite requerido para superar el ensayo.

4.5. Ensayo de pedaleo en pendiente

Para este ensayo, se ejerce una serie de fuerzas y momentos sobre el cuadro que representan el diagrama de esfuerzos durante una situación de pedaleo en pendiente. Se muestran los resultados obtenidos en la Ilustración 9.

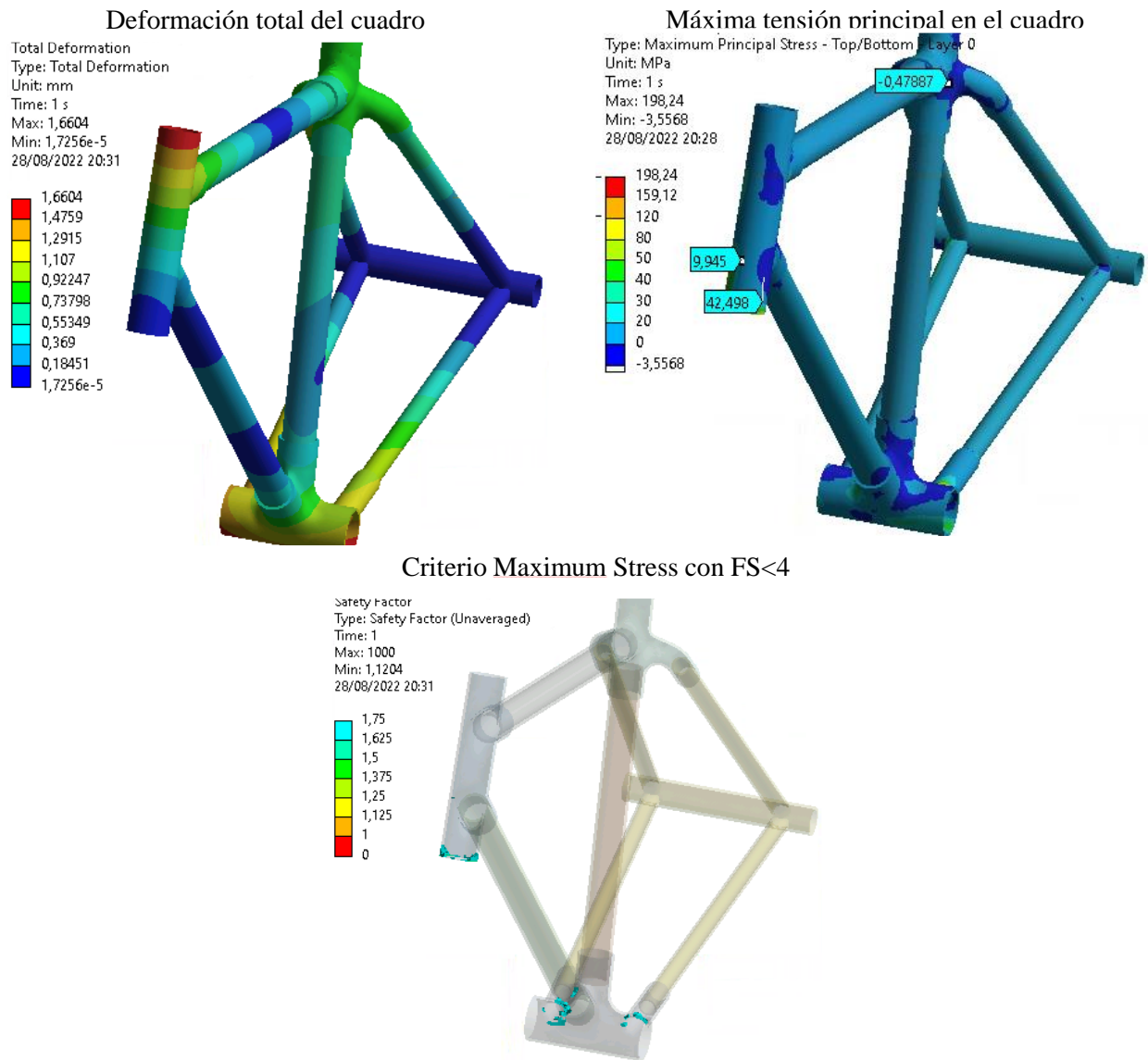


Ilustración 9: Resultados del ensayo de pedaleo en pendiente

Se puede observar que los niveles tensionales producidos en el cuadro no son muy altos; de forma general, estos valores son entorno a los 35 Mpa, a excepción de los puntos más cercanos a las zonas donde se imponen las condiciones de contorno.

En lo que refiere al criterio de fallo, se observa que los elementos que presentan factores de seguridad menores que 2 son aquellos que se sitúan en zonas donde se aplica condiciones de contorno suponiendo puntos críticos. En el resto del cuadro los factores de seguridad son los

suficientemente altos como para asegurar ninguna rotura o fisura en el cuadro. No obstante, estos resultados muestran los puntos en los que se ha de realizar un seguimiento para vigilar la aparición de fisuras.

Tras analizar los resultados, se da por validado tanto el diseño del cuadro como la propuesta de laminado de los preimpregnados de fibra de carbono y la elección de los tubos comerciales de fibra de carbono.

5. Conclusiones

Tras el presente trabajo de estudio y análisis, se ha conseguido obtener un modelo de cuadro cuyo diseño está justificado y razonado desde el punto de vista estructural, superando los ensayos que especifica la norma referente a los cuadros de bicicleta.

En la Tabla 6, se resumen todos los resultados de los factores de seguridad para cada ensayo.

Tabla 6: Resumen de los resultados de los factores de seguridad de todos los ensayos

	Factor de seguridad mínimo	Factor de seguridad medio
Ensayo caída masa	16.4	-
Ensayo caída del cuadro	3.6	-
Ensayo fuerzas horizontales	2,5	119,5 (medio)
Ensayo fuerzas verticales	5,5	167,8(medio)
Ensayo pedaleo en pendiente (*)	1,1	69,1 (medio)

(*)Ensayo que no pertenece a la norma [5].

Repasando los objetivos planteados en un principio, una vez terminado el proyecto, se puede afirmar que todos ellos han sido logrados.

Objetivo 1. Se ha conseguido exitosamente desarrollar un proceso de diseño basado en un buen análisis y estudio de los resultados.

Objetivo 2. Tras el aprendizaje del uso del módulo de ACP de ANSYS para el análisis de materiales compuestos se ha comprendido las dificultades de ensayar modelos con materiales compuestos.

Objetivo 3. Se ha adquirido destreza en el uso de herramientas y softwares como es ANYS y Matlab.

Objetivo 4. Como ya se ha introducido antes, durante el transcurso del proyecto se han ido superando diferentes problemas y dificultades, consiguiendo finalmente resultados analizables y con un resultado exitoso para el modelo final del cuadro.

A partir de este proyecto se puede y pretende llevar a cabo la materialización del cuadro en material compuesto, basándose en el método de fabricación descrito en un principio. Este

proyecto, bajo el título *Proceso de fabricación de un cuadro de bicicleta en fibra de carbono* [4], se ha consolidado, consiguiendo exitosamente un cuadro en fibra de carbono usable.

6. Referencias

- [1] VTC401 Mechanical properties - Prepreg Carbono-Epoxi VTC401-UD300-T700-24K-37%RW-300P. CastroComposites.
- [2] VTC401 Mechanical properties - Prepreg Carbono-Epoxi MTC510-UD300-HS-33%RW (SHD0373-300P). CastroComposites.
- [3] VTC401 Mechanical properties - Prepreg Carbono-Epoxi VTC401-C200T-T300-2X2T-3K-42%RW. CastroComposites.
- [4] Trabajo de Fin de Máster de Ingeniería Industrial - *Proceso de fabricación de un cuadro de bicicleta en fibra de carbono*, Alejandra Basurco Hernández de Santamaría.
- [5] Norma española UNE-EN ISO 4210-6 (2015) Ciclos. Requisitos de seguridad para bicicletas.
- [6] Clipcarbono Tubos 32x26. <https://www.clipcarbono.com/>
- [7] Clipcarbono Tubos 20x16. <https://www.clipcarbono.com/>

DESIGN AND CALCULATION OF A CARBON FIBER BICYCLE FRAME

Author: Alejandra Basurco Hernández de Santamaría
Supervisor: Alberto Carnicero López y Ángel Rubio López
Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

ABSTRACT

Keywords: design, FEM, composite materials, engineering.

1. Introduction

This project involves the development and use of different tools and areas to complete the design and analysis of a bicycle frame in composite material such as carbon fiber. For this purpose, engineering resources and project management knowledge have been necessary, which have allowed the development, design, analysis and validation of the proposed design.

It is a complete project that shows new technologies and materials that are on the rise due to their improved mechanical and physical properties.

Also, this project applies innovation by proposing a new manufacturing method, which allows to combine new and different technologies such as additive manufacturing and new printing materials with composite materials, allowing its development on a small scale and at an individual level.

This project has helped me to develop and improve my organizational, planning and project management skills, as well as to use the technical knowledge acquired in a real project, being able to apply my design and validation criteria.

2. Project description

The design is based on the modeling of a bicycle frame corresponding to a mountain model that must comply with a series of tests and requirements described in the UNE-EN ISO 4210-6 (2015) Cycles. Safety requirements for bicycles.[5]

The design consists of modeling the frame from the union of several parts, based on a parts manufacturing process using carbon fiber prepreg laminates and additive manufacturing as the technology for the manufacture of the molds.

The design process carried out is presented in Figura 2.

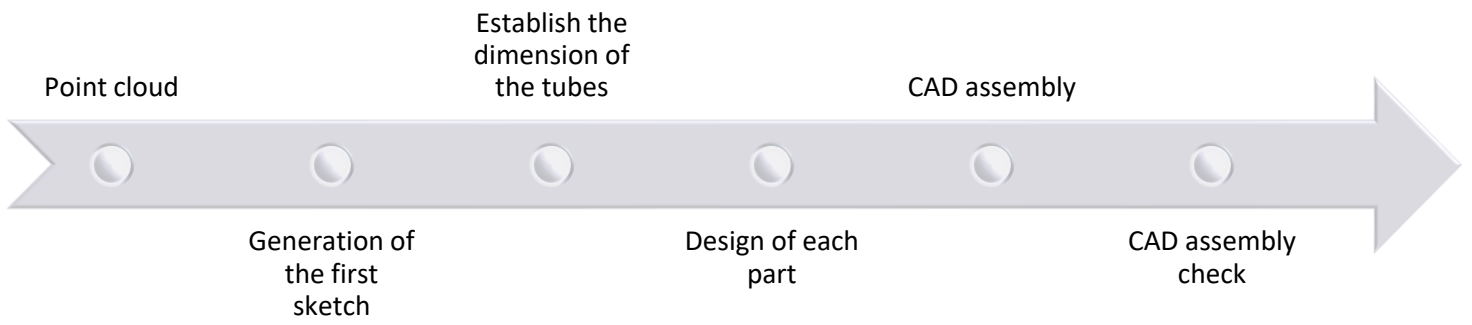


Figura 2: General CAD design process

Once the design of the model has been completed, the model is composed of the following parts shown in Ilustración 10: Designed frame components.

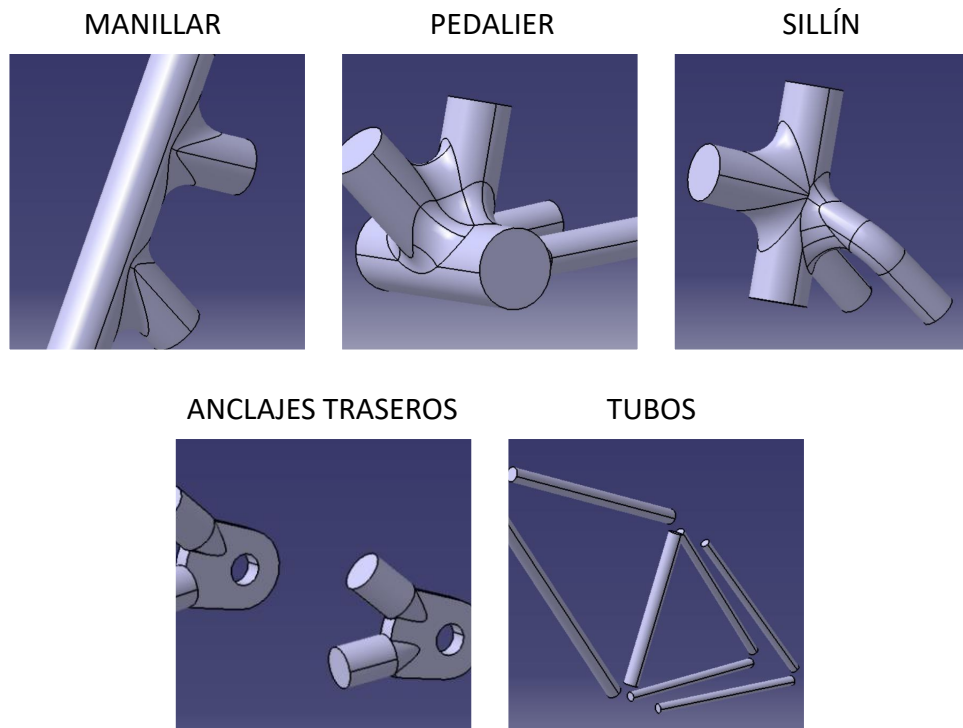


Ilustración 10: Designed frame components

The final assembly in Ilustración 11.

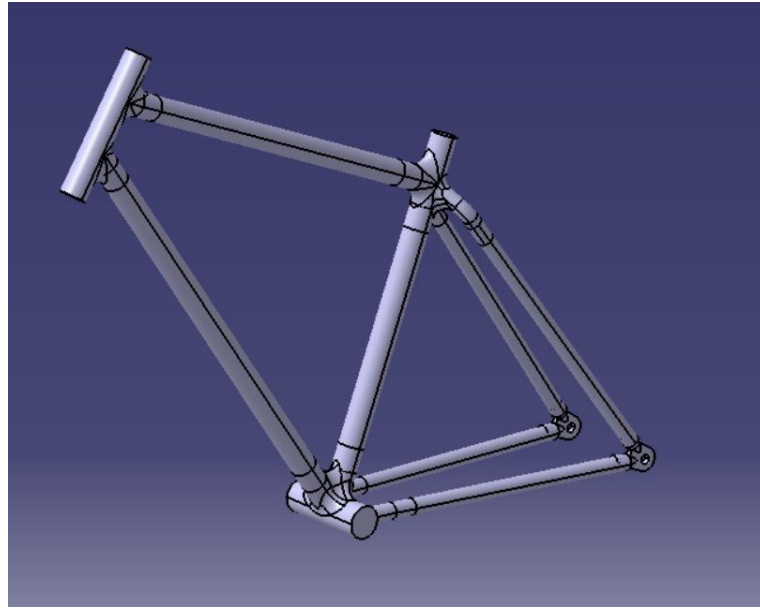
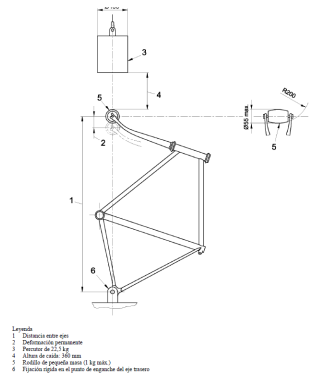
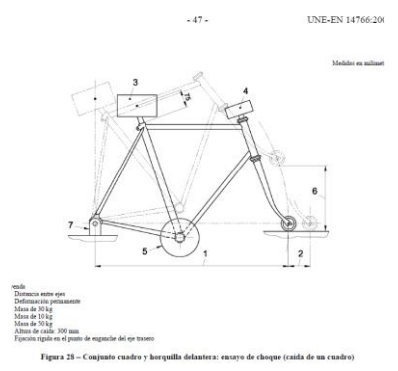


Ilustración 11: Bicycle frame final assembly

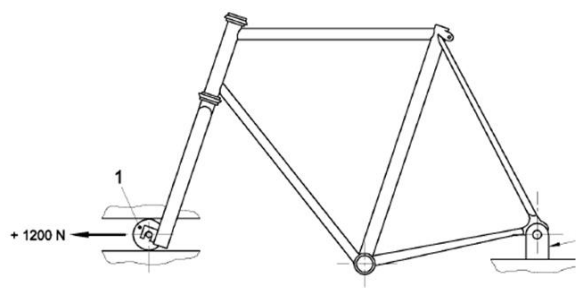
Mass drop test



Frame drop test

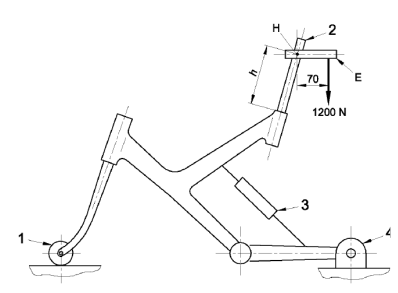


Horizontal forces test



...ido que puede girar libremente
...votante rígida para el punto de fijación del eje trasero

Vertical forces test



...bremente
...squeda o unión rígida para vainas pivotantes para el punto de fijación del eje trasero

Ilustración 12: Test scheme of the UNE-EN ISO 4210-6 (2015) standard.

A fifth test, which is not in the standard, is also carried out in order to test the frame in a more extreme situation and to find weak points. This test simulates the loads to which the frame could be subjected during pedaling on a slope. The stress diagram of this test is shown in Ilustración 13.

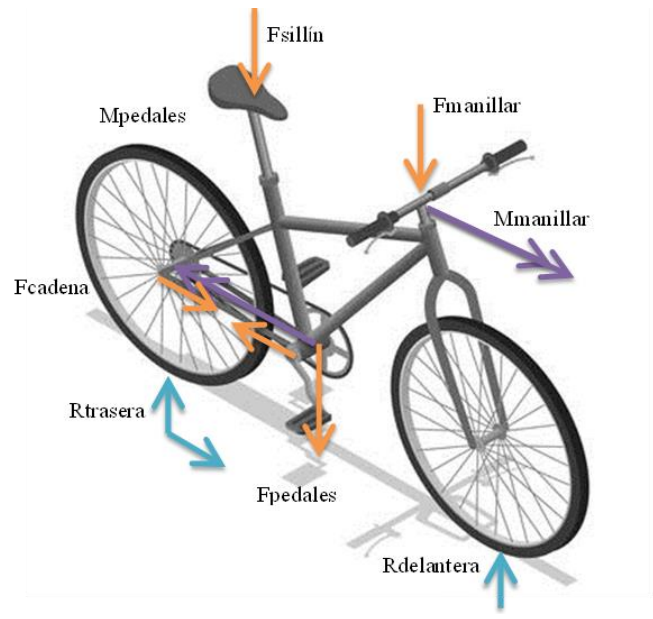


Ilustración 13: Forces diagram for pedaling test

After the CAD design, simulations are carried out following the specifications of the abovementioned standard in order to validate the carbon fiber laminate proposal. The diagrams corresponding to each of the tests are shown in Ilustración 12.

For this purpose, ANSYS Workbench, a multiphysics CAE simulation software for finite element analysis and simulation (FEA), was used. All the simulations and tests of the frame have been carried out with this software to validate the design. The following modules have been used within ANSYS.

- ACP (Pre)
- Static structural
- Explicit dynamics
- Modal
- Harmonic response

3. Materials and failure criteria

After successive iterations, the laminate proposal that has met the requirements is the one presented in Tabla 7: Final laminate structure Tabla 7.

Tabla 7: Final laminate structure

MANILLAR, SILLÍN Y PEDALIER				
Capa	Tipo	Grosor	Ángulo	Espesor total
1	WOVEN [3]	0.3	0	2.8
2	WOVEN [3]	0.3	0	
3	UD [2]	0.2	45	
4	UD [2]	0.2	0	
5	UD [2]	0.2	-45	
6	UD [2]	0.2	0	
7	UD [2]	0.2	0	
8	UD [2]	0.2	-45	
9	UD [2]	0.2	0	
10	UD [2]	0.2	45	
11	WOVEN [3]	0.3	0	
12	WOVEN [3]	0.3	0	

The tubes are 32x26 and 20x16 mm commercial tubes.

The validation of the lamination of the carbon fiber prepreps is based on the results of the failure criteria for composite materials, specifically the Maximum Stress, Tsai-Hill and Tsai-Wu criteria. The safety factor is analyzed as a validation requirement looking for a result greater than 1.5.

4. Results

4.1. Mass drop test

In this test, a 22.5 kg striker is dropped onto the frame from a height of 360 mm. The results obtained are shown in Ilustración 14.

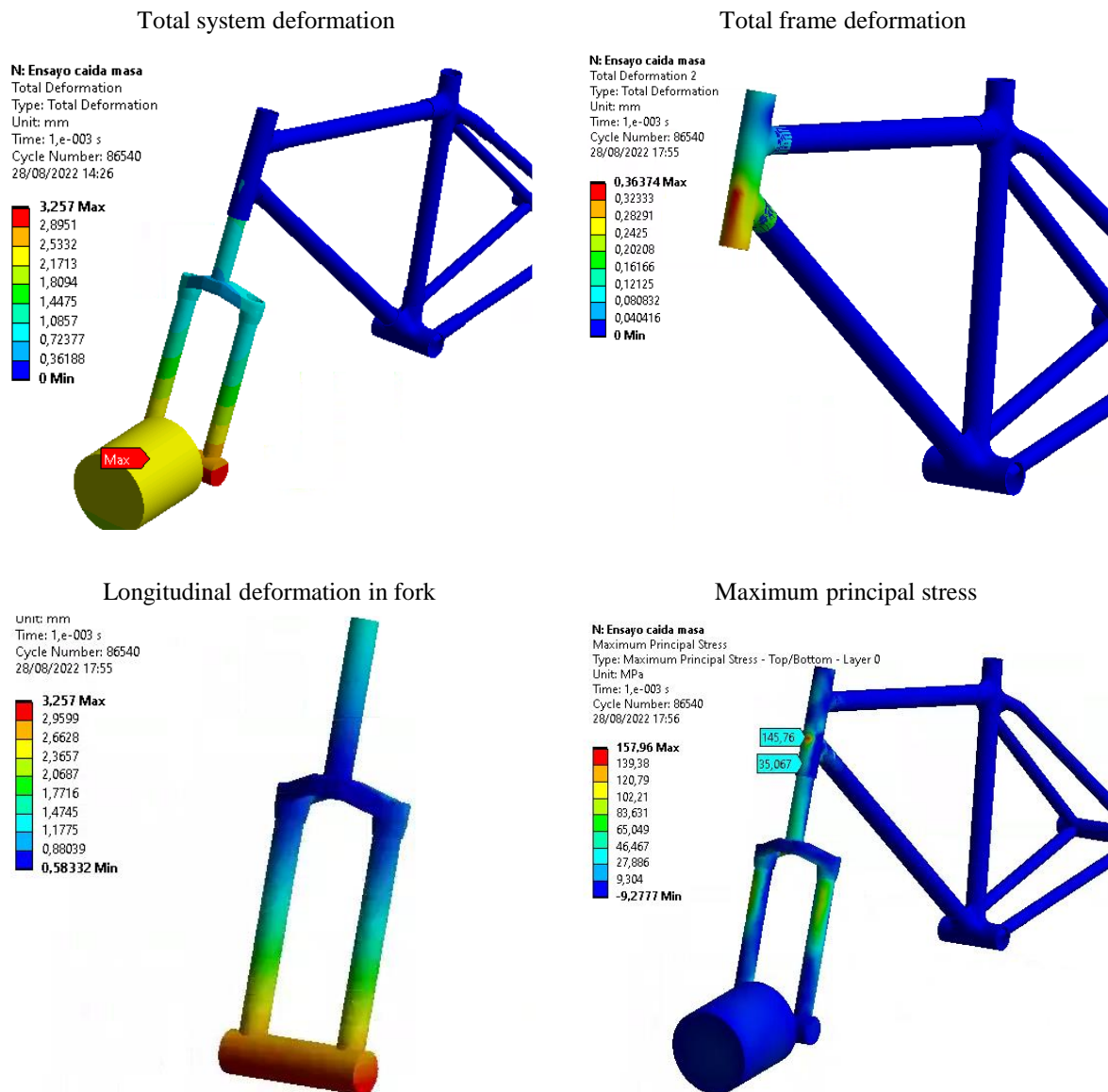


Ilustración 14: Mass drop test results

It can be observed that the deformation produced in the frame is very low and, therefore, the frame after this test should not present any crack and/or breakage. Also, the maximum stresses produced in the frame are lower than the properties of the composite material in terms of tensile strength.

The deformation for the simulated time is a maximum of 3.2 mm in the X direction, so the distance between axes after the test would not reach the 10 mm limit established for permanent deformation in the standard.

In conclusion, the design meets all the requirements, so the layer stacking is optimal for this test.

4.2. Frame drop test

This test simulates the consequences of dropping the frame from a height of 300 mm with only the rear axle displacement fixed, thus allowing it to rotate. The results are shown in Ilustración 15.

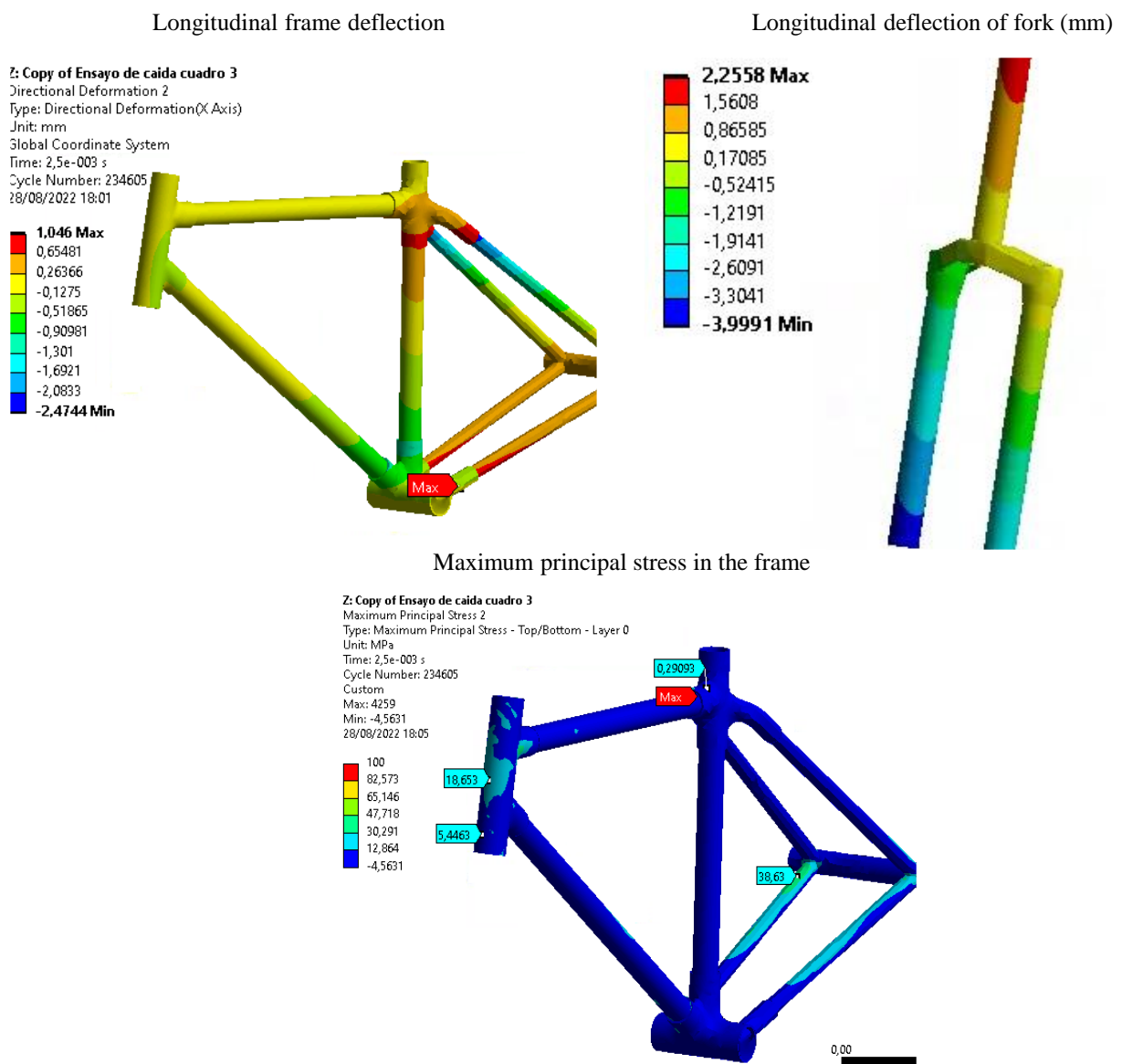


Ilustración 15: Frame drop test results

Based on the results the longitudinal deformation of the frame for the simulation time is 2.25 mm in the fork, so the requirement of the maximum allowable deflection of the deflection

after the test is met. On the other hand, the maximum principal stresses suffered in the frame are not high enough to result in breakage or cracking of the frame.

4.3. Test with horizontal forces

For this test, a horizontal force of 1200N is exerted in the opposite direction to the frame at the bottom of the fork. The results obtained are shown in Ilustración 16.

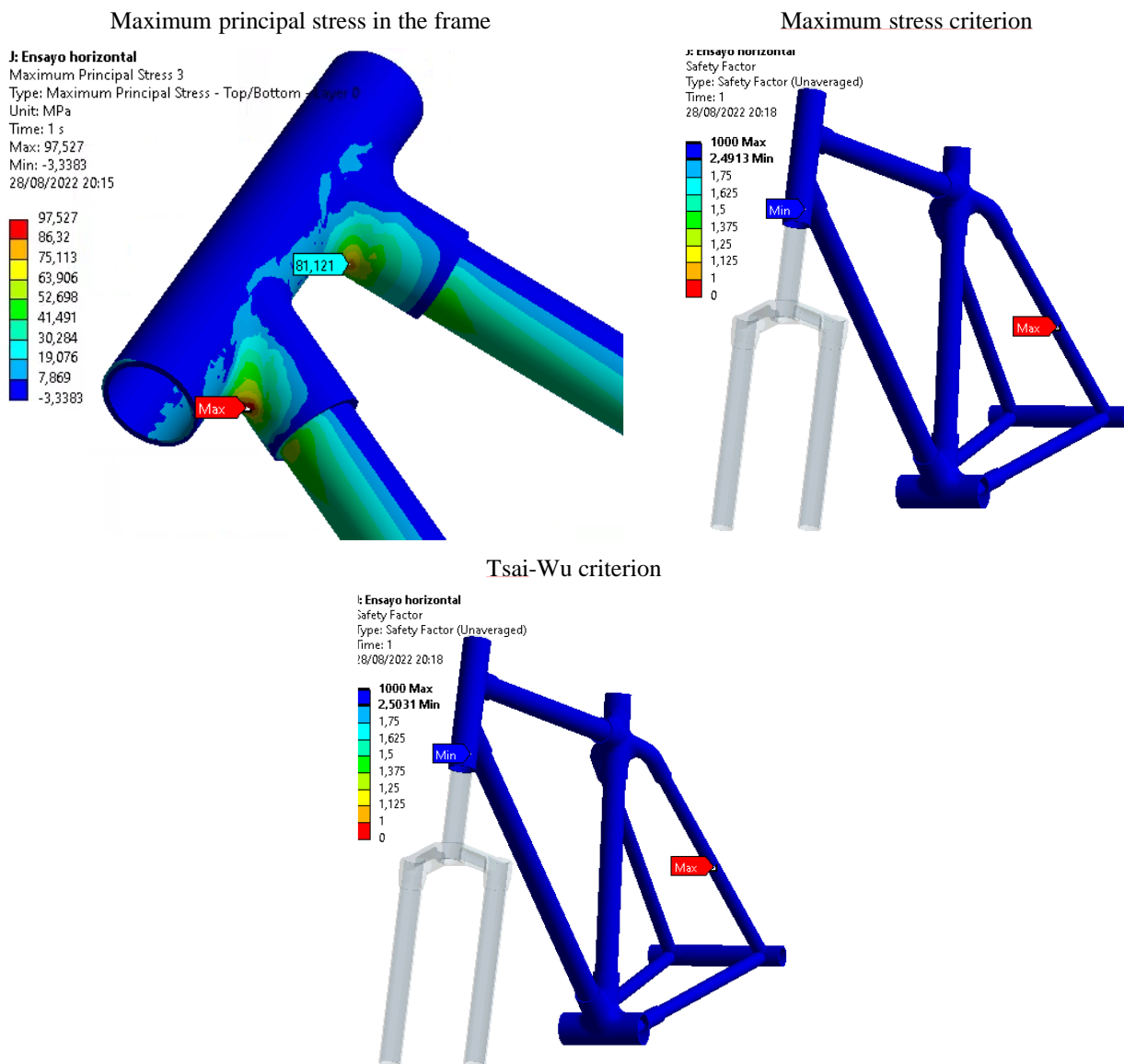


Ilustración 16: Test result with horizontal forces

Observing the previous images, in none of the cases there are failures in the composite material with safety factors well above the one established as conformity criterion.

By consulting the results, the maximum deflection could not reach in any case the limit established by the standard. Likewise, the stress results are well below the limits of the composite material used

4.4. Test with vertical forces

For this test, a vertical force of 1200N is exerted in the opposite direction to the frame at the top of the saddle. The results obtained are shown in Ilustración 17.

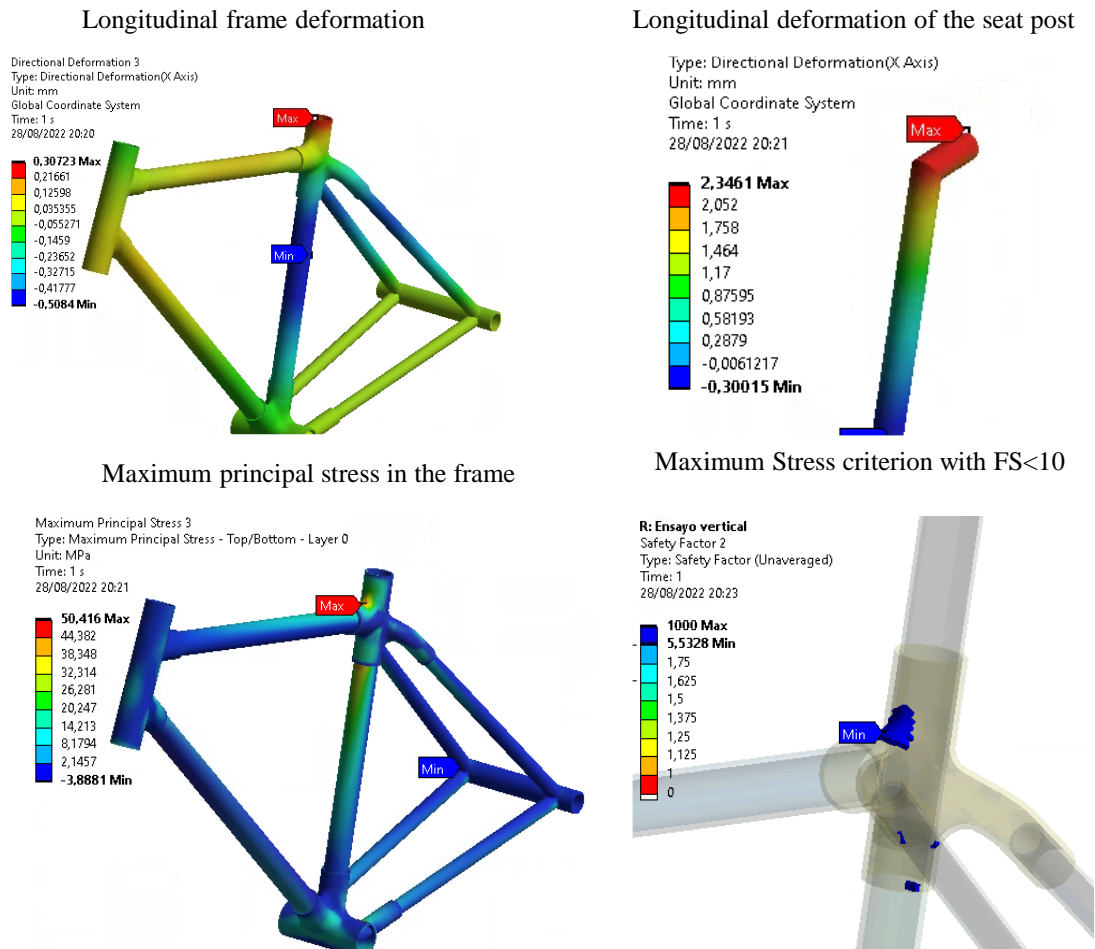


Ilustración 17: Test results with vertical forces

After analyzing the results, the stress state of the frame after the test is below the limits of the composite material. Also, the results of the different failure criteria give very high safety factors which means that the risk of any failure in the composite material is minimal.

Regarding the second requirement, the results of deformation in the seat post are lower than the limit required to pass the test.

4.5. Pedaling test

For this test, a series of forces and moments are exerted on the frame representing the stress diagram during a situation of pedaling on a slope. The results obtained are shown in Ilustración 18.

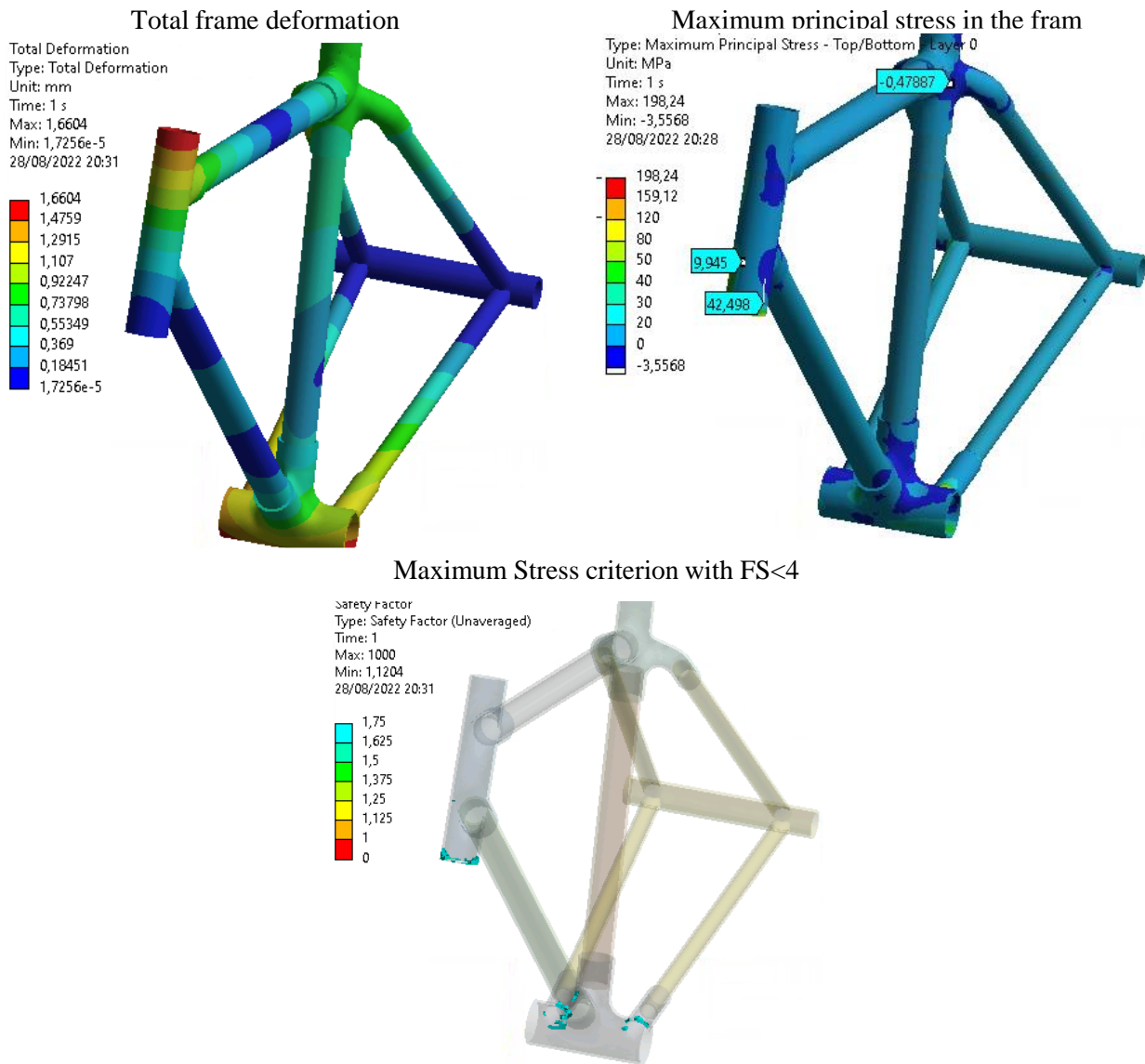


Ilustración 18: Results of pedaling test

It can be observed that the stress levels produced in the table are not very high; in general, these values are around 35 Mpa, except for the points closest to the zones where boundary conditions are imposed.

Regarding the failure criterion, it can be observed that the elements with safety factors lower than 2 are those located in areas where boundary conditions are applied assuming critical points. In the rest of the frame, the safety factors are sufficiently high to ensure no breakage or cracking in the frame.

After analyzing the results, both the frame design and the proposed lamination of the carbon fiber prepregs and the choice of commercial carbon fiber tubes are validated.

5. Conclusions

After this study and analysis work, it has been possible to obtain a frame model whose design is justified and reasoned from the structural point of view, passing the tests specified by the standard for bicycle frames.

Tabla 8 summarizes all safety factor results for each test.

Tabla 8: Final safety factor values for all tests

	Minimum safety factor	Average safety factor
Mass drop test	16.4	-
Frame drop test	3.6	-
Horizontal forces test	2,5	119,5 (medio)
Vertical forces test	5,5	167,8(medio)
Pedaling test (*)	1,1	69,1 (medio)

(*) This test is not included in the standard [5].

Reviewing the objectives set at the beginning, once the project has been completed, it can be stated that all of them have been achieved.

- **Objective 1.** It has been successfully achieved to develop a design process based on a good analysis and study of the results.
- **Objective 2.** After learning how to use the ACP module of ANSYS for the analysis of composite materials, the difficulties of testing models with composite materials have been understood.
- **Objective 3.** The use of tools and software such as ANSYS and Matlab has been improved.
- **Objective 4.** As already introduced before, during the project different problems and difficulties have been overcome, finally achieving analyzable results and with a successful outcome for the final model of the frame.

From this project it is possible and intended to carry out the materialization of the frame in composite material, based on the manufacturing method described at the beginning. This

project, under the title *Manufacturing process of a carbon fiber bicycle frame* [4], has been consolidated, successfully achieving a usable carbon fiber frame.

6. References

- [1] VTC401 Mechanical properties - Prepreg Carbono-Epoxi VTC401-UD300-T700-24K-37%RW-300P. CastroComposites.
- [2] VTC401 Mechanical properties - Prepreg Carbono-Epoxi MTC510-UD300-HS-33%RW (SHD0373-300P). CastroComposites.
- [3] VTC401 Mechanical properties - Prepreg Carbono-Epoxi VTC401-C200T-T300-2X2T-3K-42%RW. CastroComposites.
- [4] Trabajo de Fin de Máster de Ingeniería Industrial - Proceso de fabricación de un cuadro de bicicleta en fibra de carbono, Alejandra Basurco Hernández de Santamaría.
- [5] Norma española UNE-EN ISO 4210-6 (2015) Ciclos. Requisitos de seguridad para bicicletas.
- [6] Clipcarbono Tubos 32x26. <https://www.clipcarbono.com/>
- [7] Clipcarbono Tubos 20x16. <https://www.clipcarbono.com/>

Índice de la memoria

Capítulo 1. Introducción	9
1.1 Introducción a nuevos materiales	9
1.2 Motivación del proyecto.....	10
Capítulo 2. Estado de la Cuestión	11
2.1 Materiales	11
2.2 Métodos de fabricación	13
Capítulo 3. Definición del Trabajo	22
3.1 Justificación.....	22
3.2 Objetivos	22
3.3 Metodología.....	22
3.4 Recursos a emplear.....	23
3.5 Alineación con los Objetivos de Desarrollo sostenible	24
3.6 Planificación.....	25
Capítulo 4. Desarrollo del proyecto	28
4.1 Diseño del cuadro	28
4.1.1 Planteamiento de la fabricación.....	28
4.1.2 Diseño CAD.....	29
4.2 Preparación del modelo	37
4.2.1 Materiales.....	37
4.2.2 Preparación de la geometría.....	42
4.2.3 Descripción de los ensayos de análisis estructural.....	45
4.2.4 Estudio preliminar de cargas y esfuerzos.....	60
4.3 Ejecución de ensayos.....	64
4.3.1 Análisis de resultados.....	64
4.3.2 Primera iteración	66
4.3.3 Iteración final	72
4.4 Análisis de vibraciones.....	91
4.4.1 Análisis de datos y armónico.....	93
Capítulo 5. Conclusiones y Trabajos Futuros.....	99

<i>Capítulo 6. Bibliografía.....</i>	<i>100</i>
<i>Capítulo 7. Anexos.....</i>	<i>101</i>
7.1 Planos del cuadro y componentes.....	101

Índice de ilustraciones

Ilustración 1: Componentes del cuadro diseñados	7
Ilustración 2: Conjunto final del cuadro de bicicleta.....	8
Ilustración 3: Esquema de ensayos de la norma UNE-EN ISO 4210-6 (2015) [5].....	9
Ilustración 4: Esquema de esfuerzos del ensayo a pedaleo en pendiente	10
Ilustración 5: Resultados del ensayo de caída de masa	13
Ilustración 6: Resultados del ensayo de caída del cuadro	15
Ilustración 7: Resultado del ensayo con fuerzas horizontales	17
Ilustración 8: Resultados del ensayo con fuerzas verticales.....	18
Ilustración 9: Resultados del ensayo de pedaleo en pendiente	19
Ilustración 10: Designed frame components	23
Ilustración 11: Bicycle frame final assembly	24
Ilustración 12: Test scheme of the UNE-EN ISO 4210-6 (2015) standard.	25
Ilustración 13: Forces diagram for pedaling test	25
Ilustración 14: Mass drop test results	27
Ilustración 15: Frame drop test results	28
Ilustración 16: Test result with horizontal forces	29
Ilustración 17: Test results with vertical forces.....	30
Ilustración 18: Results of pedaling test.....	31
Ilustración 19: Montaje de la bicicleta por Colnago.....	14
Ilustración 20: Recorte de patrones bien manualmente o de forma digital	15
Ilustración 21: Proceso de aplicación de los preimpregnados.....	16
Ilustración 22: Remanentes de fibra y resina tras la curado	17
Ilustración 23: Preparación del cuadro para accesorios y otros componentes	17
Ilustración 24: Herramienta de sujeción del cuadro durante el pegado.....	18
Ilustración 25: Proceso de fabricación de un cuadro en fibra de carbono.....	18
Ilustración 26: Proceso mediante impresión 3D en material con fibra de carbono.....	19
Ilustración 27: Filamento de policarbonato con fibra de carbono	20
Ilustración 28: Proceso de fabricación planteado	29

Ilustración 29: Medidas del cuadro (mm).....	30
Ilustración 30: Proceso de diseño	31
Ilustración 31: Diseño de los tubos que forman el cuadro	32
Ilustración 32: Casquillo pedalier. [8]Casquillo pedalier. https://www.hibike.es/Rodamiento/casquillo pedalier	32
Ilustración 33. Diseño del conjunto del pedalier	33
Ilustración 34: Juegos de dirección [9].....	34
Ilustración 35: Juego Dirección Bicicleta 1"1/8 Base Externa Ahead EC34/28.6 EC34/30 [10]	34
Ilustración 36: Diseño del conjunto del manillar.....	35
Ilustración 37: Diseño del conjunto del sillín.....	36
Ilustración 38: Diseño de los anclajes traseros.....	36
Ilustración 39: Diseño general del cuadro	37
Ilustración 40: Dimensiones de las probetas de la norma (BS EN ISO 527:2012) [13]	41
Ilustración 41: Ejemplo de fusión de superficies.....	42
Ilustración 42: Definición de los sistemas de coordenadas	43
Ilustración 43: Named selections y Element Sets definidos y generados	43
Ilustración 44:Definición de materiales y tejidos en ACP	44
Ilustración 45: Definición de los rosettes	44
Ilustración 46: Definición de los Oriented Selection Sets.....	45
Ilustración 47: Definición de las capas a partir de los Modeling Groups.....	45
Ilustración 48: Explicación del ensayo de caída de masa sobre el cuadro	47
Ilustración 49: Alturas modificables según tipo de bicicleta [11].....	47
Ilustración 50: Condiciones de contorno del Ensayo 1- Caída de masa.....	48
Ilustración 51: Explicación del ensayo caída del cuadro.....	49
Ilustración 52: Condiciones de contorno Ensayo 2- Caída del cuadro.....	51
Ilustración 53: Explicación del ensayo con fuerzas horizontales	52
Ilustración 54: Condiciones de contorno del Ensayo 2- Caída del cuadro.....	53
Ilustración 55: Explicación del ensayo con fuerzas verticales	54
Ilustración 56: Condiciones de contorno Ensayo fuerzas horizontales	54

Ilustración 57: Esquema de fuerzas en el caso de ensayo de pedaleo en pendiente.....	55
Ilustración 58: Esquema de fuerzas sobre el cuadro en ensayo pedaleo en pendiente	56
Ilustración 59: Demostración de lo sucedido en una situación real	59
Ilustración 60: Ejemplo de movimientos del ciclista durante el pedaleo	59
Ilustración 61: Condiciones de contorno Ensayo pedaleo en pendiente	60
Ilustración 62: Resultado de las tensiones principales en forma vectorial	61
Ilustración 63: Detalle de las direcciones de las tensiones principales en la zona del pedaliar	62
Ilustración 64: Detalle de las direcciones de las tensiones principales en la zona del manillar	62
Ilustración 65: Detalle de las direcciones de las tensiones principales en la zona del sillín	63
Ilustración 66: Resultado tensional de un ensayo de pedaleo	63
Ilustración 67: Resultado de deformación de un ensayo de pedaleo.....	64
Ilustración 68: Max stress criterion con $FS < 2$	68
Ilustración 69: Max stress criterion con $FS < 10$	69
Ilustración 70: Resultado máxima tensión principal - Ensayo pedaleo en pendiente	70
Ilustración 71: Tsai-Hill criterion con $FS < 2$	70
Ilustración 72: Max stress criterion con $FS < 2$	71
Ilustración 73: Tipos de fallo con Max stress criterion	71
Ilustración 74: Resultado de deformación total - Ensayo caída masa	74
Ilustración 75: Resultado de deformación total en el cuadro - Ensayo caída masa.....	75
Ilustración 76: Resultado de deformación en dirección X en la horquilla- Ensayo caída masa	75
Ilustración 77: Resultado de máxima tensión principal general- Ensayo caída masa.....	76
Ilustración 78: Resultado de deformación direccional en X - Ensayo caída del cuadro	77
Ilustración 79: Resultado de deformación direccional en X - Ensayo caída del cuadro	77
Ilustración 80: Resultado de máxima tensión principal general- Ensayo caída del cuadro	78
Ilustración 81: Resultado de máxima tensión principal general- Ensayo 3 Fuerzas horizontales.....	79

Ilustración 82: Resultado de máxima tensión principal en el cuadro - Ensayo 3 Fuerzas horizontales.....	79
Ilustración 83: Maximum stress criterion.....	80
Ilustración 84: Tsai-Wu criterion	80
Ilustración 85: Tsai-Hill criterion.....	81
Ilustración 86: Indicación de la deformación analizada en el ensayo	81
Ilustración 87: Resultado de deformación en dirección X en la horquilla- Ensayo fuerzas horizontales.....	82
Ilustración 88: Resultado de deformación en dirección X en el cuadro- Ensayo fuerzas horizontales.....	82
Ilustración 89: Resultado de deformación en dirección X en el cuadro- Ensayo fuerzas verticales.....	83
Ilustración 90: Resultado de deformación en dirección X en la tija- Ensayo fuerzas verticales	84
Ilustración 91: Resultado de máxima tensión principal en el cuadro- Ensayo fuerzas verticales.....	84
Ilustración 92: Max stress criterion con $FS < 10$	85
Ilustración 93: Indicación flecha	85
Ilustración 94: Resultado de deformación total - Ensayo pedaleo en pendiente.....	86
Ilustración 95: Resultado de máxima tensión principal - Ensayo pedaleo en pendiente.....	87
Ilustración 96: Resultado frictional stress Ensayo Pedaleo en Pendiente	87
Ilustración 97: Max stress Criterion	88
Ilustración 98: Max stress criterion con $FS < 4$	88
Ilustración 99: Detalle tipo de fallo para resultados de $FS < 2$	89
Ilustración 100: Fallos según el criterio de fallo Maximum Stress	89
Ilustración 101: Tsai-Hill criterion.....	90
Ilustración 102: Tsai-Wu criterion	90
Ilustración 103: Modo 1 a 97Hz con alta participación en el eje Y	92
Ilustración 104: Modo 4 a 287Hz con alta participación en el eje X	93
Ilustración 105: Modo 8 a 417Hz con alta participación en el eje Z.....	93

Ilustración 106: Datos recogidos en campo.....	94
Ilustración 107: Datos recogidos por carretera.....	94
Ilustración 108: Respuesta en frecuencia de los datos de campo	95
Ilustración 109: Resultado en frecuencia de los datos de carretera.....	95
Ilustración 110: PSD datos de campo.....	96
Ilustración 111: PSD datos de carretera	96
Ilustración 112: Resultado tensional con PSD de datos de campo.....	97
Ilustración 113: Resultado deformación con PSD de datos de campo	97
Ilustración 114: Resultado tensional con PSD de datos de carretera	98
Ilustración 115: Resultado deformación con PSD de datos de carretera.....	98

Índice de tablas

Tabla 1: Estructura de laminado final.....	11
Tabla 2: Propiedades del material VTC401-C200T-T300-2X2T-3K-42%RW [3].....	11
Tabla 3: Propiedades del material VTC401-UD100-12K-T700-40%RW-300 [1]	12
Tabla 4: Factor de seguridad del ensayo de caída de masa	14
Tabla 5: Factor de seguridad ensayo caída del cuadro	16
Tabla 6: Resumen de los resultados de los factores de seguridad de todos los ensayos	20
Tabla 7: Final laminate structure	26
Tabla 8: Final safety factor values for all tests.....	32
Tabla 9: Planificación.....	26
Tabla 10: Medidas del casquillo del pedalier	33
Tabla 11: Propiedades del material VTC401-C200T-T300-2X2T-3K-42%RW	39
Tabla 12: Propiedades del material VTC401-UD100-12K-T700-40%RW-300.....	40
Tabla 13: Alturas de caída y distribución de las masas en la tija del sillín, la parte superior del tubo de eje de horquilla y la caja del pedalier. [11].....	50
Tabla 14: Cálculos de fuerzas y momentos en ensayo de pedaleo en pendiente.....	57
Tabla 15: Datos iniciales para ensayo de pedaleo en pendiente.....	58
Tabla 16: Evaluación de tipos de fallo según el criterio [14].....	66
Tabla 17: Estructura de capas primera iteración	67
Tabla 18: Estructura de capas última iteración.....	73
Tabla 19: Modos y frecuencias del cuadro.....	91
Tabla 20: Resumen de las masas modales, las energías cinéticas y las masas efectivas traslacionales	92

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

Este proyecto abarca el desarrollo y uso de diferentes herramientas y áreas para completar el diseño y análisis de un cuadro de bicicleta en material compuesto como la fibra de carbono. Para ello, han sido necesarios recursos de ingeniería y conocimientos de gestión de proyectos, los cuales han permitido desarrollar diseñar, analizar y validar el diseño planteado.

Es un proyecto completo que permite mostrar y dar a conocer más sobre nuevas tecnologías y materiales que están en auge debido a sus mejores propiedades tanto mecánicas como físicas.

Asimismo, este proyecto aplica la innovación al plantear un nuevo método de fabricación, el cual permite aunar nuevas y diferentes tecnologías como es la fabricación aditiva y nuevos materiales de impresión con los materiales compuestos, permitiendo su desarrollo en pequeña escala y a nivel individual.

Este proyecto me ha permitido desarrollar y mejorar mis habilidades de organización, planificación y gestión de proyectos; así como a emplear los conocimientos técnicos adquiridos en un proyecto real pudiendo aplicar mi criterio de diseño y de validación.

1.1 INTRODUCCIÓN A NUEVOS MATERIALES

En los últimos años, la reducción de peso es un objetivo para todos los medios de transporte. El principal impacto del aligeramiento se refleja en el consumo de combustible y las emisiones de CO₂, un tema muy actual en nuestra sociedad. Las grandes ciudades están adaptando sus infraestructuras para permitir la circulación de vehículos no contaminantes como bicicletas, patinetes eléctricos, patinetes...etc.

Las bicicletas son vehículos de propulsión humana en los que una diferencia de peso tiene un gran impacto en su rendimiento por lo que se están introduciendo en el diseño del cuadro de la bicicleta nuevos materiales desarrollados por las industrias de vanguardia como la aeroespacial y la automovilística.

Con el fin de la reducción de peso, la búsqueda por el uso de otros materiales más ligeros se hizo patente hace unos años, haciendo uso del aluminio o el titanio, por ejemplo. Aun así, otros materiales no metálicos se están introduciendo en el mercado de la bicicleta. Hoy en día la fibra de carbono va consolidándose poco a poco a medida que el conocimiento y los procesos de fabricación se van desarrollando y a la vez abaratando. La fibra de carbono es

un material compuesto cuya mayor ventaja es su baja densidad y su alta resistencia mecánica y al impacto.

1.2 MOTIVACIÓN DEL PROYECTO

Históricamente, los avances tecnológicos han estado muy ligados al descubrimiento y desarrollo de nuevos materiales. Las nuevas tecnologías exigen constantemente mejoras continuas en el rendimiento de los materiales y deben ser capaces de asegurar su integridad a lo largo de su vida útil.

Por ejemplo, los materiales compuestos que son ya comunes en sectores como automóviles, transporte aéreo y deportes, se utilizan principalmente en aplicaciones estructurales destinadas a la reducción de peso, como en la industria aeroespacial. Esto se debe a que las propiedades mecánicas específicas son extremadamente superiores a las de las aleaciones de metales convencionales como el aluminio y el acero. Además, los materiales compuestos no se ven afectados fácilmente por la corrosión y la fatiga.

Un peso más ligero significa un menor consumo de combustible, menores costes operativos y una mejor protección ambiental. Todas estas razones brindan un excelente impulso para el desarrollo de futuros compuestos y procesos de fabricación.

De hecho, la UE establece como objetivo para el año 2030 una reducción progresiva de, al menos, un 55% menos de emisiones de gases de efecto invernadero en comparación con 1990. Gran responsabilidad reside en aligerar los sistemas a partir de la utilización de estructuras y materiales como la fibra de carbono. Sin embargo, el reciclaje de materiales como la fibra de vidrio o carbono es complicado y caro, lo que está dando entrada al uso de materiales biodegradables.

Conjuntamente, las últimas décadas han sido decisivas para la maduración de esta tecnología permitiendo reducir sus costes y la complejidad de su fabricación. Es por ello por lo que este trabajo permite explorar la técnica del diseño de una estructura utilizando materiales cuyo comportamiento mecánico es diferente a los que estamos acostumbrados.

Capítulo 2. ESTADO DE LA CUESTIÓN

2.1 MATERIALES

A lo largo de los años el material de fabricación para los cuadros de las bicicletas ha ido variando en función de las necesidades que han ido apareciendo, cada vez más exigentes en sus características. Los materiales que se han ido empleando y se siguen utilizando en la actualidad son los siguientes:

Acero

El acero es un material ampliamente utilizado como material de construcción, piezas de maquinaria, sector naval; sin embargo, su uso en el sector del transporte terrestre está decreciendo debido a sus propiedades específicas (densidad). Hoy en día las bicicletas fabricadas en acero suponen las más baratas. Anteriormente, era el material más usado en este ámbito; no obstante, la introducción del aluminio disminuyó su utilización hasta que deje de utilizarse en un futuro no tan lejano.

Se trata de un material fácil de trabajar, de gran duración, si está protegido con postratamientos como por ejemplo anti-oxidación, y además es un material económico.

Aluminio

El uso del aluminio prevalece en sectores como el químico, ferroviario y automovilístico gracias a su ligereza, aunque también empieza a ser sustituido por el uso de materiales compuestos. Hoy en día es el material más usado y el más abundante en bicicletas de gama media. Hay dos tipos de aluminio utilizados para cuadros de bicicleta: los de la serie 6000 y los de la serie 7000, específicamente 6061 y 7005. En comparación con el acero el aluminio presenta una densidad tres veces inferior al acero y una buena resistencia mecánica para este ámbito. Sus propiedades se resumen en:

- Ligereza, para uso estructural es uno de los más ligeros peso específico de 2,7 g/cm³).
- Resistencia mecánica: sus buenas propiedades mecánicas se obtienen a partir de aleaciones con otros materiales, como el zinc, silicio, cobre, manganeso...
- Ductilidad: densidad y puntos de fusión bajos. Su ductilidad permite que los productos de aluminio se fabriquen en una fase muy próxima al diseño final del producto.
- Resistente a la corrosión.

Titanio

El titanio es un elemento metálico con unas propiedades únicas de resistencia, baja densidad (peso específico es de 4,5 g/cm³), excelente fatiga, resistencia a la corrosión, siendo de este modo un material ideal para crear cuadros de bicicleta. El titanio es uno de los materiales más abundantes en la tierra, pero lo que hace que este sea tan caro es la dificultad de producirlo y procesarlo. El titanio presenta elevada resistencia a la fatiga, así como al impacto.

Fibra de carbono

Los materiales compuestos se caracterizan por estar formados por dos o más materiales los cuales muestran diferencias físicas y químicas significativas, están combinados con diferentes proporciones y permanecen separados dentro de la estructura terminada, lo que los diferencia de las aleaciones.

Los materiales constituyentes se conocen como matriz y refuerzo. El material de la matriz dentro de un compuesto se suele utilizar para sostener el material de refuerzo en un compuesto; además, proporciona protección frente a ataques químicos o daños mecánicos (desgaste), proporciona estabilidad mecánica y reduce la propagación de grietas. El refuerzo provee una mayor rigidez y propiedades estructurales, propiedades de impacto y fractura, y propiedades eléctricas. El resultado es un compuesto cuyas propiedades finales se obtienen por la ley de mezclas, una ponderación con los volúmenes de fibra y matriz. Sin embargo, a pesar de la interacción entre los dos materiales constitutivos, permanecen separados dentro de la mezcla acabada debido a sus diferencias químicas y físicas. En este caso, la matriz es polimérica y está formada por una resina termoestable, el epoxi y el refuerzo por fibras de carbono.

Entre las propiedades de los polímeros se encuentran:

- Las moléculas que lo forman están compuestas de monómeros repetidos.
- Presentan enlaces covalentes y enlaces débiles.
- Se pueden conseguir interesantes propiedades mecánicas como viscoelasticidad, baja fricción y buena resistencia química y a la radiación.

Por el contrario, muestra niveles bajos de resistencia, módulo de Young y dureza.

Las matrices poliméricas se dividen en resinas termoestables y termoplásticas. La principal característica que los diferencia es que los termoplásticos permiten que se vuelvan a fundir

y solidificarse; sin embargo, las resinas termoestables no. Por otro lado, las resinas termoestables son frágiles y rígidas con una mayor resistencia eléctrica, química y térmica. Las resinas termoplásticas son más dúctiles, pero con menor rigidez y resistencia mecánica.

Volviendo al material compuesto, la fibra de carbono es un tejido muy resistente mecánicamente, duradero, flexible. Se comercializa en forma de telas o fieltros. Sus principales características son su resistencia, rigidez, su aspecto elegante y su peso liviano, siendo superadas por pocos materiales.

Puede ser hasta cinco veces más resistente que el acero y más ligero que el aluminio; posee una estructura cristalina microscópica única ya que se compone principalmente de átomos de carbono que están enlazados juntos en cristales microscópicos alineados y paralelos al eje largo de las fibras.

De manera general, los materiales compuestos presentan ortotropía, cuyas propiedades mecánicas son diferentes en cada uno de los ejes ortogonales entre sí, lo que hace que su análisis y estudio sea diferente a los metales.

Por último, los diferentes diseños pueden ser optimizados a partir de la orientación de diferentes capas de tejidos y láminas, lo que no es posible con los materiales isótropos.

Uno de los inconvenientes que de momento acompañan a este tipo de materiales es su dificultad de fabricación y los altos costes de material y fabricación.

También mencionar la fibra de vidrio por su extendido uso debido a su bajo coste y la validez de sus propiedades para la mayor parte de aplicaciones. En casi de requerir propiedades excelentes se recurre a la fibra de carbono.

2.2 MÉTODOS DE FABRICACIÓN

En esta sección se recogen diferentes métodos de fabricación que funcionan hoy en día y que han servido de base para la ejecución de este proyecto.

La empresa de diseño y fabricación de bicicletas Colnago, utiliza un método de fabricación a partir de tubos de fibra de carbono que son unidos entre sí a partir de piezas de unión modeladas con preimpregnados en fibra de carbono y un adhesivo epoxy.

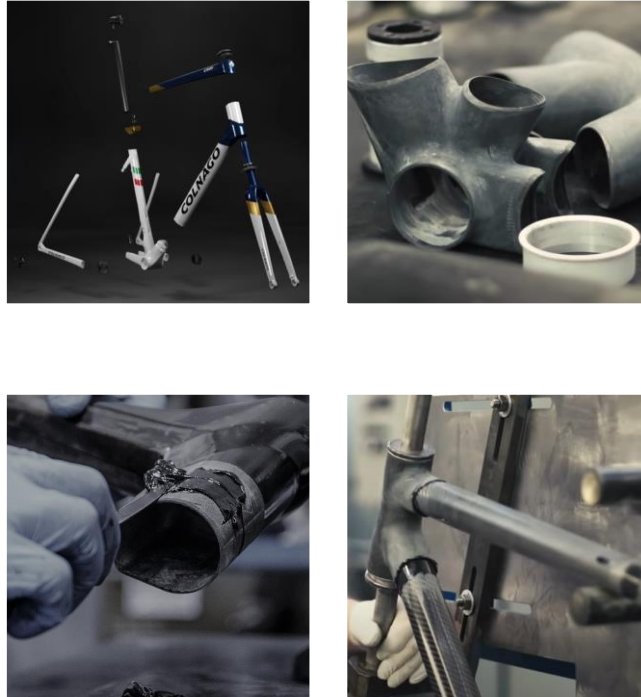


Ilustración 19: Montaje de la bicicleta por Colnago

Por otro lado, la empresa LOOK Cycle presenta el siguiente proceso de producción para un cuadro en fibra de carbono.

El primer paso para comenzar con la fabricación es el diseño y construcción de los moldes de aluminio monocasco que servirán de base para moldear las láminas de preimpregnado. Un vez el molde está listo, se procede a la preparación del material que conformará el cuadro.

Del rollo de preimpregnado se recortan todos los patrones que se van a utilizar para moldear el cuadro. Muchos de los procesos realizan este paso con un plotter CNC para maximizar el tiempo y la plancha de preimpregnado, disminuyendo el desperdicio. En otras ocasiones, estos patrones se recortan manualmente.

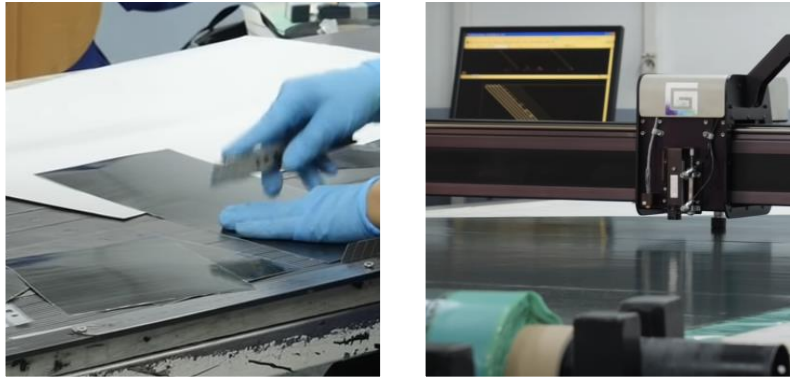


Ilustración 20: Recorte de patrones bien manualmente o de forma digital

Una vez se tienen todos los patrones recortados, se procede a colocarlos uno tras otro manteniendo un control estricto del orden y dirección de las fibras. Para ello, se tiene el molde monocasco en aluminio, el cual es el negativo de la geometría el cuadro real. Los patrones de preimpregnado se envuelven en bolsas de vacío de vacío y a su vez se inserta en el molde de aluminio.

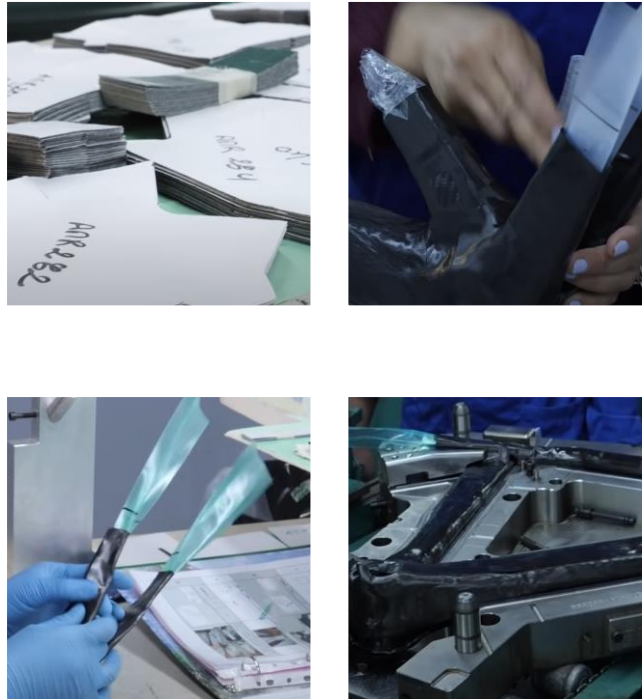


Ilustración 21: Proceso de aplicación de los preimpregnados

La horquilla y las vainas traseras son las únicas piezas que se montan por separado. Luego, se envía el cuadro a una prensa térmica donde se introduce presión de 2 a 10 bares durante un periodo de tiempo a unos 170 grados de temperatura. De esta manera las bolsas de vacío se inflan en el interior contra las paredes del molde generando la forma del cuadro y a su vez empieza a curar el preimpregnado. La temperatura y el tiempo depende mucho del tipo de preimpregnado y los procesos de curado que llevan consigo. Así la resina fluye por todo el cuadro, se evitan arrugas y se suprime todo el aire que pueda quedar entre las capas.

Antes de sacar el cuadro del molde se deja enfriar durante un periodo de tiempo. Una vez se saca del molde se elimina cualquier sobrante de resina que pueda haber. Ahora el cuadro se mete en autoclaves para terminar de curar la resina y quitar cualquier resto de aire o humedad en el cuadro.



Ilustración 22: Remanentes de fibra y resina tras la curado

El siguiente paso es empezar a preparar el cuadro para su montaje. Para ello hay que lijarlo y suprimir todos los restantes de fibras además de las bolsas de presión en el interior. Además, se realizan taladros y agujeros en aquellos sitios en los que es necesario añadir accesorios como los cables de marchas o de los frenos.



Ilustración 23: Preparación del cuadro para accesorios y otros componentes

Más tarde se preparan las superficies para pegar las vainas traseras al cuadro. Se realiza utilizando un epoxy especial entre materiales compuestos. Para llevar el pegado se coloca el cuadro en una herramienta que permite sujetar todas las piezas en su sitio para que el cuadro cure en la posición correcta. Por último, llega el proceso de acabado y terminación donde se realiza el lijado de las superficies y se quitan todas las imperfecciones antes de realizar una primera capa de imprimación, y más tarde poder aplicar la pintura.



Ilustración 24: Herramienta de sujeción del cuadro durante el pegado

Existen más fabricantes que lleva a cabo el mismo proceso. A continuación, se presentan imágenes de otro procesos similares.

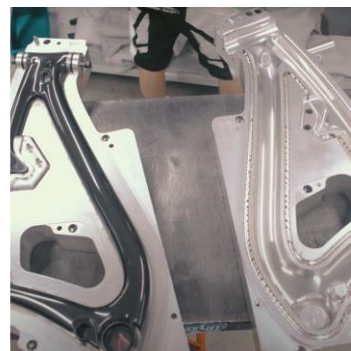


Ilustración 25: Proceso de fabricación de un cuadro en fibra de carbono

Todos estos procesos llevados a cabo por grandes empresas, emplean una construcción monocasco donde los tubos y las uniones están moldeados como una sola pieza. Definitivamente es la forma más usada y rentable de hacerlo a gran escala. Sin embargo, requiere una gran inversión en herramientas y equipos y en conseguir trabajadores con cualificación en el uso de fibra de carbono.

Existen otros métodos que permiten realizar prototipos de cuadros. A continuación, se resumen procesos más simples y económicos de ejecutar, pero cuyo acabado no es tan preciso al igual que sus prestaciones.

1. Una de las opciones es mediante la fabricación aditiva y el uso de un material que contiene fibra de carbono. El método consiste en la fabricación del cuadro por partes consiguiendo las partes de unión mediante la impresión 3D y ensamblar el conjunto con adhesivo.

El material de impresión es el filamento CARBON X CF-PC.

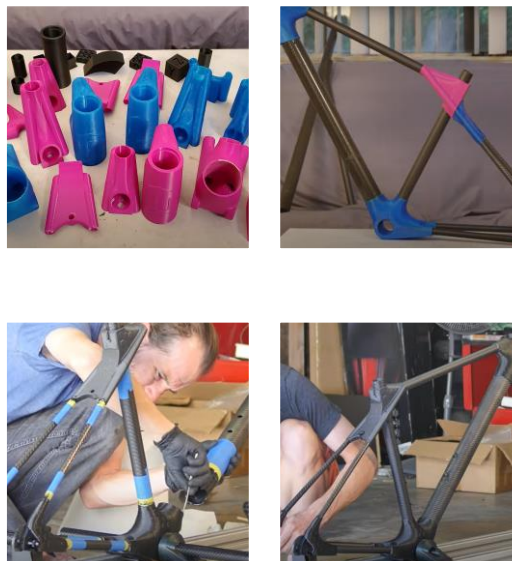


Ilustración 26: Proceso mediante impresión 3D en material con fibra de carbono

El filamento CarbonX exPC CF se fabrica con la base de policarbonato, fácil de imprimir, reforzada con < 20 % de fibra de carbono.

El policarbonato es un polímero termoplástico amorfo con un acabado transparente. Se caracteriza por su durabilidad (gran resistencia al impacto) y termorresistencia, y

es fácil de procesar por moldeo o termoformado. Además, presenta una buena resistencia a la llama y a los aceites, grasas y disolventes.

El PC también soporta temperaturas de aproximadamente 100 °C sin deformarse. En la actualidad, el PC tiene una amplia gama de aplicaciones en el ámbito doméstico, industrial y arquitectónico. Se utiliza con mucha frecuencia para fabricar productos electrónicos y relacionados con la electricidad, envases de alimentos, juguetes, equipos de oficina, marcos de cristal o productos de ingeniería.

En la impresión 3D, el PC se utiliza mucho para producir plásticos resistentes y duraderos con un punto de fusión elevado. Hay que tener en cuenta que el PC es más difícil de imprimir en 3D que el PLA o el ABS debido a los problemas comunes de adhesión del lecho, Warping y absorción de humedad.

Con el fin de preparar el filamento para la tarea para la que está diseñado, a menudo se enriquece con fibras de carbono o fibras de vidrio. La fibra de carbono (CF) garantiza la rigidez y la estabilidad dimensional, lo que reduce considerablemente el riesgo de Warping.

Todas estas características hacen que los filamentos reforzados con CF sean adecuados para la industria de la automoción (alta resistencia a la tracción y módulo, alta tolerancia a la temperatura y baja expansión térmica) y la industria aeroespacial (reducción del peso hasta un 50 % con conservación de la funcionalidad).



Ilustración 27: Filamento de policarbonato con fibra de carbono

2. Otra opción es la de usar un molde interior en un material blando y ligero en el cual aplicar todas las láminas de preimpregnado. En este caso, el molde sigue estando

presente tras la finalización, quedándose dentro del cuadro una vez terminado. El material del molde puede ser de poliestireno o similar. El problema de este método es que una vez finalizado el proceso de laminado el preimpregnado debe curarse a altas temperaturas, para lo cual se necesita un horno de las dimensiones del cuadro.

Capítulo 3. DEFINICIÓN DEL TRABAJO

3.1 JUSTIFICACIÓN

A la vista del capítulo anterior, el motivo de la realización de este proyecto es conseguir argumentar analíticamente un diseño que está pensado para su posterior fabricación. El proceso de fabricación planteado, es un método diferente, el cual sigue la filosofía de muchos otros métodos, pero que hace uso de todos los beneficios que tiene un cuadro de fibra de carbono profesional utilizando las herramientas de un laboratorio de universidad.

Para ello, es necesario el uso y aprendizaje de herramientas especiales como es, por ejemplo, módulos de ANSYS como ACP para la aplicación de materiales compuestos.

3.2 OBJETIVOS

De manera general, el proyecto que se presenta es el proceso, diseño y posible (según viabilidad técnica) fabricación de un cuadro de bicicleta en fibra de carbono.

De manera específica, entre los objetivos se encuentran:

Objetivo 1. Desarrollar todo el proceso que conlleva un proyecto de diseño de un producto, en este caso un cuadro para bicicleta.

Objetivo 2. Entender y conocer las complejidades del uso de materiales compuestos en procesos de diseño.

Objetivo 3. Aumentar y mejorar los conocimientos sobre el uso de programas de simulación por elementos finitos y software de diseño CAD.

Objetivo 4. Resolver diferentes problemas que surjan a lo largo del desarrollo del proyecto como, por ejemplo, problemas en elección de modelos, problemas de planificación de tiempos, en caso de fabricación, problema con el acopio de material...

3.3 METODOLOGÍA

Se describe en este apartado el procedimiento desarrollado para finalmente describir las conclusiones que se van a presentar en la memoria.

Para empezar, la naturaleza del proyecto es cualitativa, es decir, el trabajo se basa en realizar un estudio, diseño y posterior desarrollo de un proyecto técnico. Para ello, el método se basa en :

- Revisión bibliográfica: investigar acerca del tema en cuestión, y buscar sobre diferentes medios, libros, internet, universidad, etc.
Para este caso, lo más importante es informarse acerca de los diferentes métodos de fabricación utilizados.
- Especificación de los objetivos y tarea: Aclarar los objetivos que se persiguen tanto a largo alcance como a corto alcance; es decir, para cada hito del proceso de diseño establecer cuáles son los objetivos que se buscan conseguir o cumplir.
- Diseño: Una vez organizadas las ideas y los parámetros de diseño, se procede a desarrollar los diferentes modelos e iteraciones para conseguir un diseño que cumpla con todas las funcionalidades y requisitos. Esta etapa está formada a su vez por los siguientes fases:
 - Concepto: Desarrollar y definir diseños de forma de acuerdo con criterios técnicos y económicos.
 - Arreglo preliminar: Optimizar y completar los diseños de forma. Verificar si hay errores y comenzar con el desarrollo de la documentación.
 - Arreglo definitivo: Finalizar los detalles y terminar con la documentación.
- Uso de diferentes recursos: Utilizar programas informáticos que ayuden a justificar o incluso llegar a las soluciones que se quieren presentar al problema. En este caso, se utiliza SolidWorks, para realizar los diseños CAD, ANSYS, como programa para llevar a cabo las simulaciones de elementos finitos.

3.4 RECURSOS A EMPLEAR

Para la realización de este proyecto se ha hecho uso de los siguientes programas:

- CATIA: software de diseño CAD para el diseño del CAD del cuadro.
- ANSYS Workbench: Software de simulación CAE multifísico para análisis y simulación por elementos finitos (FEA). Se han realizado con este software todos las simulaciones y ensayos del cuadro para validar el diseño. Dentro de ANSYS se han utilizado los siguientes módulos.
 - ACP (Pre)
 - Static structural

- Explicit dynamics
 - Modal
 - Harmonic response
-
- Matlab: plataforma de cálculo numérico. Se ha utilizado para el cálculo y obtención de la respuesta en frecuencia de los datos obtenidos en las mediciones vibratorias.
 - SolidWorks: software CAD como ayuda para el diseño de varias piezas.

3.5 ALINEACIÓN CON LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE

El fin es intentar identificar los ODS que más afectados se ven por el proyecto llevado a cabo y qué metas cumple dentro de ese objetivo.



El cambio climático afecta a todos los países produciendo un impacto negativo en su economía, la vida de las personas y las comunidades. El objetivo es llevar a cabo soluciones que permitan tener una actividad económica más sostenible y respetuosa con el medio ambiente.

En esta dirección, el sector automovilístico está haciendo un gran esfuerzo en desarrollar y encontrar nuevos materiales que impliquen una reducción de peso, solución la cual tiene un impacto directo sobre la emisión de gases contaminantes a la atmosfera. Si bien es cierto que, en este caso, una bicicleta no genera emisiones, este proyecto se centra en el uso de nuevos materiales como la fibra de carbono aplicado a un proyecto realizable e incluso fabricable como es el cuadro de bicicleta.

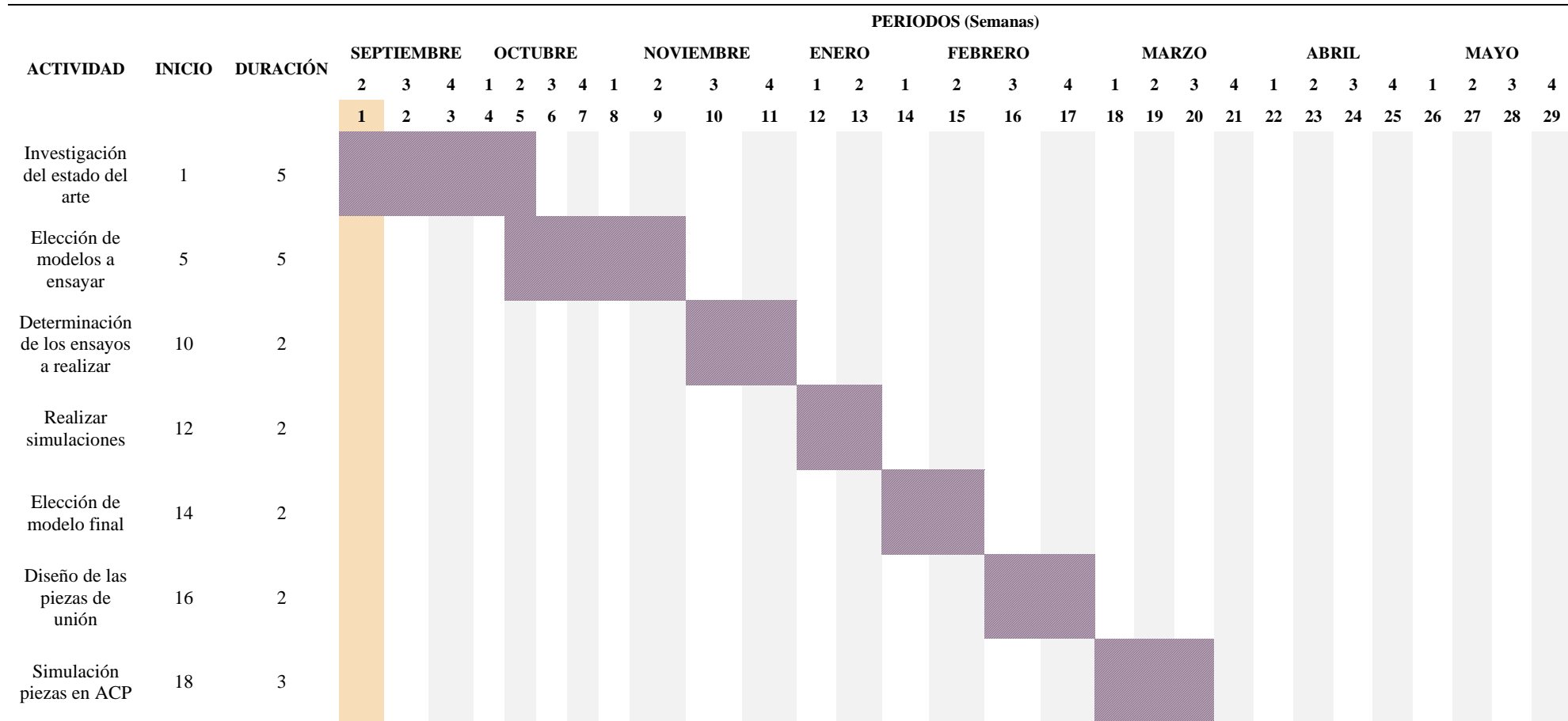


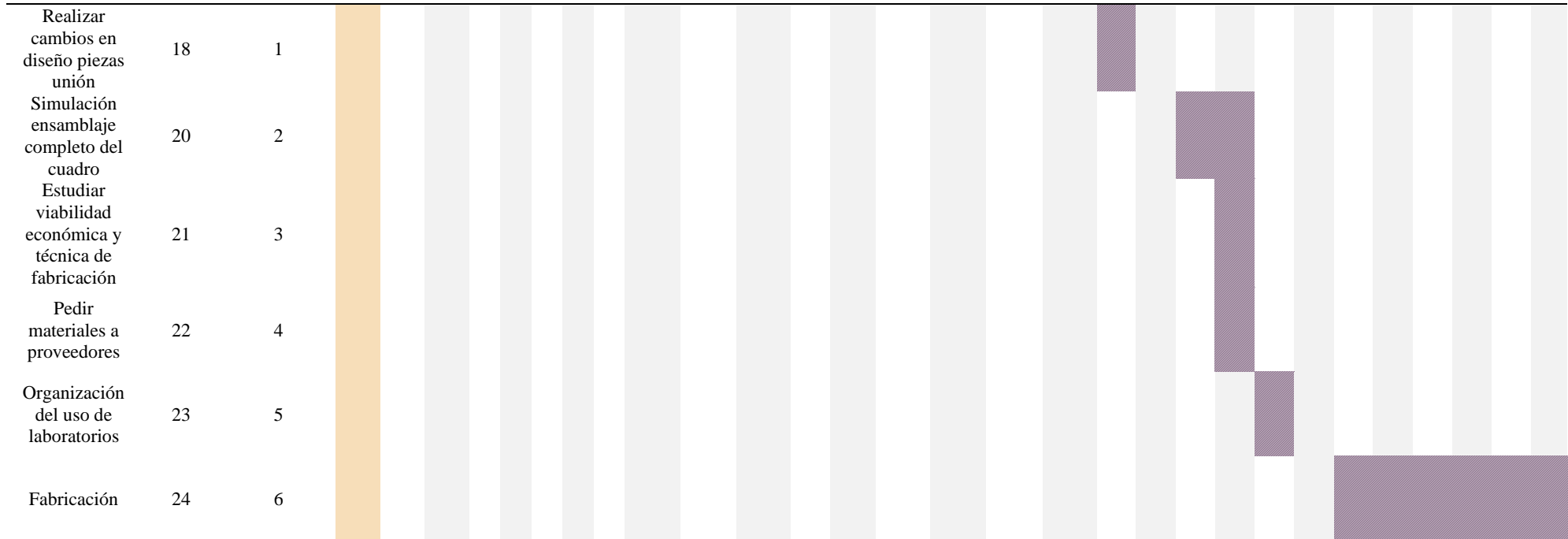
El segundo Objetivo sostenible que está ligado al proyecto es el de industria, innovación e infraestructura. El desarrollo de nuevos materiales con prestaciones superiores a otros materiales permite obtener en diferentes aplicaciones un mayor impacto en ámbitos como son el peso, las emisiones, tiempos de fabricación, durabilidad, reducción en mantenimiento, etc. El apoyo, dedicación y esfuerzo a la innovación e industria permite mejoras que impactan sobre todos nosotros.

3.6 PLANIFICACIÓN

Presentación temporal de las actividades a realizar.

Tabla 9: Planificación





Capítulo 4. DESARROLLO DEL PROYECTO

En este capítulo se describe en profundidad el desarrollo del proyecto. En primer lugar, se detalla el planteamiento del diseño del cuadro; en segundo lugar, se explica el método de análisis para justificar el diseño; y finalmente se estudian y muestran los resultados a los ensayos realizados.

4.1 DISEÑO DEL CUADRO

4.1.1 PLANTEAMIENTO DE LA FABRICACIÓN

Para poder llevar a cabo el proceso de diseño es primordial plantear primero el método de fabricación que se va a realizar.

La introducción del proceso de fabricación se especifica a continuación; sin embargo, el proceso completo y la ejecución, así como todos los detalles serán expuestos en el Trabajo de Fin de Máster de Ingeniería Industrial cuyo título es *Proceso de fabricación de un cuadro de bicicleta en fibra de carbono* [7].

Los métodos habituales de fabricación de cuadros de bicicleta en fibra de carbono se basan en la obtención de un cuadro íntegro a partir de la aplicación de fibras de carbono y resina en un molde entero en aluminio. Posteriormente se aplica vacío para asegurar una buena propagación de la resina entre la fibra y se realiza un proceso de curación en autoclave. El proceso pensado para este diseño sigue este mismo principio. Sin embargo, en este caso no se dispone capacidad técnica ni económica para poder utilizar moldes enteros de aluminio ni estufas que tengan las dimensiones de un cuadro de bicicleta. Por tanto, la propuesta a este inconveniente es la de dividir el cuadro en diferentes partes y empalmarlas a partir de tubos comerciales en fibra de carbono. Debido a que se trata de piezas complejas, no se encuentra la manera de diseñar un molde permanente que permita obtener ese tipo de piezas. Es por ello por lo que se plantea la utilización de la fabricación aditiva y el surgimiento de un nuevo material de impresión soluble en agua. Este método permite imprimir un molde desechable con la forma de la pieza y una vez obtenida, que éste se disuelva en agua.

Por consiguiente, se muestra en la Ilustración 28, el proceso de fabricación planteado para el diseño que se propone en este proyecto.



Ilustración 28: Proceso de fabricación planteado

4.1.2 DISEÑO CAD

Una vez planteado el proceso de fabricación del cuadro se procede al diseño de las diferentes partes que forman un cuadro. Todo el diseño del cuadro se ha realizado con el software de diseño CAD CATIA.

Para comenzar con el diseño se lleva a cabo el siguiente proceso:

1. En primer lugar, se establece la localización de los puntos del cuadro, es decir, se determinan las medidas del cuadro. Para ello, se toman referencias tanto de internet de bicicletas comerciales de montaña como las medidas de mi propia bicicleta que a su vez es de montaña. Por lo cual, se trata de un diseño válido para una persona de altura media (aprox. 175 cm y peso de 80 kg).

Las medidas finales del cuadro se adjuntan en la Ilustración 29.

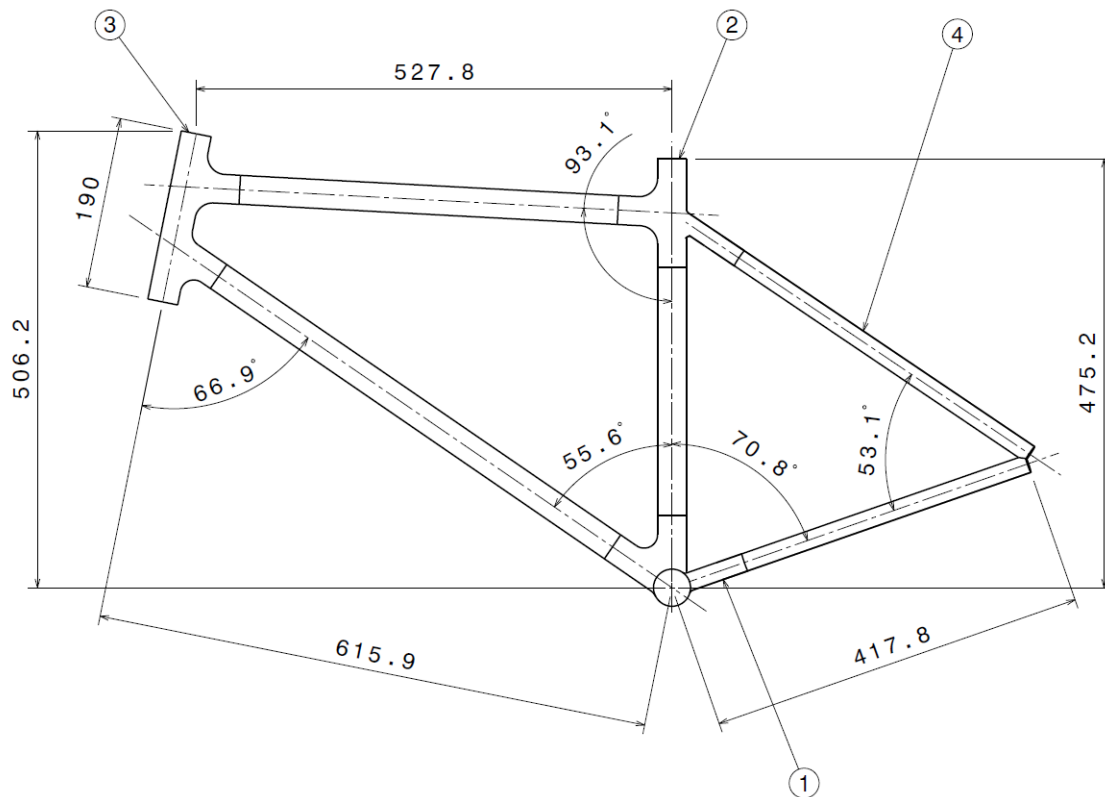


Ilustración 29: Medidas del cuadro (mm)

2. Se lleva a cabo un croquis general que una todos los puntos y sean la base de la estructura que se va a diseñar.
3. Se determinan los diámetros de cada uno de los tubos que van a unir las diferentes piezas. Para ello, se realizan ensayos que intenten obtener los diámetros óptimos de los tubos para su aplicación.
4. Se empieza a diseñar cada pieza por separado teniendo en cuenta el montaje necesario en cada una y el resto de componentes que deberá albergar una vez se ensamble la bicicleta completamente. Es importante tener en cuenta para el diseño que el método de fabricación es la aplicación de capas de fibra de carbono, por lo que se intenta que los radios de acuerdo entre zonas sean lo menos angulares posible.
5. Una vez diseñadas las diferentes partes se realiza el ensamblaje comprobando que cada una de las partes encajan.



Ilustración 30: Proceso de diseño

Estas son las diferentes partes que conforman el cuadro:

▲ Tubos

El cuadro estará formado por seis tubos de diferente longitud y diámetro, los cuales irán unidos mediante los componentes de unión que se presentan a continuación.

Se muestra en la Ilustración 31 los diferentes tubos y sus nombres:

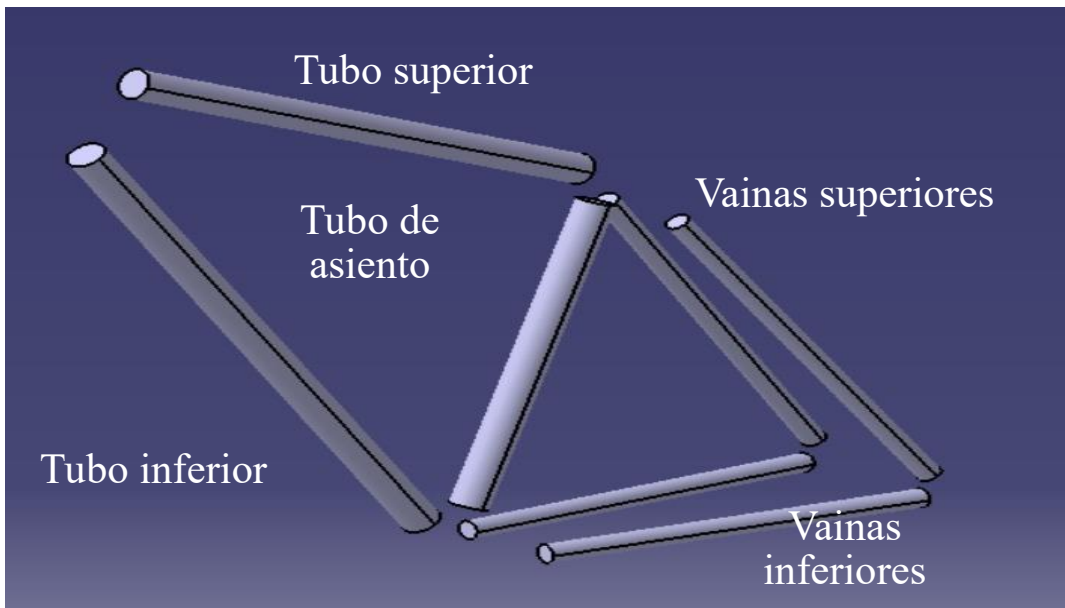


Ilustración 31: Diseño de los tubos que forman el cuadro

▲ Conjunto pedalier

El conjunto pedalier es aquella pieza que permite establecer la unión entre el tubo de asiento, inferior y las vainas inferiores; además de albergar el eje del pedalier.



Ilustración 32: Casquillo pedalier. [8]Casquillo pedalier. <https://www.hibike.es/Rodamiento/casquillo-pedalier>

Para establecer las medidas se toma como base el uso de este casquillo que presenta las medidas mostradas en la Tabla 10.

Tabla 10: Medidas del casquillo del pedalier

Diámetro del eje	28,99 mm
Diámetro de la caja	41 mm
Ancho de la carcasa	121 milímetros

La Ilustración 33 muestra una imagen del diseño final del conjunto del pedalier.

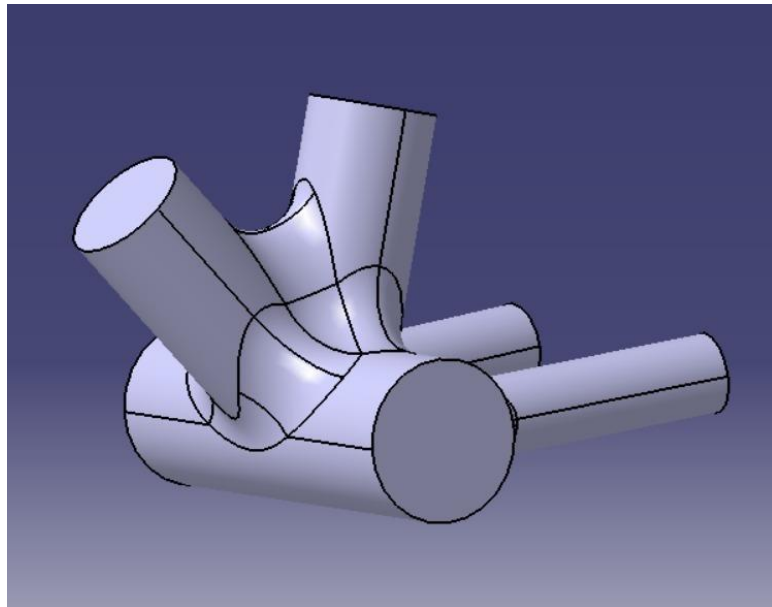


Ilustración 33. Diseño del conjunto del pedalier

▲ Conjunto manillar:

El diseño del manillar se basa en recoger la horquilla, el manillar y los tubos superior e inferior. Para establecer las medidas adecuadas en el manillar se plantea el ensamblaje de la horquilla y el manillar.

Los tubos de dirección de ajuste a presión requieren juegos de dirección que se introducen a presión en el tubo de dirección, y rodamientos que se asientan dentro de esos casquillos.

Existen juegos de dirección ZS (Zero Stack) o juegos de dirección EC (External Cup). Ambas son para tubos de dirección de ajuste a presión, pero son diferentes: la cazoleta externa tiene una altura de pila mucho mayor porque aloja el rodamiento en el exterior del tubo de dirección, mientras que las cazoletas de juego de dirección Zero Stack alojan los rodamientos dentro del tubo de dirección.

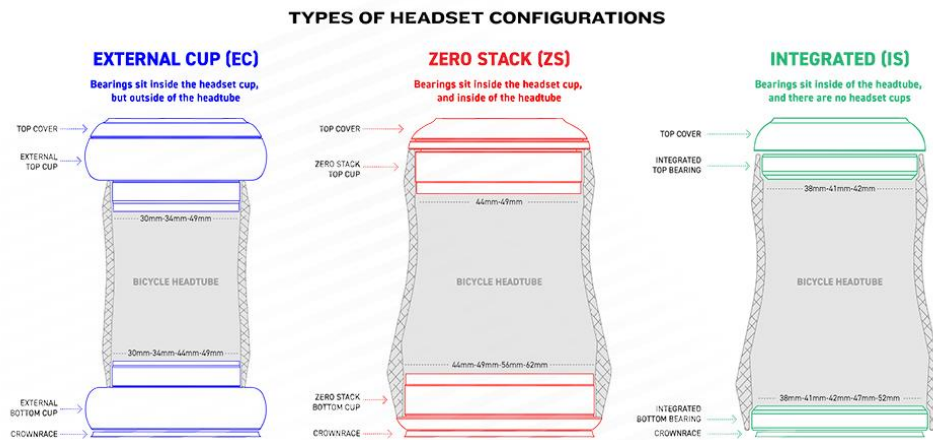


Ilustración 34: Juegos de dirección [9]

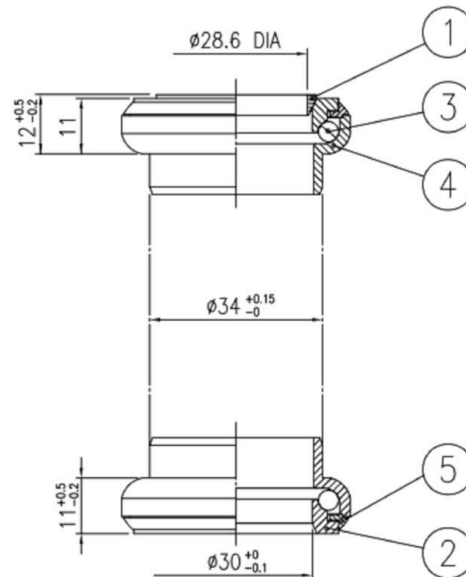


Ilustración 35: Juego Dirección Bicicleta 1"1/8 Base Externa Ahead EC34/28.6 EC34/30 [10]

De manera que el diseño del tubo de dirección se basa en establecer un diámetro de 34mm intentando conseguir una tolerancia de +0.15mm.

El resto de tubos deben alojar a los tubos comerciales que unirán los diferentes nodos. Se muestra en la Ilustración 36 el diseño final del conjunto manillar.

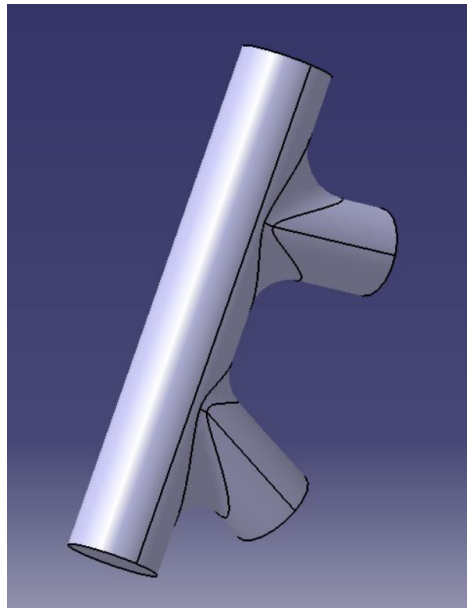


Ilustración 36: Diseño del conjunto del manillar

▲ Conjunto sillín:

El sillín está diseñado para albergar las vainas superiores, el tubo superior, de asiento y la tija del sillín. El tubo del sillín está diseñado para albergar una tija de 31.6mm de diámetro.

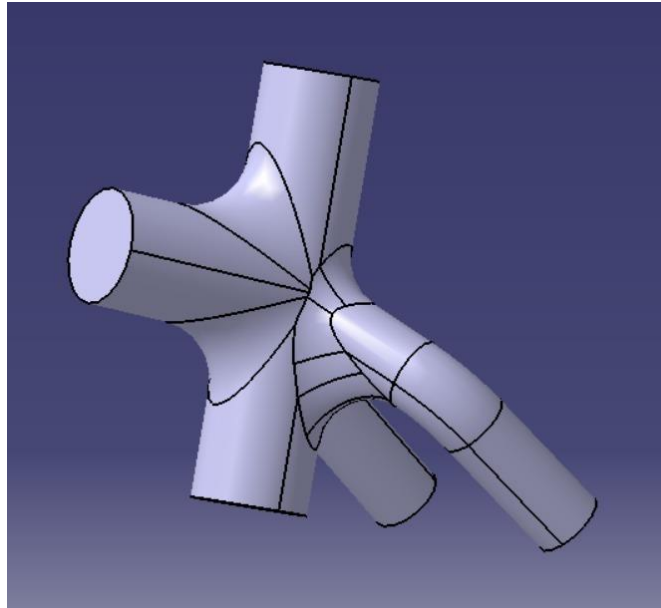


Ilustración 37: Diseño del conjunto del sillín

▲ Anclajes traseros:

Los anclajes traseros están diseñados para recoger el eje trasero y la transmisión.

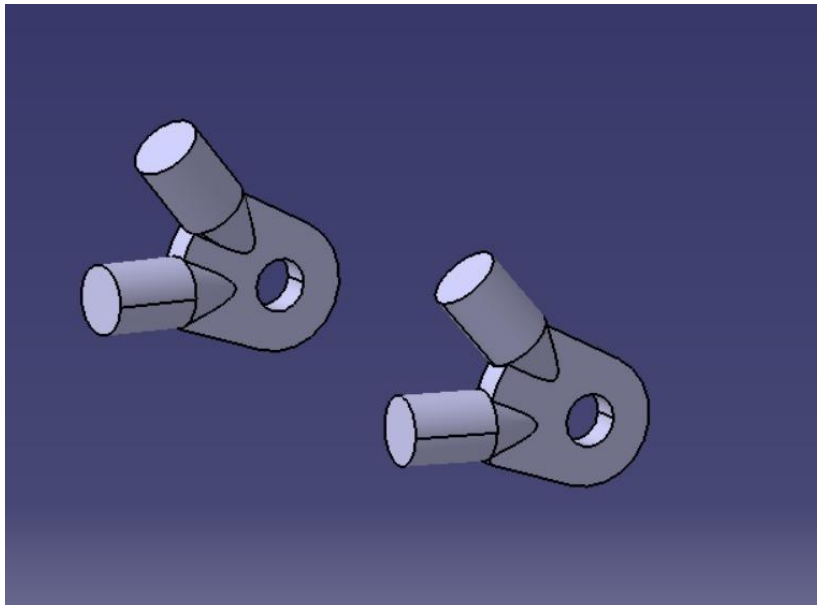


Ilustración 38: Diseño de los anclajes traseros

Una vez diseñados todos los componentes, se procede al ensamblaje completo del cuadro quedando de la siguiente forma:

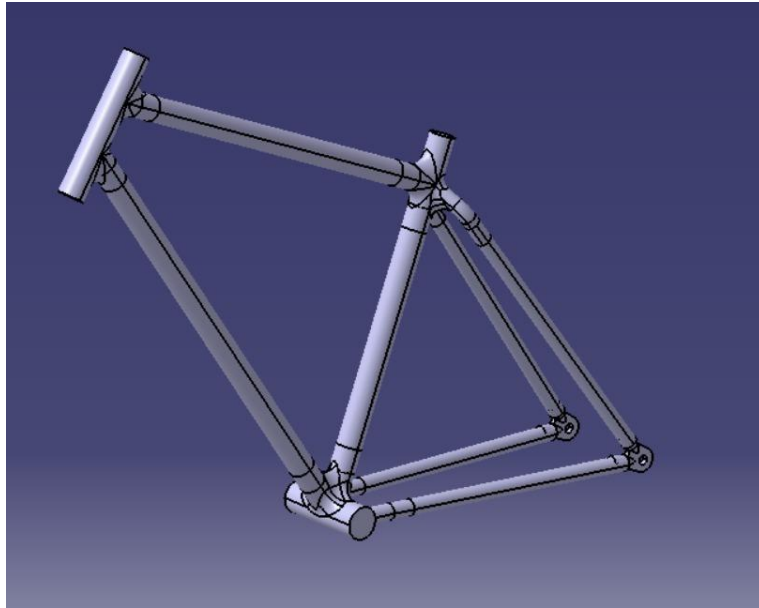


Ilustración 39: Diseño general del cuadro

4.2 PREPARACIÓN DEL MODELO

4.2.1 MATERIALES

El material utilizado para la fabricación del cuadro es fibra de carbono. Según el método de fabricación establecido, los materiales que se necesitan son prepregs de 100% fibra de carbono y tubos comerciales de diferentes diámetros.

El prepreg es un refuerzo de FRP (polímero reforzado con fibras) que está impregnado previamente con una resina. Esta resina, normalmente es una resina epoxi, sin embargo, se pueden usar otros tipos de resina. Los tipos de resina pueden ser termoestables o termoplásticas.

Prepregs termoestables: son los más utilizados usando como resina un epoxi. La resina comienza en estado líquido e impregna completamente el refuerzo de fibra. La resina epoxi se somete a un curado parcial, cambiando el estado de ésta de líquido a sólido. En este estado, llamado “etapa B” la resina está parcialmente curada y pegajosa. En cuanto la resina es sometida a una temperatura elevada, la resina termoestable está ahora completamente reticulada.

Prepregs termoplásticos: las resinas comunes para preimpregnados termoplásticos incluyen PP, PET, PE, PPS y PEEK. Los preimpregnados termoplásticos se pueden proporcionar en cinta unidireccional o en telas tejidas o cosidas.

La principal diferencia entre el preimpregnado termoestable y termoplástico es que los preimpregnados termoplásticos son estables a temperatura ambiente y, en general, no tienen una vida útil. Este es un resultado directo de las diferencias entre las resinas termoestables y termoplásticas [1].

Dependiendo de la fabricación de los prepregs, la matriz y las fibras de carbono utilizadas, las propiedades mecánicas de estos materiales compuestos varían notablemente. Es por ello por lo que es necesario conocer el material que va a ser utilizado para la posterior fabricación.

Los prepregs utilizados son los siguientes:

- ▲ VTC401-C200T-T300-2X2T-3K-42%RW laminates

Se trata de un tejido con fibras a 0 y 90°. El tipo de fibra utilizado es T300 y el epoxi VTC401.

Los datos de las propiedades mecánicas son dadas a partir de diferentes tests realizados sobre el preimpregnado. Las propiedades propias de la matriz correspondientes a las direcciones perpendiculares a la fibra de carbono no son mostradas por el fabricante. Es por ello por lo que se realiza una aproximación de los valores en base a otros ensayos con otros prepregs y otros epoxis.

Tomando como referencia los resultados de las pruebas realizadas al preimpregnado VTC401-UD300-T700-24K-36%RW-600P para obtener las propiedades mecánicas fuera del plano XY, se muestra en la Tabla 11 las propiedades introducidas en ACP Ansys del composite.

Tabla 11: Propiedades del material VTC401-C200T-T300-2X2T-3K-42%RW

Tensile strength	
Dentro del plano	573 MPa
Fuera del plano	34.3 MPa (1)
Tensile modulus	
Dentro del plano	52.7 GPa
Fuera del plano	7.7 GPa (1)
Flexure strength	
Dentro del plano	863 MPa
Fuera del plano	-
Flexure modulus	
Dentro del plano	51.7 GPa
Fuera del plano	-
Poisson's Ratio	
Dentro del plano	0.3
Fuera del plano	0.01 (1)

▲ Prepreg Carbono- Epoxi VTC401-UD100-12K-T700-40%RW-300

Tabla 12: Propiedades del material VTC401-UD100-12K-T700-40%RW-300

Tensile strength	
Dentro del plano	2354 MPa (1)
Fuera del plano	34.3 MPa (1)
Tensile modulus	
Dentro del plano	116 GPa (1)
Fuera del plano	7.7 GPa (1)
Flexure strength	
Dentro del plano	-
Fuera del plano	-
Flexure modulus	
Dentro del plano	-
Fuera del plano	-
Poisson's Ratio	
Dentro del plano	0.3 (1)
Fuera del plano	0.01 (1)

En este caso, tampoco tenemos valores de las propiedades mecánicas en la dirección de las fibras. Debido a que se usa un tipo de fibras T700 en comparación con las T300 no se puede establecer las mismas condiciones que en el tejido anterior. Es por ello por lo que acude al siguiente prepreg: Prepreg Carbono-Epoxi VTC401-UD300-T700-24K-37%RW-300P. Presentan ambos el mismo tipo de epoxi y de fibra de carbono. La única diferencia reside en el número de hilos por arrastre (de 12K (12000) y 24K (24000)).

(1) Todos estos valores que se han introducido en ANSYS, son los mismos valores que los reflejados en la TDS del prepeg VTC401-UD300-T700-24K-37%RW-300P.

Las propiedades mecánicas de los materiales compuestos varían según varios factores como los preimpregnados que se utilizan, el tipo de tejido, la dirección de cada una de las capas y el número de capas que se utilizan. Variando así su rigidez y flexibilidad. Por tanto, las características mecánicas mostradas para cada preimpregnado varían luego para cada pieza conformada con ellos.

Todos estos valores mostrados para cada preimpregnado, por ejemplo, el de resistencia a la tracción y el módulo elástico se obtienen ejecutando unos ensayos descritos en la norma ISO 527-5:2009 *Plastics — Determination of tensile properties — Part 5: Test conditions for unidirectional fibre-reinforced plastic composites* [12].

En la Ilustración 40, se adjunta las dimensiones de la probeta a utilizar para este ensayo con las fibras orientadas en todas sus capas en 0°.

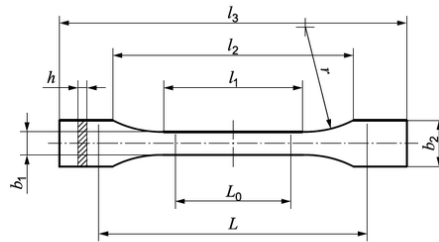


Figure A.1 — Type 1BA and 1BB test specimens

Table A.1 — Dimensions of type 1BA and 1BB test specimens

Dimensions in millimetres

Specimen type	1BA	1BB
l_3 Overall length	≥ 75	≥ 30
l_1 Length of narrow parallel-sided portion	$30,0 \pm 0,5$	$12,0 \pm 0,5$
r Radius	≥ 30	≥ 12
l_2 Distance between broad parallel-sided portions	58 ± 2	23 ± 2
b_2 Width at ends	$10,0 \pm 0,5$	$4 \pm 0,2$
b_1 Width at narrow portion	$5,0 \pm 0,5$	$2,0 \pm 0,2$
h Thickness	≥ 2	≥ 2
L_0 Gauge length	$25,0 \pm 0,5$	$10,0 \pm 0,2$
L Initial distance between grips	$l_2^{+2}_0$	$l_2^{+1}_0$

NOTE The specimen types 1BA and 1BB are proportionally scaled to type 1B with a reduction factor of 1:2 and 1:5, respectively, with the exception of thickness.

Ilustración 40: Dimensiones de las probetas de la norma (BS EN ISO 527:2012) [13]

En la fabricación de componentes con fibra de carbono, es aconsejable apilar un 20% aproximadamente de las capas en forma de tejido, quedando un 80% de las láminas unidireccionales y un 20% de las capas en tejido. Es por ello por lo que las láminas de preimpregnado elegidas son las anteriores evitando basar toda la fabricación en láminas unidireccionales.

4.2.2 PREPARACIÓN DE LA GEOMETRÍA

Para realizar los ensayos FEM en los diferentes módulos, primero hay que preparar la geometría.

Una vez diseñada la geometría en el CAD, se genera un archivo .stp para que sea compatible con ANSYS y pueda leerlo. Hay que tener en cuenta que el ACP usa geometrías de tipo shell por lo que el diseño 3D debe ser procesado antes de cargarlo en el módulo ACP. Usando el módulo de Spaceclaim se convierte la geometría en superficies seleccionando solo las caras exteriores de la geometría que se va a laminar. Asimismo, es importante tener en cuenta que las superficies creadas son las que serán seleccionadas para luego generar los diferentes apilados y capas de preimpregnado. Por tanto, se pueden modificar uniendo caras o generando otras que concuerden con el laminado que se va a realizar.

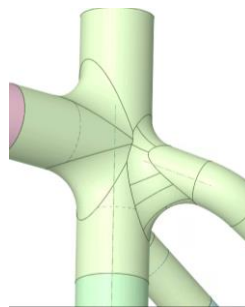


Ilustración 41: Ejemplo de fusión de superficies

En este ejemplo, el CAD genera muchas caras pequeñas en una misma zona. Para facilitar la laminado en el ACP se genera una sola cara que combine todas las pequeñas dependiendo del laminado que se va a realizar.

Una vez preparada la geometría se prepara el modelo para el laminado.

Por un lado, en el proceso de laminado es importante la dirección en la que se orientan las fibras en cada parte, por lo que es necesario establecer diferentes sistemas de coordenadas

para cada zona de la geometría. Al tratarse de una geometría tubular los sistemas de coordenadas son, esta vez, cilíndricos.

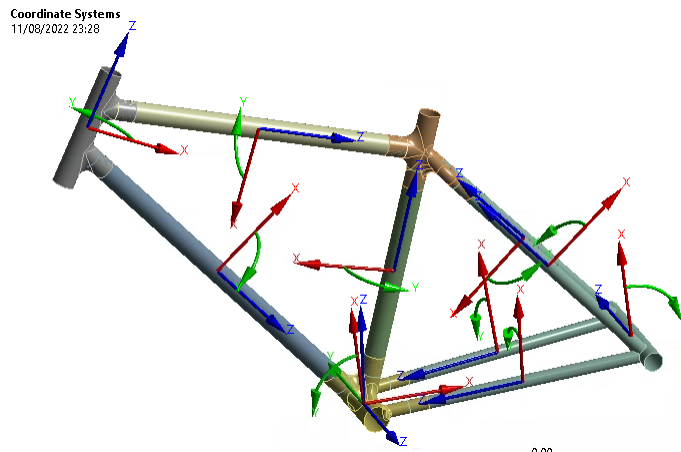


Ilustración 42: Definición de los sistemas de coordenadas

Por otro lado, se crean *named selections* con todas las caras que tendrán el mismo apilado, de esta forma estas *named selections* se guardarán en ACP y serán las zonas a elegir para generar el apilado. En las imágenes se ven las *named selections* declaradas en el modelo y los *elements sets* generados automáticamente en ACP en base a ellos.

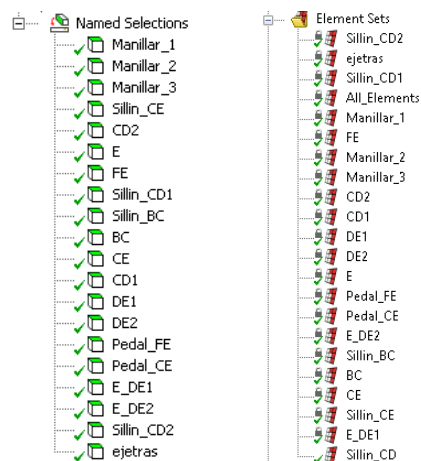


Ilustración 43: Named selections y Element Sets definidos y generados

Una vez en ACP se definen los tejidos, en este caso, los de tipo woven y unidireccional con los materiales definidos anteriormente. Para facilitar el apilado se pueden generar stackups, es decir, definir varias capas consecutivas.

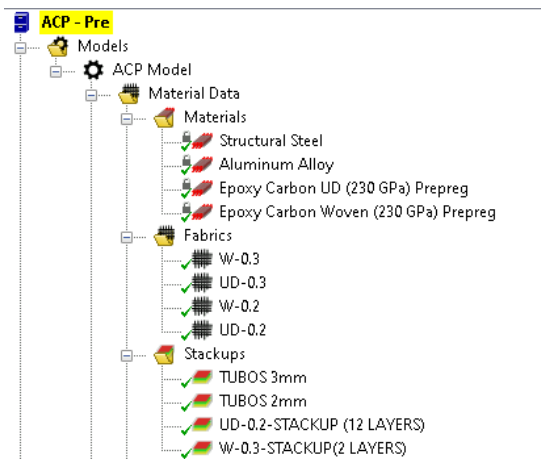


Ilustración 44: Definición de materiales y tejidos en ACP

Una vez determinados los materiales y tejidos y los *element sets* declarados, se atribuye cada uno de los sistemas de coordenadas a la geometría que corresponde. De esta forma se generan los *rosettes*, que son los sistemas de coordenadas que definirán la dirección y el sentido de cada una de las capas que se apliquen en cada zona.

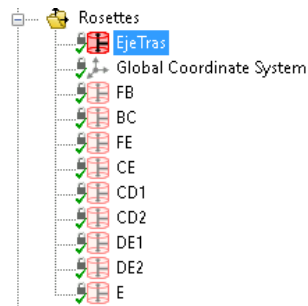


Ilustración 45: Definición de los rosettes

Luego, cada uno de los *element sets* y sus respectivos *rosettes* se declaran en las *oriented selection sets*, con el fin de definir a cada zona de apilado su sistema de coordenadas.

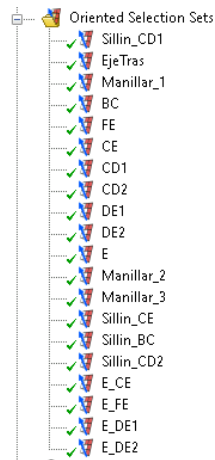


Ilustración 46: Definición de los Oriented Selection Sets

Por último, se definen las diferentes capas y las zonas en las que se quieren aplicar. Esto se realiza a partir de crear *Modeling Groups*.

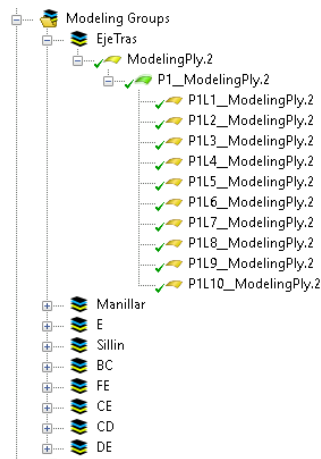


Ilustración 47: Definición de las capas a partir de los Modeling Groups

4.2.3 DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS DE ANÁLISIS ESTRUCTURAL

A continuación, se presentarán todos los ensayos a realizar sobre el cuadro.

Los ensayos a realizar son los correspondientes con la norma UNE-EN ISO 4210-6 (2015) *Ciclos. Requisitos de seguridad para bicicletas*. [11]

La norma incluye un anexo con los métodos de ensayo del cuadro y la horquilla y las condiciones en las que se deben de realizar. Según este estándar, el objetivo de los siguientes ensayos es el de comprobar que en caso de fallo del resorte o del amortiguador, el neumático no entre en contacto con ninguna parte del cuadro y que el conjunto que soporta a la rueda trasera no se separe del resto del cuadro. Estos son los métodos de ensayo:

4.2.3.1 Ensayo 1- Ensayo de choque (caída de masa)

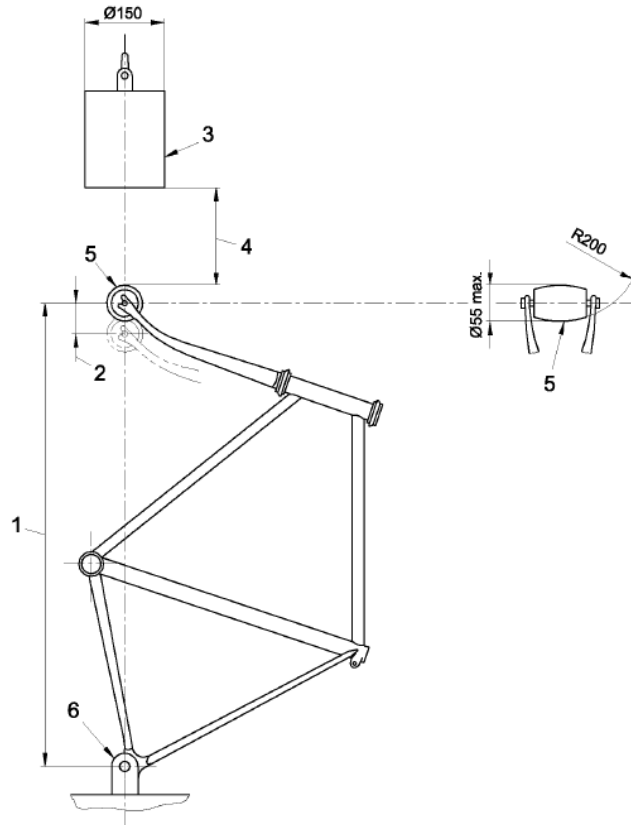
Especificaciones

En la norma se indica que se permite utilizar para el ensayo una tija maciza de acero.

Requisitos

1. No debe haber fisura ni rotura visible en el conjunto y no debe haber ninguna separación de cualquier elemento de los sistemas de suspensión.
2. La deformación permanente medida entre los centros de los ejes de las ruedas no debe sobrepasar:
 - a. 30 mm cuando la horquilla está montada
 - b. 10 mm cuando se ha montado una tija maciza de acero en lugar de la horquilla.

Medidas en milímetros



Leyenda

- 1 Distancia entre ejes
- 2 Deformación permanente
- 3 Percutor de 22,5 kg
- 4 Altura de caída: 360 mm
- 5 Rodillo de pequeña masa (1 kg máx.)
- 6 Fijación rígida en el punto de enganche del eje trasero

Ilustración 48: Explicación del ensayo de caída de masa sobre el cuadro

La altura h_1 es variable según el tipo de cuadro que se trate. En este caso, la altura establecida es de 360mm, correspondiente a una bicicleta de montaña.

Medidas en milímetros

Tipo de bicicleta	Bicicletas de paseo	Bicicletas para adultos jóvenes	Bicicletas de montaña	Bicicletas de carreras
Altura de caída, h_1	180	180	360	212

Ilustración 49: Alturas modificables según tipo de bicicleta [11]

Ejecución del ensayo

Para este ensayo se diseñan tres geometrías principales: el cuadro, la horquilla y el percutor. Tanto el percutor como la horquilla son de acero con el fin de tener buena rigidez y poder obtener buenos resultados en el cuadro. El percutor debe pesar 22,5 kg y tener un diámetro de 150mm, por lo que en función de la densidad del acero se ha diseñado el percutor.

Condiciones del ensayo:

- CONTACTOS
 - Contacto *bonded* entre la horquilla y el cuadro.
 - Interacción entre todos los cuerpos.

- CONDICIONES DE CONTORNO
 - Altura de caída del percutor de 360mm con una velocidad de impacto de 2745 mm/s.
 - Fijación rígida en eje trasero.



Ilustración 50: Condiciones de contorno del Ensayo 1- Caída de masa

- ANALYSIS SETTINGS
 - Distancia del percutor a la horquilla de 0.5mm.
 - Tiempo de simulación: 1 milésima de segundo.

4.2.3.2 Ensayo 2- Conjunto cuadro horquilla delantera. Ensayo de choque (caída del cuadro)

Especificaciones

En la norma se indica que se permite utilizar para el ensayo una tija maciza de acero.

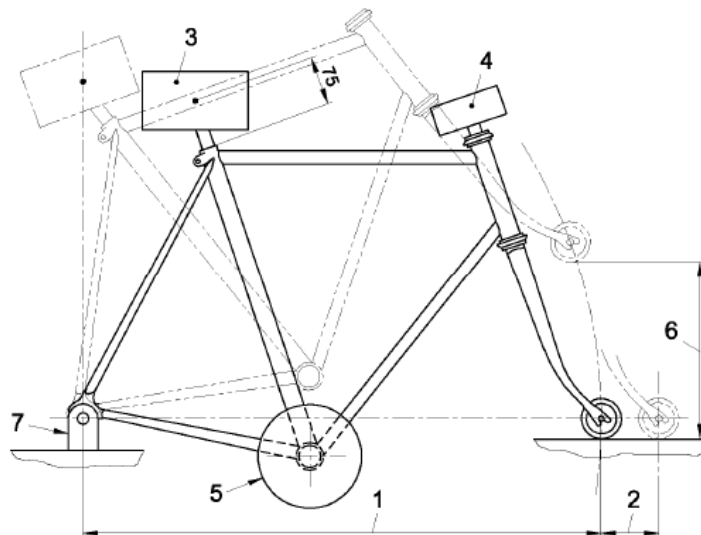
Requisitos

1. No debe haber fisura ni rotura visible en el conjunto y no debe haber ninguna separación de cualquier elemento de los sistemas de suspensión.
2. La deformación permanente medida entre los centros de los ejes de las ruedas no debe sobrepasar 60 mm para un conjunto cuadro/horquilla y no debe haber ninguna separación de cualquier elemento del sistema de suspensión.

- 47 -

UNE-EN 14766:2006

Medidas en milímetros



- Leyenda
- 1 Distancia entre ejes
 - 2 Deformación permanente
 - 3 Masa de 30 kg
 - 4 Masa de 10 kg
 - 5 Masa de 50 kg
 - 6 Altura de caída: 300 mm
 - 7 Fijación rígida en el punto de enganche del eje trasero

Ilustración 51: Explicación del ensayo caída del cuadro

Tabla 13: Alturas de caída y distribución de las masas en la tija del sillín, la parte superior del tubo de eje de horquilla y la caja del pedalier. [11]

Tipo de bicicleta	Bicicletas de paseo	Bicicletas para adultos jóvenes	Bicicletas de montaña	Bicicletas de carreras
Masa 1 Tija, M_1 kg	50	40	30	30
Masa 2 parte superior del tubo de eje de horquilla, M_2 kg	10	10	10	10
Masa 3 caja del pedalier, M_3 kg	30	20	50	50
Altura de caída, h_2 mm	200	200	300	200

Medidas en milímetros

Ejecución del ensayo

Para este ensayo se diseñan dos geometrías: el cuadro, la horquilla y el suelo. Tanto el suelo como la horquilla son de acero con el fin de tener buena rigidez y poder obtener buenos resultados en el cuadro.

Condiciones del ensayo:

- CONTACTOS
 - Contacto *bonded* entre la horquilla y el cuadro.
 - Interacción entre todos los cuerpos.

- CONDICIONES DE CONTORNO
 - Altura de caída del cuadro sobre el suelo de 300mm con una velocidad de impacto de 2425 mm/s.
 - El suelo está fijo.



Ilustración 52: Condiciones de contorno Ensayo 2- Caída del cuadro

- ANALYSIS SETTINGS
 - Distancia de la horquilla al suelo de 0.7mm.
 - Tiempo de simulación: 2,5 milésimas de segundo.

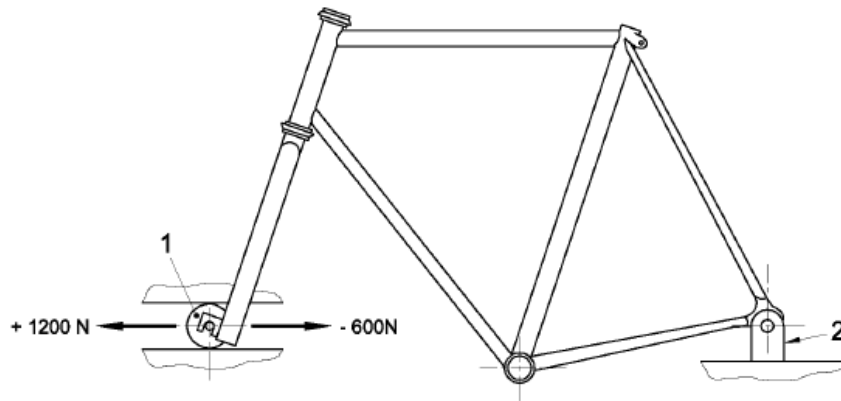
4.2.3.3 Ensayo 3- Ensayo con fuerzas horizontales

Especificaciones

En la norma se indica que se permite utilizar para el ensayo una tija maciza de acero.

Requisitos

1. No debe haber fisura ni rotura visible en el conjunto y no debe haber ninguna separación de cualquier elemento de los sistemas de suspensión.
2. Para los cuadros de fibra de carbono, la flecha máxima en el momento del ensayo en los puntos de aplicación de las fuerzas no debe exceder del 20 % del valor inicial.



Leyenda

- 1 Rodillo guiado que puede girar libremente
- 2 Montura pivotante rígida para el punto de fijación del eje trasero

Ilustración 53: Explicación del ensayo con fuerzas horizontales

Ejecución del ensayo

Para este ensayo se necesita una horquilla de acero y el cuadro.

Condiciones del ensayo:

- CONTACTOS
 - Contacto *bonded* entre la horquilla y el cuadro.

- CONDICIONES DE CONTORNO
 - Se permite únicamente la rotación en el eje trasero y el desplazamiento en dirección X del eje delantero.

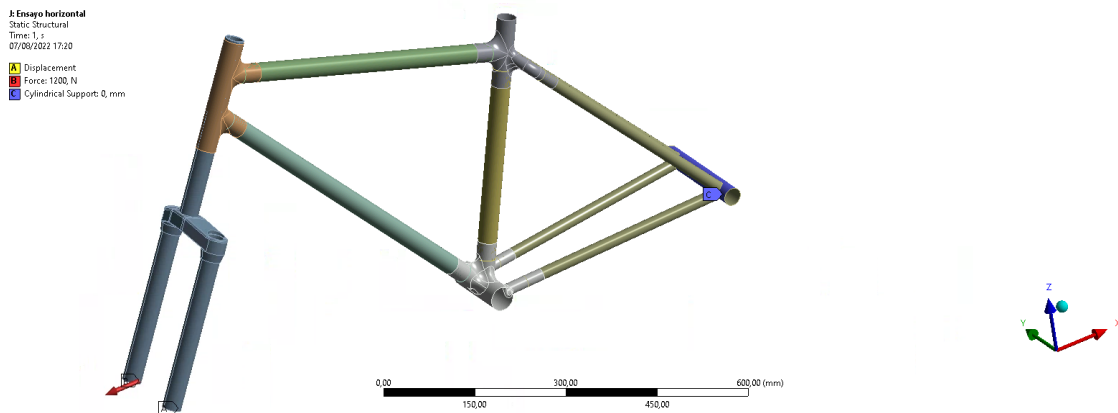


Ilustración 54: Condiciones de contorno del Ensayo 2- Caída del cuadro

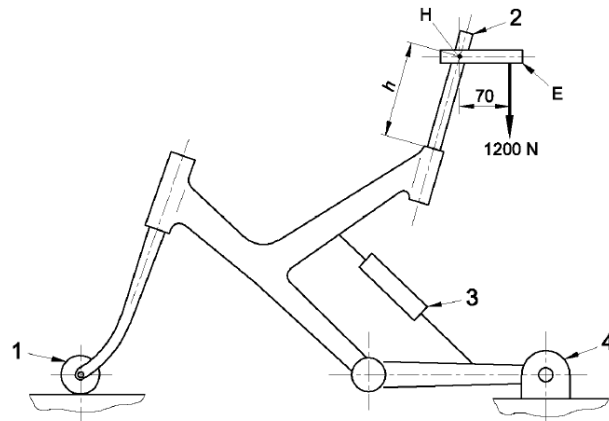
4.2.3.4 Ensayo 4- Ensayo con fuerza vertical

Especificaciones

Si hay una horquilla de suspensión, se bloquea a una longitud equivalente a la producida por un ciclista de 80 kg sentado sobre la bicicleta, regulando la unidad resorte /amortiguador o con la ayuda de medios externos.

Requisitos

1. No debe haber fisura ni rotura visible en el conjunto y no debe haber ninguna separación de cualquier elemento de los sistemas de suspensión.
2. Para los cuadros de fibra de carbono, la flecha máxima en el momento del ensayo en los puntos de aplicación de las fuerzas no debe exceder del 20 % del valor inicial.



- Leyenda
- 1 Rodillo que puede girar libremente
 - 2 Tija de acero
 - 3 Unidad de suspensión bloqueada o unión rígida para vainas pivotantes
 - 4 Montura rígida pivotante para el punto de fijación del eje trasero

Ilustración 55: Explicación del ensayo con fuerzas verticales

Ejecución del ensayo

Para este ensayo se necesita una tija de acero y el cuadro.

Condiciones del ensayo:

- CONTACTOS
 - o Contacto *bonded* entre la tija y el cuadro.
- CONDICIONES DE CONTORNO
 - o Se permite únicamente la rotación en el eje trasero y el desplazamiento en dirección X del eje delantero.

Q: Ensayo vertical
Static Structural
Time: 1, s
07/08/2022 18:12

A Displacement
B Force: 1200, N
Cylindrical Support: 0, mm

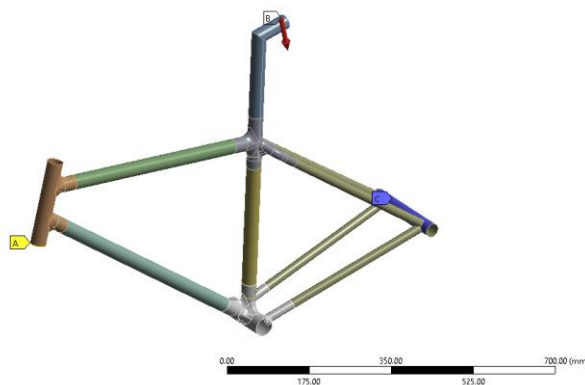


Ilustración 56: Condiciones de contorno Ensayo fuerzas horizontales

4.2.3.5 Ensayo 5- Ensayo pedaleo en pendiente

En la Ilustración 57, se muestra un esquema con las fuerzas y momentos aplicados en un cuadro cuando el ciclista está pedaleando sentado en el sillín.

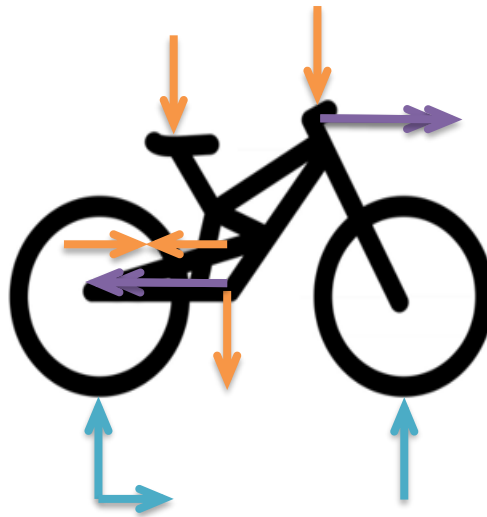


Ilustración 57: Esquema de fuerzas en el caso de ensayo de pedaleo en pendiente

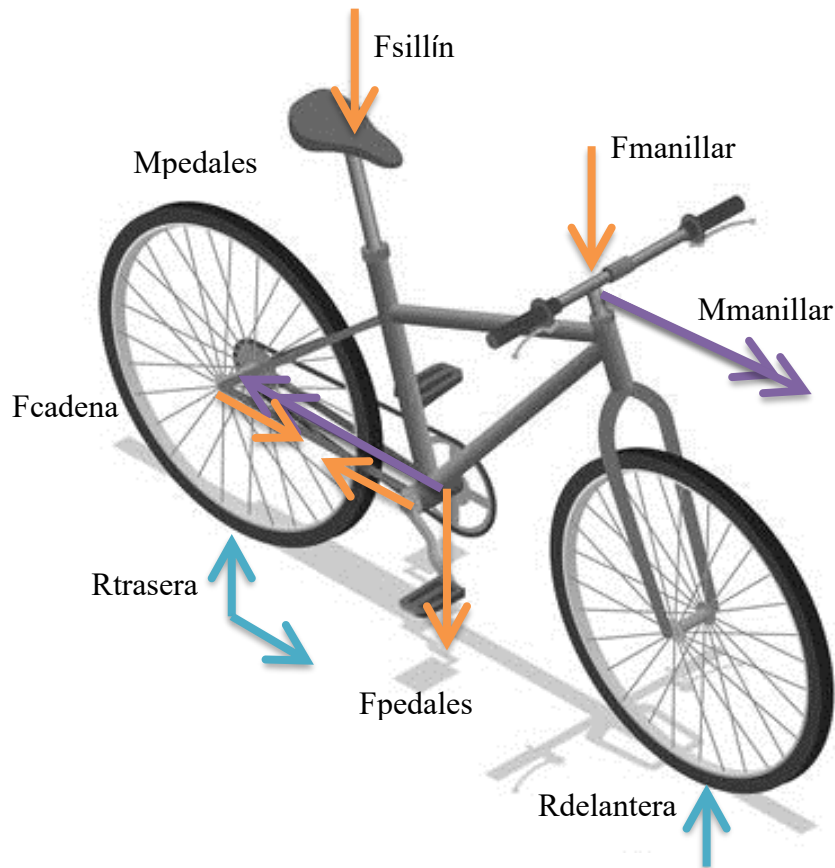


Ilustración 58: Esquema de fuerzas sobre el cuadro en ensayo pedaleo en pendiente

Estas son las fuerzas resultantes del cálculo de una situación en la cual se requiere mantener una velocidad con una pendiente determinada mientras se pedalea sentado impulsando por el pedal derecho. Los valores calculados se muestran en la Tabla 14: Cálculos de fuerzas y momentos en ensayo de pedaleo en pendiente.

Tabla 14: Cálculos de fuerzas y momentos en ensayo de pedaleo en pendiente

ENSAYO PENDIENTE		
Cálculos		
Magnitud	Unidades	Valor
Ftracción	314.06	N
Mmarcha	103639.53	Nm
Fcadena	1884.36	N
Mpedal	122483.08	Nm
Fpedal	680.46	N
Psillin	784.80	N
Mlongped	120645.83	Nm
Manillar ¹	120645.83	Nm
Fmanillar	446.84	N

Tabla 15: Datos iniciales para ensayo de pedaleo en pendiente

ENSAYO PENDIENTE		
Datos		
Magnitud	Unidades	Valor
m	kg	80
v	km/h	50
v	m/s	13.89
T _{aceleración}	s	8
a	m/s ²	1.74
R _{rueda}	mm	330
R _{marcha}	mm	55
R _r	mm	65
d	mm	177.3
l	mm	180
g	m/s ²	9.81
mu*	-	0.4
Pendiente	°	8
F _{roz}	N	313.92

En este caso, hay que tener en cuenta que, en un caso real, muchas de las reacciones y compensaciones de las fuerzas y momentos aplicados en la bicicleta para efectuar el movimiento de ésta, son contrarrestadas por el ciclista por movimientos del cuerpo durante el pedaleo, así como por el giro de la bicicleta para contrarrestar el par generado en el pedal. En la Ilustración 59 se muestra el efecto de este último hecho.

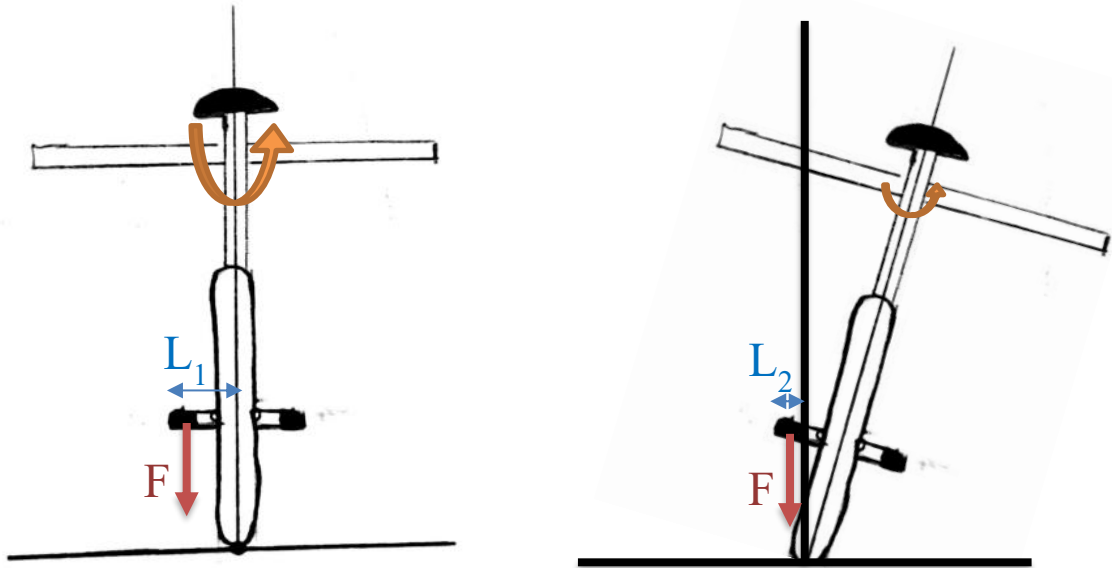


Ilustración 59: Demostración de lo sucedido en una situación real

En la primera imagen, la fuerza aplicada en el pedal genera un momento que debe ser contrarrestado en el manillar por el ciclista. Este valor corresponde con la distancia a la fuerza por la fuerza ejercida. En la realidad, sucede lo que ocurre en la segunda imagen. En ese caso, el ciclista gira la bici y el cuerpo lo mantiene a la izquierda para reducir el momento generado manteniendo el centro de gravedad. Es por eso por lo que el par reaccionado en el manillar es menor.



Ilustración 60: Ejemplo de movimientos del ciclista durante el pedaleo

Para el ensayo en la simulación se ha tenido en cuenta que todo el par es reaccionado en el manillar; hecho que no es del todo real pero que sitúa los resultados en el lado de la seguridad.

Ejecución del ensayo

Para este ensayo se necesita una horquilla de acero y el cuadro.

Condiciones del ensayo:

- CONTACTOS
 - o Contacto *bonded* entre la horquilla y el cuadro.

- CONDICIONES DE CONTORNO
 - o Se permite únicamente la rotación en el eje trasero y el desplazamiento en dirección X del eje delantero.



Ilustración 61: Condiciones de contorno Ensayo pedaleo en pendiente

4.2.4 ESTUDIO PRELIMINAR DE CARGAS Y ESFUERZOS

Los archivos del diseño final del cuadro se componen de varias partes, las cuales irán modelizadas en ANSYS estableciendo contactos entre los diferentes componentes simulando el adhesivo entre ellos. Para realizar un primer análisis en el que se pueda obtener los puntos más críticos y de concentración de tensiones, así como la dirección de las tensiones con el fin de alinear las fibras en esas direcciones, se realiza un análisis con el diseño en un solo componente eliminando los contactos entre piezas. De esta forma, se puede

conseguir de manera rápida y sencilla una primera impresión de los resultados y tener un punto de partida para el primer apilado.

El material establecido para toda la geometría es el de preimpregnado UD.

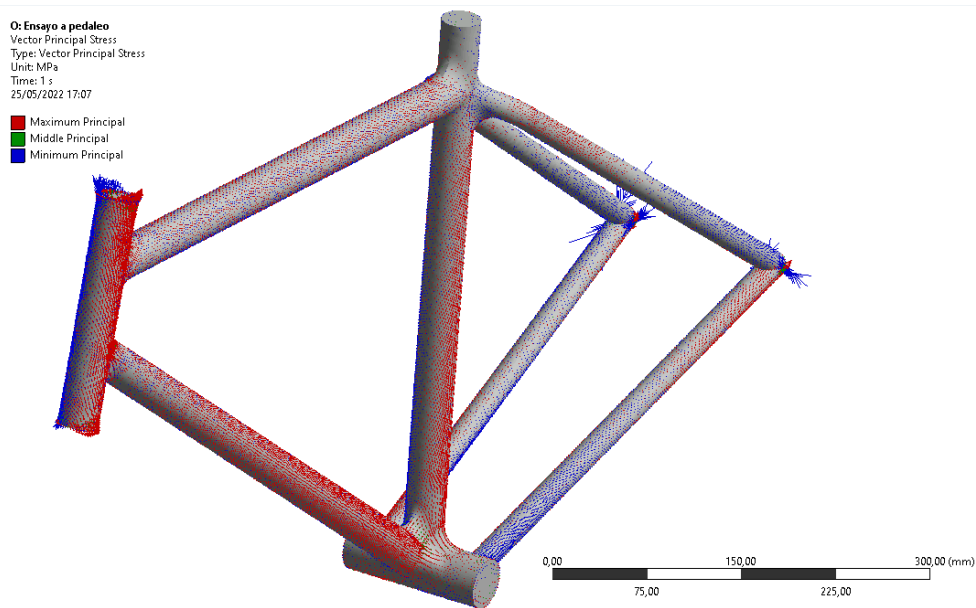


Ilustración 62: Resultado de las tensiones principales en forma vectorial

En la Ilustración 62, se muestran los vectores de máxima, media y mínima tensión de cada elemento. Con estos resultados se puede analizar en qué direcciones hay que reforzar apilando las capas de preimpregnados.

Resaltar que las piezas que van a ser fabricadas con preimpregnados son solo las piezas de unión. Los tubos que van a ser utilizados son tubos comerciales fabricados seguramente por el proceso de pultrusión. Este procedimiento consta de varias etapas: desenrollado, distribución de la malla, impregnación de la resina, control de distribución homogénea, preformado gradual, conformado, curado de matriz, postcurado y corte final.[6]

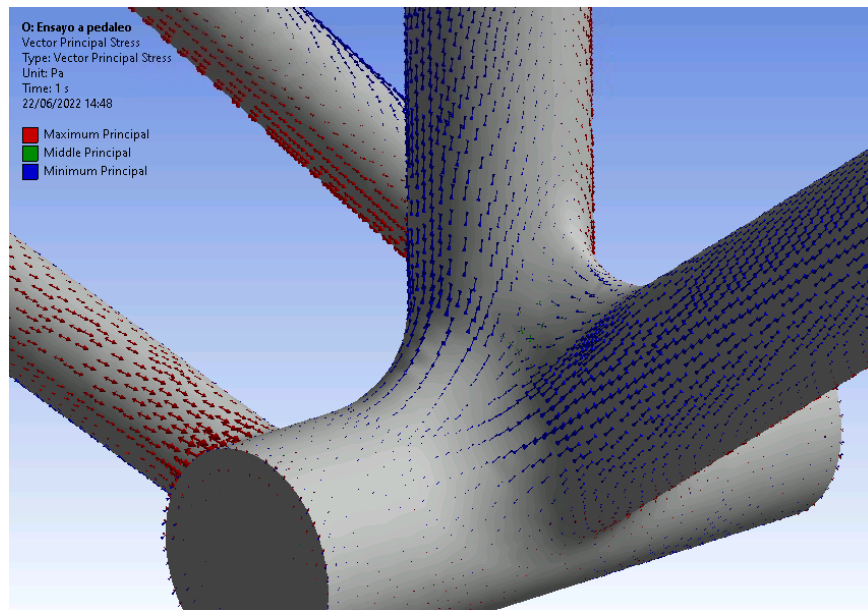


Ilustración 63: Detalle de las direcciones de las tensiones principales en la zona del pedalier

En la zona del pedal se puede observar que los tubos están trabajando a tensión o a compresión, marcando la dirección de refuerzo la dirección longitudinal a los tubos. De la misma forma, en el manillar, debido al par aplicado, la parte derecha del tubo trabaja bajo tensión mientras que la parte izquierda trabaja a compresión.

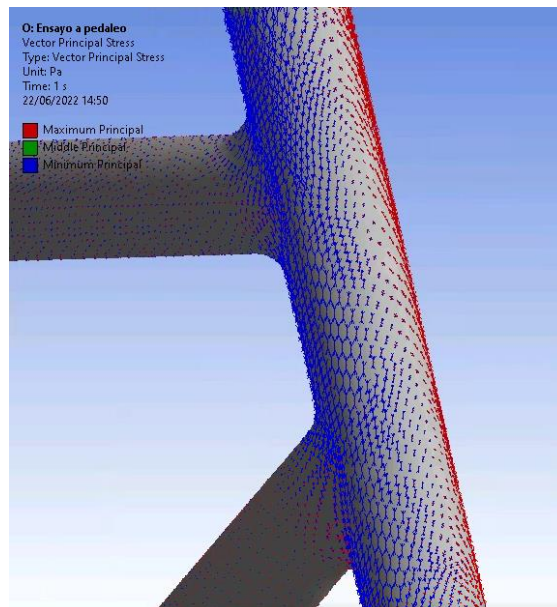


Ilustración 64: Detalle de las direcciones de las tensiones principales en la zona del manillar

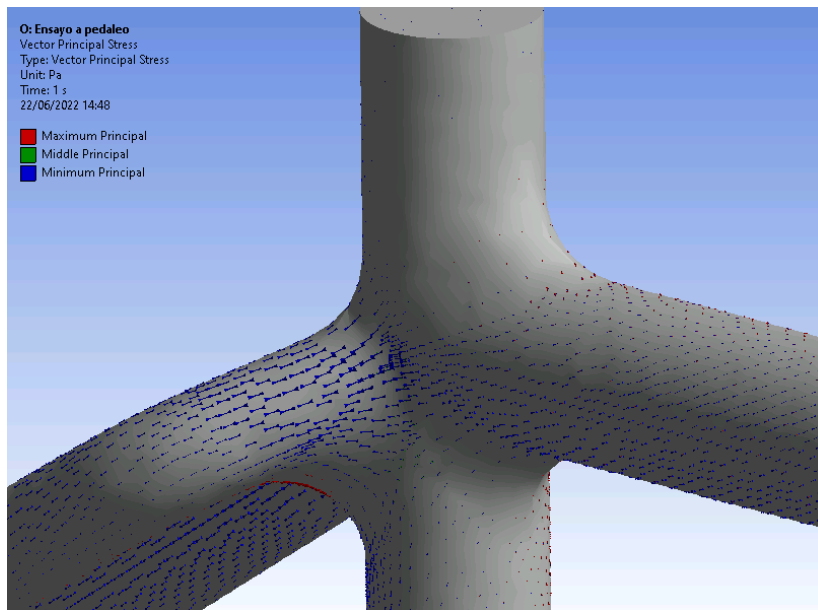


Ilustración 65: Detalle de las direcciones de las tensiones principales en la zona del sillín

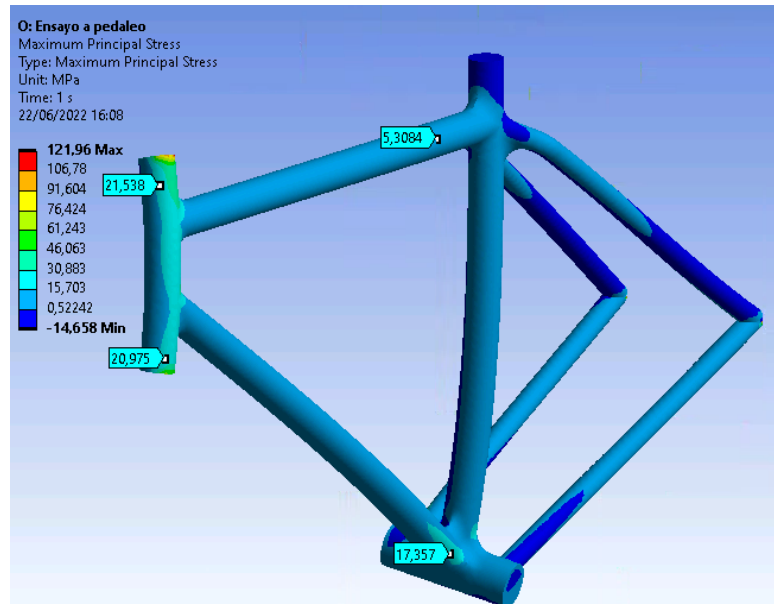


Ilustración 66: Resultado tensional de un ensayo de pedaleo

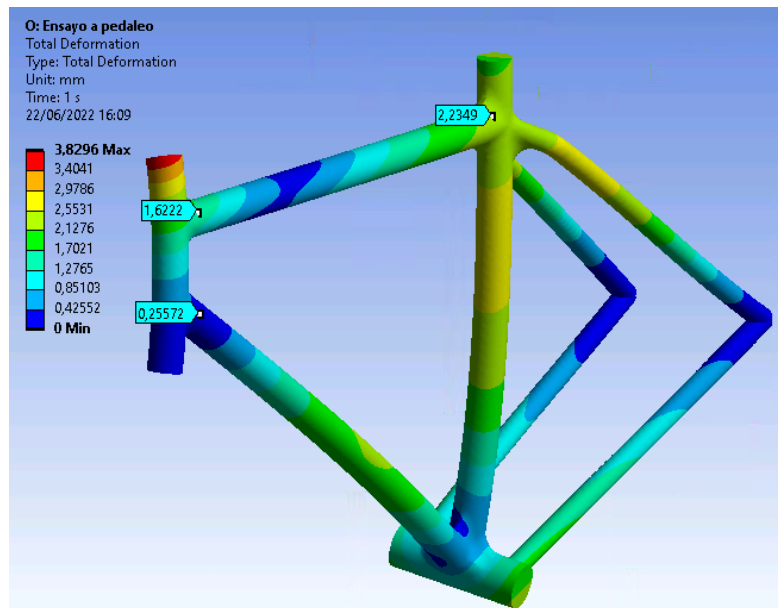


Ilustración 67: Resultado de deformación de un ensayo de pedaleo

4.3 EJECUCIÓN DE ENSAYOS

En este apartado se muestran y analizan los resultados de cada ensayo realizado, así como el proceso de cambios en la estructura del apilado como consecuencia de los resultados obtenidos.

4.3.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para analizar el comportamiento del material compuesto se utilizan una serie de criterios de fallo para la evaluación de la resistencia de los materiales compuestos y el riesgo de fallo en el apilado.

A continuación, se muestran algunos de los criterios de fallo que se pueden aplicar en el ACP para analizar el riesgo de fallo en el apilado.

1. Maximum strain criterion: En el criterio de deformación máxima, se comparan las relaciones entre las deformaciones reales y las de fallo en el sistema de coordenadas principales de la capa.
2. Maximum stress criterion: En el criterio de tensiones máximas, las relaciones entre las tensiones reales y las tensiones de fallo se comparan en el sistema de coordenadas principales de la capa.

3. Tsai-Wu Failure Criterion
4. Tsai-Hill Failure Criterion
5. Hoffman Failure Criterion
6. Hashin Failure Criterion

Se recomienda utilizar criterios de fallo que distingan entre diferentes modos de fallo (por ejemplo, fallo de la fibra o fallo de la matriz).

Los criterios de fallo cuadráticos como, por ejemplo, Tsai-Wu, Tsai-Hill o Hoffman, incluyen en su criterio todos los tipos de fallo y, por tanto, son algo menos precisos y proporcionan menos información sobre cualquier fallo.

El resto de criterios como Puck o Max Stress, son más conservadores al combinar diferentes criterios de fallo que utilizar un solo criterio. En general, debe utilizarse criterios de fallo que consideren todas las tensiones en el plano (s_1 , s_2 , s_{12}) y las tensiones de cizallamiento interlaminar fuera del plano (s_{13} , s_{23}), ya que estos resultados están disponibles en un modelo de tipo Shell. [14]

Sin embargo, los criterios de Tsai-Hill y Tsai-Wu son muy utilizados en la industria y es por ello por lo que se tendrán en cuenta en adelante los resultados del criterio Max stress, Tsai-Hill y Tsai-Wu. Asimismo, comparando los resultados de ambos criterios (Tsai Hill y Max Stress) no muestran grandes diferencias, pero si se muestra más información sobre el tipo de fallo en el caso del Max Stress.

De estos criterios de fallo en materiales compuestos se analizará el Safety Factor. Este tipo de resultado es una indicación del margen hasta el fallo. Es decir, la carga aplicada multiplicada por el factor de seguridad determina la carga de fallo. Se experimenta un fallo cuando se tiene un factor de seguridad inferior a 1.

En la Tabla 16, se puede observar que criterio de fallo evalúa el factor de seguridad en diferentes tipos de láminas.

Tabla 16: Evaluación de tipos de fallo según el criterio [14]

Failure criteria	Ply type	
	Regular (UD)	Woven
Max strain	YES	YES
Max stress	YES	YES
Tsai-Wu	YES	YES
Tsa-Hill	YES	YES
Hofmann	YES	YES
Hashin	YES	X
Puck	YES	X

En cuanto al análisis de las tensiones generadas en los modelos tras los ensayos, como se ha comentado en el apartado 4.2.1, pág. 66, estos valores dependen de la orientación de las fibras y el espesor de la pieza. Por tanto, teniendo en cuenta que la probeta con la que se ejecutaban los ensayos es de 2mm de espesor con todas las fibras a 0°; si los resultados que se muestran son menores a los que aparece en la hoja de características, entonces la pieza no tiene que presentar riesgo de rotura.

Se analizarán resultados de tensión de los valores de las tensiones principales. Esto es debido a que, como se comentó anteriormente, los materiales compuestos son materiales ortótropos, y, por tanto, sus propiedades no son las mismas dependiendo de la dirección. Los resultados tensionales equivalentes de Von Misses tiene en cuenta únicamente los materiales isótropos, por lo que no se puede usar este resultado para analizar las tensiones generadas en material compuesto.

4.3.2 PRIMERA ITERACIÓN

4.3.2.1 Apilado de capas

Para comenzar con una estructura de apilado y partir de un punto, el apilado de capas implementado es el siguiente:

Tabla 17: Estructura de capas primera iteración

APILADO DE CAPAS EN SILLÍN, MANILLAR Y PEDALIER				
CAPA	Tipo	Grosor	Ángulo	Total espesor (mm)
1	UD	0.2	0	
2	UD	0.2	0	
3	UD	0.2	0	
4	UD	0.2	0	
5	UD	0.2	0	
6	UD	0.2	0	
7	UD	0.2	0	2.4
8	UD	0.2	0	
9	UD	0.2	0	
10	UD	0.2	0	
11	UD	0.2	0	
12	UD	0.2	0	

En este caso solo se utiliza preimpregnados unidireccionales y todos orientados hacia la misma dirección.

4.3.2.2 Resultado ensayos

El método de análisis que se sigue para este estudio es el de establecer una estructura de apilado y aplicárselo a los casos estáticos y comprobar si cumple con las especificaciones o si hay que realizar algún cambio en el apilado de las capas. Los ensayos dinámicos, debido a que los periodos de ejecución son mucho más largos, no se realizan para esta estructura si los ensayos estáticos no son válidos.

➤ Ensayo 3- Ensayo con fuerzas horizontales

Se muestra en la Ilustración 68, los resultados de factor de seguridad (FS) para el criterio de fallo Maximum stress. Se observa que los valores no son demasiado bajos en general; sin embargo, en zonas críticas donde hay radios de acuerdo, el factor de seguridad son menores de 1. Debido a que se trata de una zona complicada y difícil para el apilado de las capas, se pretende conseguir un factor de seguridad mucho mayor de 1.5 para esas zonas.

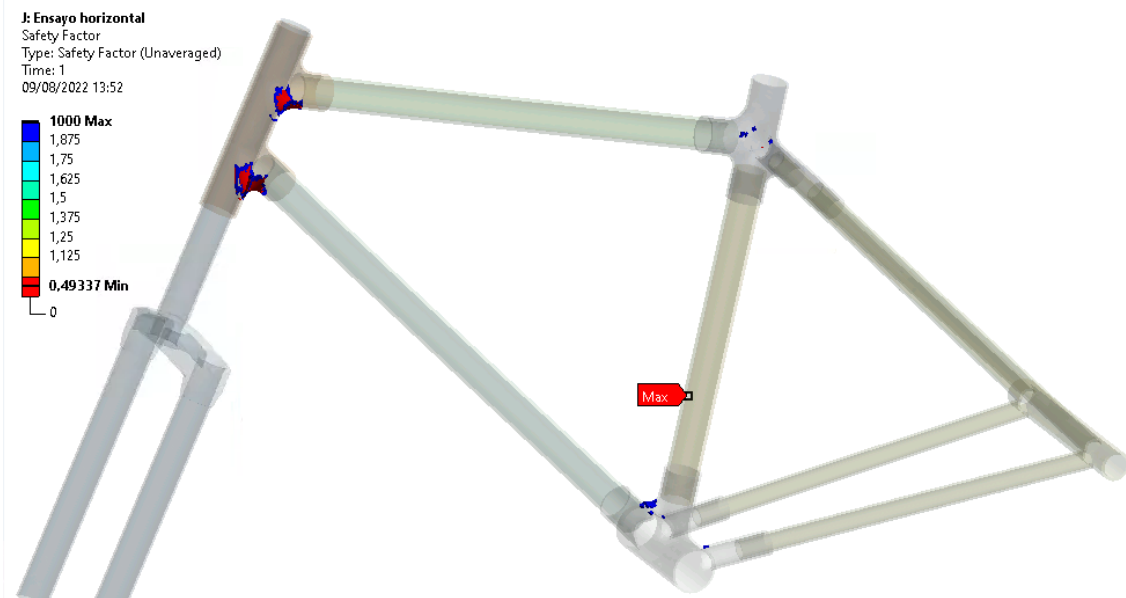


Ilustración 68: Max stress criterion con $FS < 2$

➤ Ensayo 4- Ensayo con una fuerza vertical

Para el ensayo de fuerzas verticales, los resultados obtenidos son mucho mejores respecto al anterior ensayo con fuerzas horizontales. Este ensayo no afecta en gran parte a la integridad del cuadro, lo que se puede observar teniendo factores de seguridad por encima de 4.

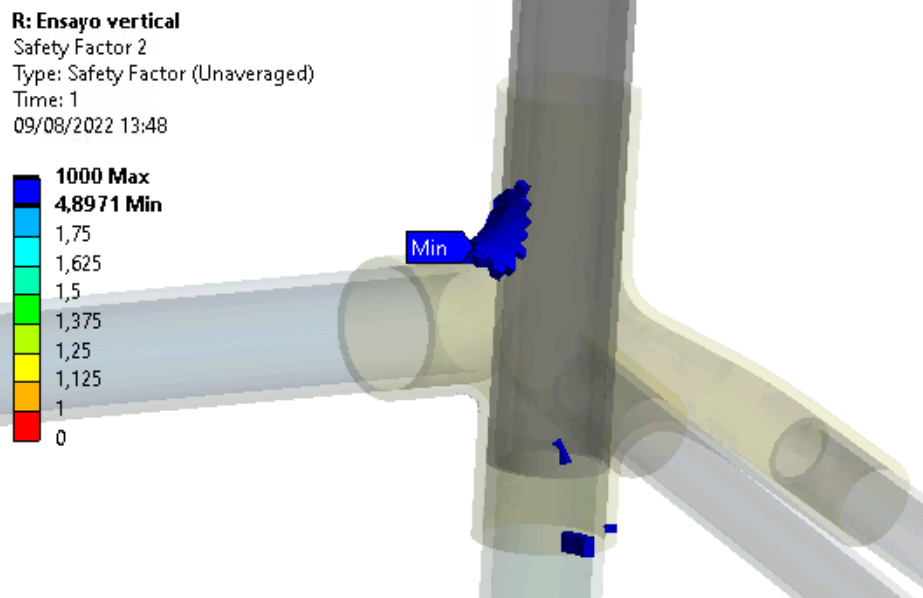


Ilustración 69: Max stress criterion con FS<10

➤ **Ensayo 5- Ensayo pedaleo en pendiente**

Este ensayo es el que más implicación tiene en el cuadro ya que son cargas algo sobredimensionadas que aplican en diferentes zonas.

D: Pendiente sitting right peddaling
Maximum Principal Stress
Type: Maximum Principal Stress - Top/Bottom - Layer 0
Unit: MPa
Time: 1 s
09/08/2022 13:14

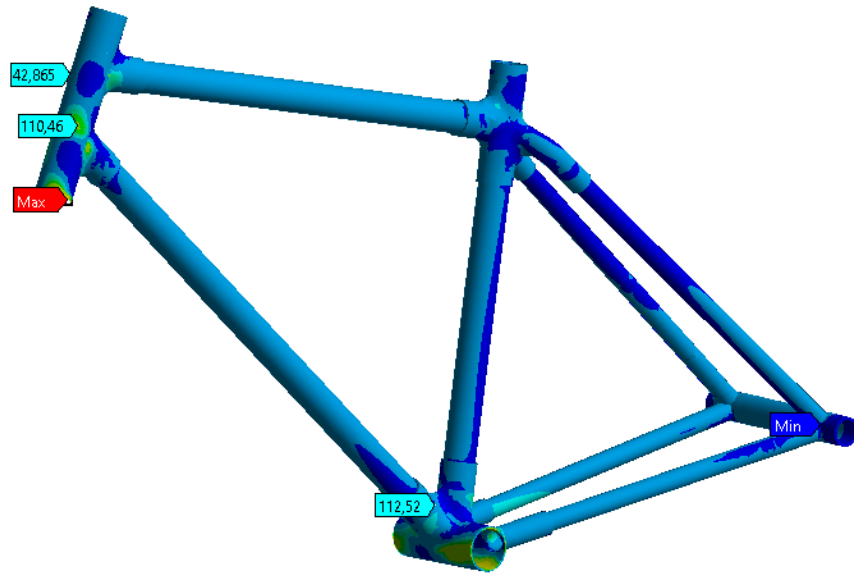
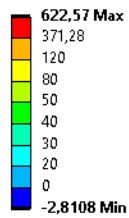


Ilustración 70: Resultado máxima tensión principal - Ensayo pedaleo en pendiente

D: Pendiente sitting right peddaling
Safety Factor
Type: Safety Factor (Unaveraged)
Time: 1
09/08/2022 13:20

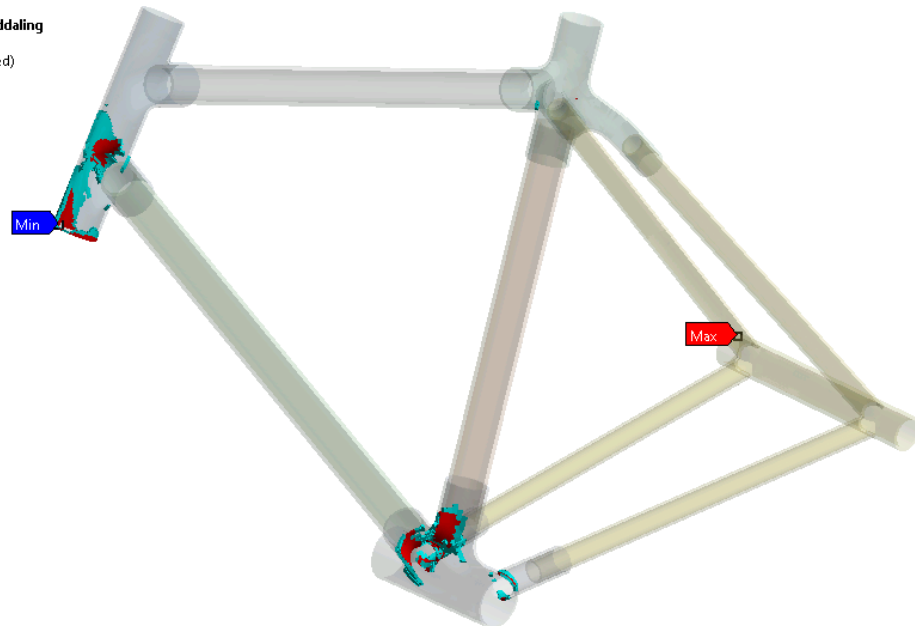
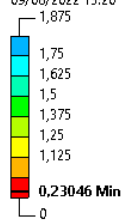


Ilustración 71: Tsai-Hill criterion con $FS < 2$

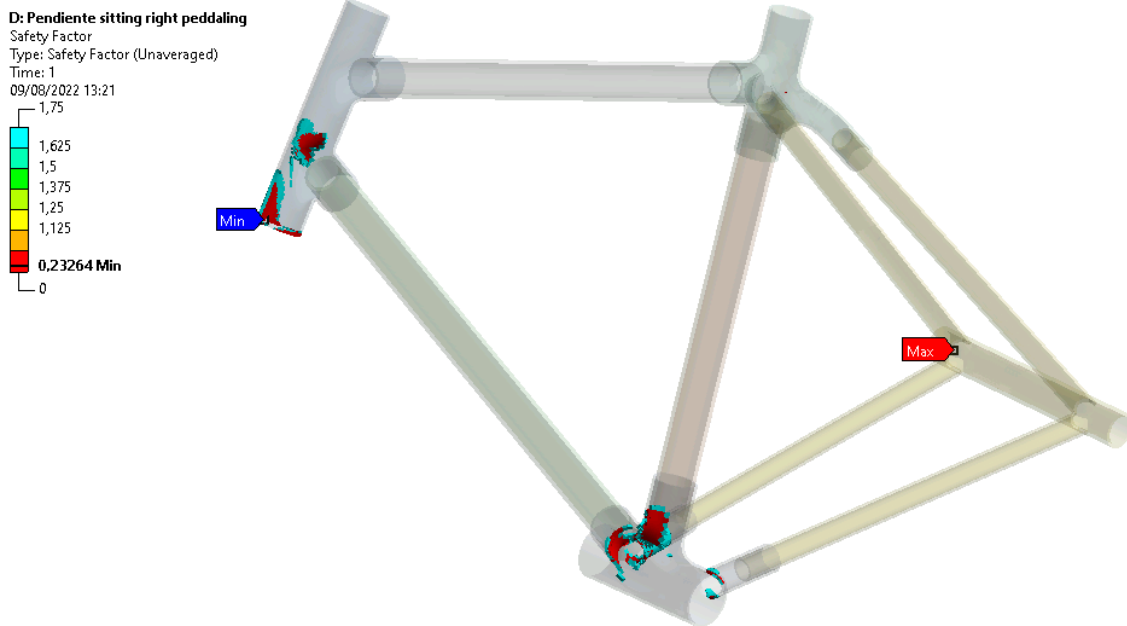


Ilustración 72: Max stress criterion con $FS < 2$

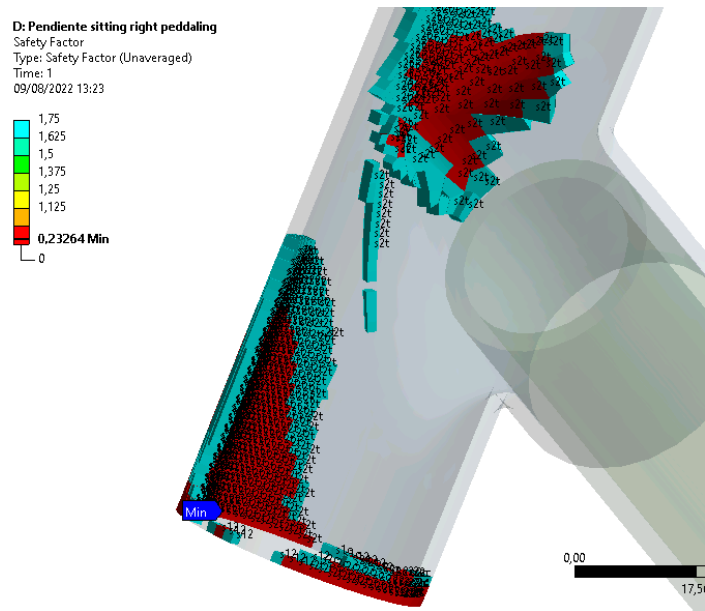


Ilustración 73: Tipos de fallo con Max stress criterion

En las imágenes anteriores se muestran los resultados del factor de seguridad según dos criterios de fallo: Maximum stress y Tsai-Hill. Ambos muestran las zonas en las cuales el factor de seguridad es menor que 2.

En la última foto, se muestra el tipo de fallo, en este caso s2t, lo que significa que el fallo se da en la matriz y debido a la tracción. Se puede concluir que el apilado de capas

implementado no es el óptimo para este ensayo. Se propone entonces, introducir capas de preimpregnado de tipo woven, los cuales presentan fibras de carbono en dos direcciones (a 0° y 90°). Así mismo, la dirección de las láminas UD se apilan con diferentes direcciones de manera simétrica.

4.3.3 ITERACIÓN FINAL

Se resumen a continuación, el nuevo apilado de capas establecido, los ensayos realizados y sus respectivos resultados.

4.3.3.1 Apilado de capas

Tras varias iteraciones, la estructura de capas final que se ha implementado es el indicado en la Tabla 18. Habiendo revisado los ensayos simulados para la primera iteración de apilado, se puede cuestionar la necesidad de cambiar el apilado para la pieza de unión de la zona del sillín. Las razones por las cuales también se ha modificado la estructura de capas es primero, no se han realizado ensayos dinámicos que muestre el efecto del ensayo en esa pieza, aunque sí es cierto que en ninguno de los dos ensayos la carga se efectúa directamente en esa pieza. En segundo lugar, intentar tener la misma estructura de apilado en todas las piezas mejora los resultados desde el punto de vista estructural además de que facilita la fabricación al mantener un patrón en todas las piezas. Por último, se ha comentado anteriormente, la necesidad de añadir un porcentaje de preimpregnados de tipo woven con el fin de mejorar la estructura y las propiedades mecánicas así como la apariencia externa de la pieza.

Tabla 18: Estructura de capas última iteración

MANILLAR					SILLÍN					PEDALIER				
Capa	Tipo	Grosor	Ángulo	Total espesor (mm)	Capa	Tipo	Grosor	Ángulo	Total espesor (mm)	Capa	Tipo	Grosor	Ángulo	Total espesor (mm)
1	WOVEN	0.3	0	2.8	1	WOVEN	0.3	0	2.8	1	WOVEN	0.3	0	2.8
2	WOVEN	0.3	0		2	WOVEN	0.3	0		2	WOVEN	0.3	0	
3	UD	0.2	45		3	UD	0.2	45		3	UD	0.2	45	
4	UD	0.2	0		4	UD	0.2	0		4	UD	0.2	0	
5	UD	0.2	-45		5	UD	0.2	-45		5	UD	0.2	-45	
6	UD	0.2	0		6	UD	0.2	0		6	UD	0.2	0	
7	UD	0.2	0		7	UD	0.2	0		7	UD	0.2	0	
8	UD	0.2	-45		8	UD	0.2	-45		8	UD	0.2	-45	
9	UD	0.2	0		9	UD	0.2	0		9	UD	0.2	0	
10	UD	0.2	45		10	UD	0.2	45		10	UD	0.2	45	
11	WOVEN	0.3	0		11	WOVEN	0.3	0		11	WOVEN	0.3	0	
12	WOVEN	0.3	0		12	WOVEN	0.3	0		12	WOVEN	0.3	0	

4.3.3.2 Resultado ensayos

En este apartado se muestran y analizan cada uno de los ensayos simulados.

Ensayo 1- Ensayo de choque (caída de masa)

A continuación, se presentan los resultados de la simulación. Se adjuntan resultados de deformación total, tanto en el cuadro como en la horquilla y la deformación en dirección X, con el fin de comprobar la flecha de deformación máxima que se da en la horquilla y, comprobar así si se cumple el requisito especificado en 4.2.3.1.

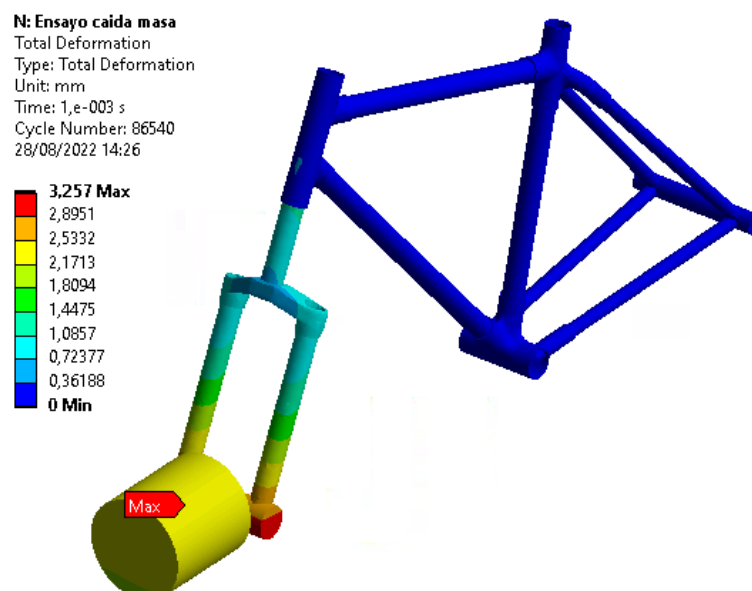


Ilustración 74: Resultado de deformación total - Ensayo caída masa

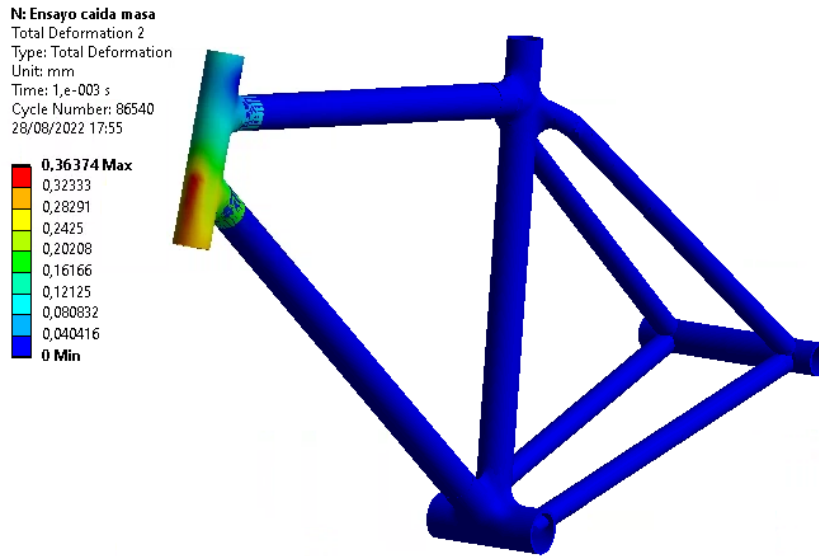


Ilustración 75: Resultado de deformación total en el cuadro - Ensayo caída masa

Se observan deformaciones principalmente en la pieza del manillar, debido a que es esta la que está en contacto con la horquilla donde se produce el impacto. La deformación producida no es pequeña como para suponer una rotura en la pieza.



Ilustración 76: Resultado de deformación en dirección X en la horquilla- Ensayo caída masa

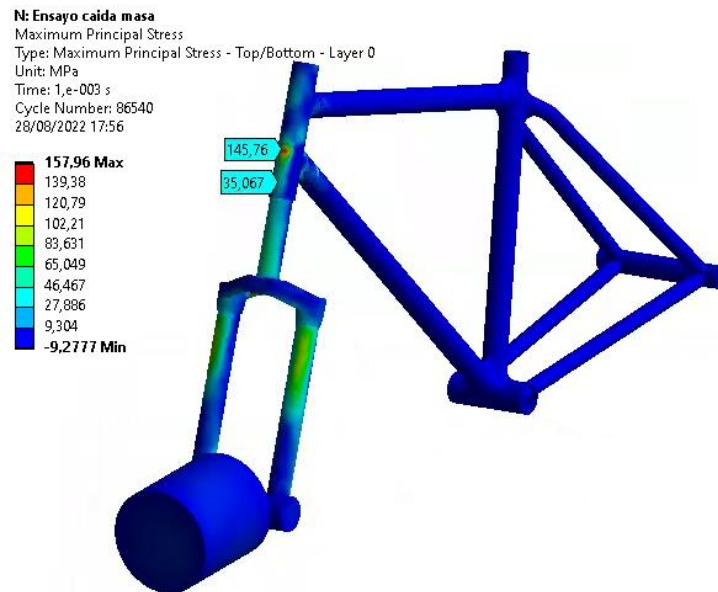


Ilustración 77: Resultado de máxima tensión principal general- Ensayo caída masa

El resultado tensional de la Ilustración 77, muestra la máxima tensión principal de cada uno de los elementos que forma la malla. Se puede comprobar que presenta un máximo de 160 MPa, siendo muy inferior a los datos presentados por el fabricante de los preimpregnados.

Cumplimiento de requisitos:

Se puede observar que la deformación producida en el cuadro es muy baja y, por tanto, el cuadro tras este ensayo no debería presentar ninguna fisura y/o rotura. Asimismo, las máximas tensiones producidas en el cuadro son inferiores a las propiedades del material compuesto en cuanto a resistencia a la tracción.

En cuanto a la deformación producida en el ensayo, en la norma habla de una deformación permanente. Los resultados obtenidos no indican una deformación permanente y su deformación para el tiempo simulado es de un máximo de 3,2mm en dirección X, por lo que la distancia entre ejes disminuiría menos de los 10 mm límite establecidos de deformación permanente.

En conclusión, el diseño cumple con todos los requisitos tras el ensayo por lo que el apilado de capas es óptimo para este ensayo.

Ensayo 2- Conjunto cuadro horquilla delantera. Ensayo de choque (caída del cuadro)

Se presentan, a continuación, los resultados del ensayo de choque con la caída del cuadro. Se adjuntan resultados de deformación máxima en dirección longitudinal y resultado tensional del cuadro.

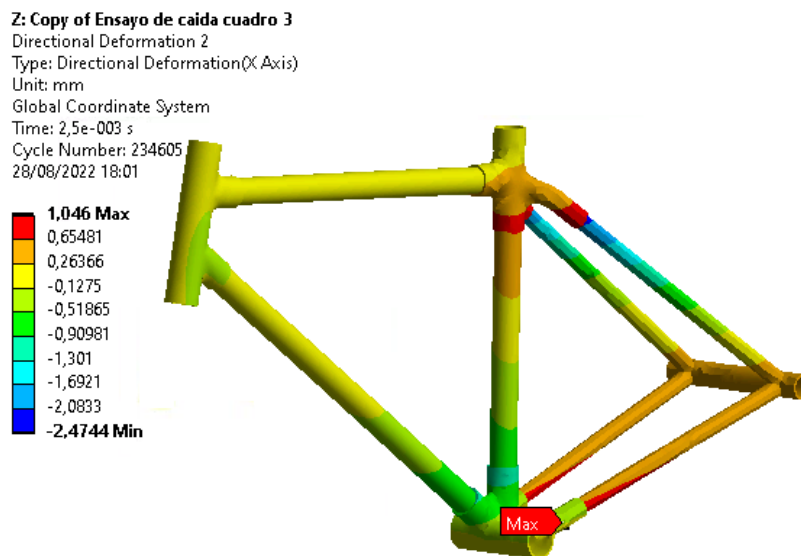


Ilustración 78: Resultado de deformación direccional en X - Ensayo caída del cuadro

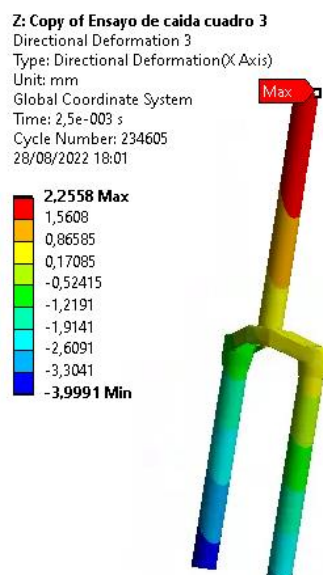


Ilustración 79: Resultado de deformación direccional en X - Ensayo caída del cuadro

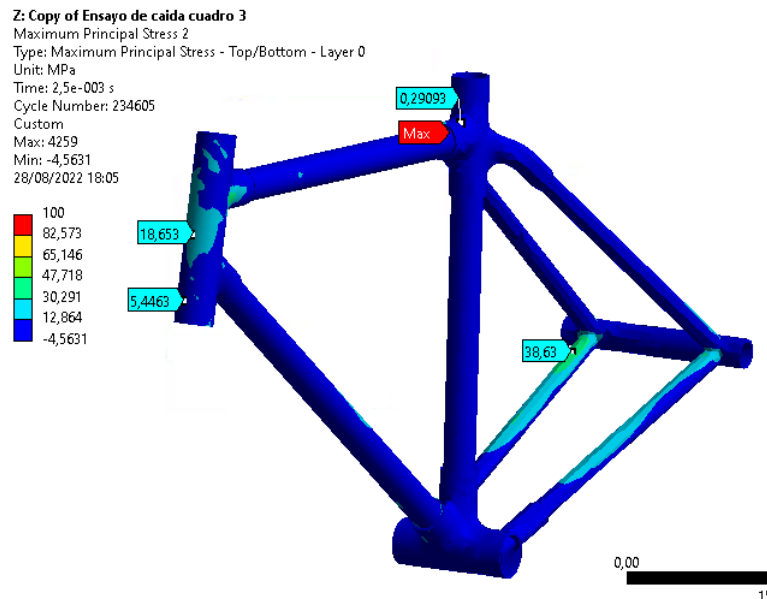


Ilustración 80: Resultado de máxima tensión principal general- Ensayo caída del cuadro

Cumplimiento de resultados

En base a los resultados se puede observar que la deformación longitudinal del cuadro para el tiempo de simulación es de 2,25 mm en la horquilla por lo que se cumple el requisito de la deformación máxima admisible de la flecha tras el ensayo. Por otro lado, las tensiones máximas principales sufridas en el cuadro no son lo suficientemente altas como para resultar en rotura o fisura del cuadro.

Ensayo 3- Ensayo con fuerzas horizontales

A continuación, se muestran los resultados de la simulación del ensayo con fuerzas horizontales. Se adjuntan tanto la deformación del cuadro y horquilla como las tensiones principales máximas sufridas en el cuadro.

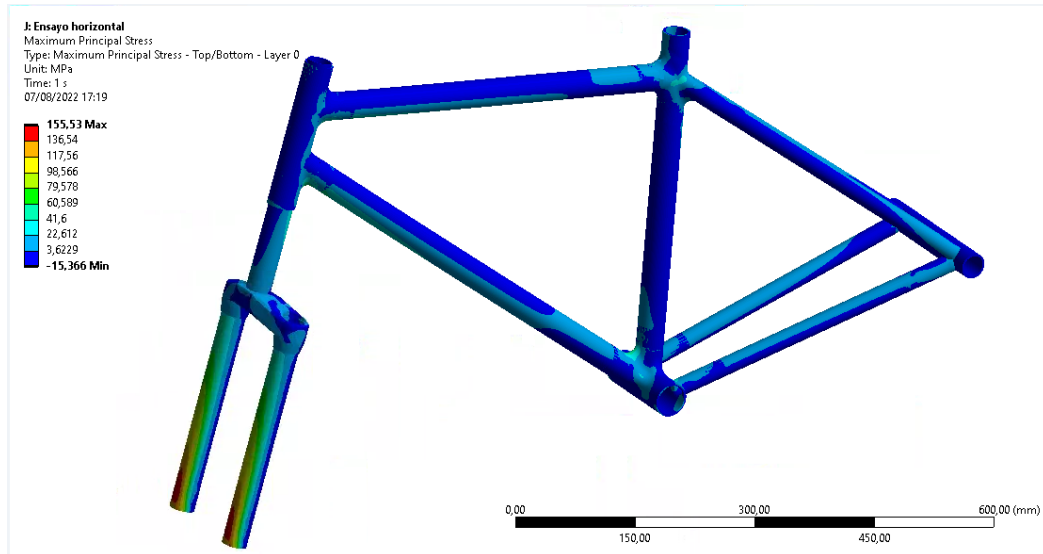


Ilustración 81: Resultado de máxima tensión principal general- Ensayo 3 Fuerzas horizontales

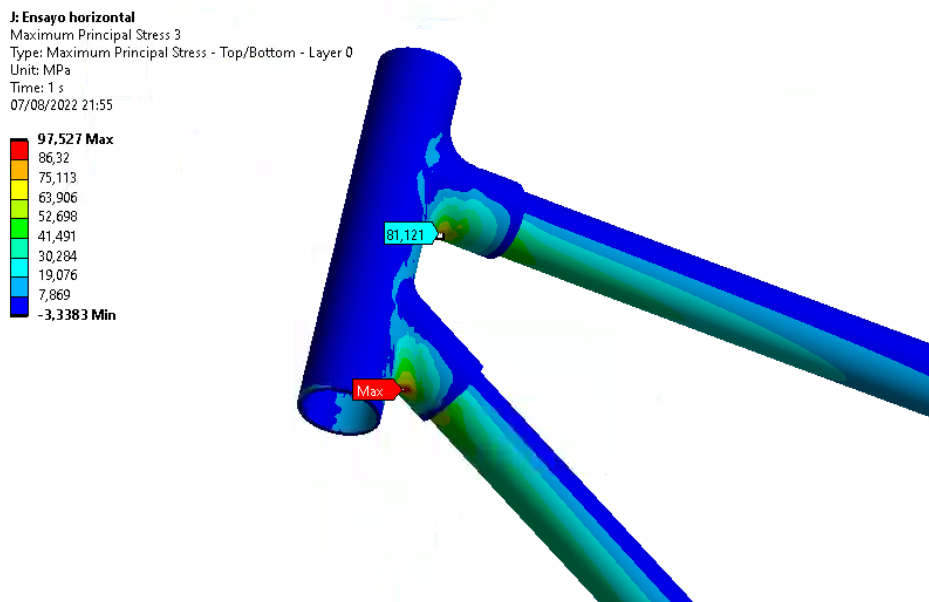


Ilustración 82: Resultado de máxima tensión principal en el cuadro - Ensayo 3 Fuerzas horizontales

Se puede observar que, al aplicar la fuerza en la horquilla, debido al contacto, se generan tensiones máximas en los radios de acuerdo de la pieza del manillar. Sin embargo, estas tensiones no son altas y no generan ningún riesgo estructural en el material compuesto.

Se adjuntan en las ilustraciones siguientes los resultados del factor de seguridad de varios de los criterios mencionados anteriormente.

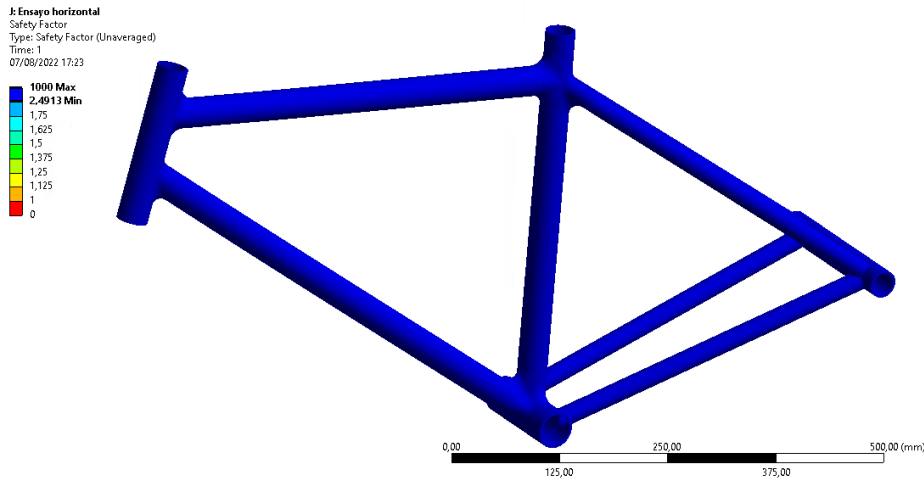


Ilustración 83: Maximum stress criterion

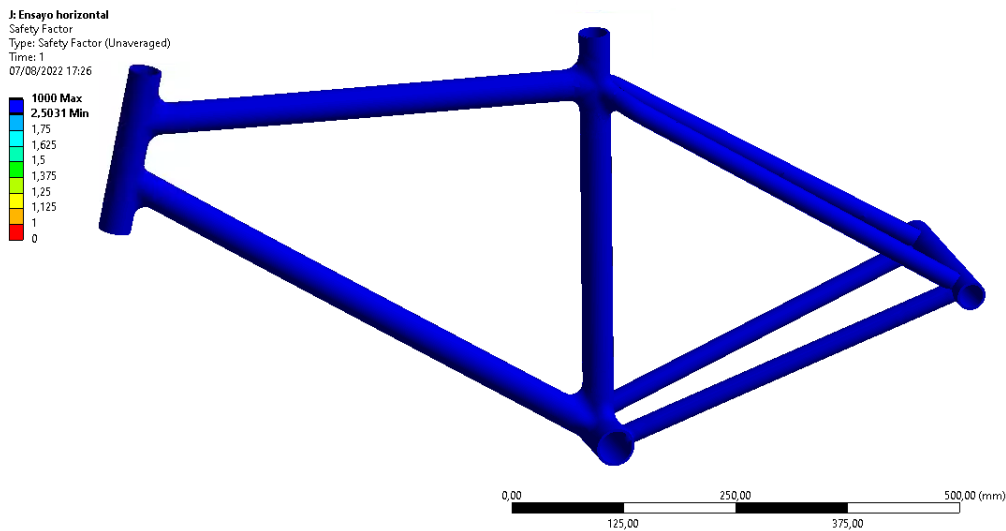


Ilustración 84: Tsai-Wu criterion

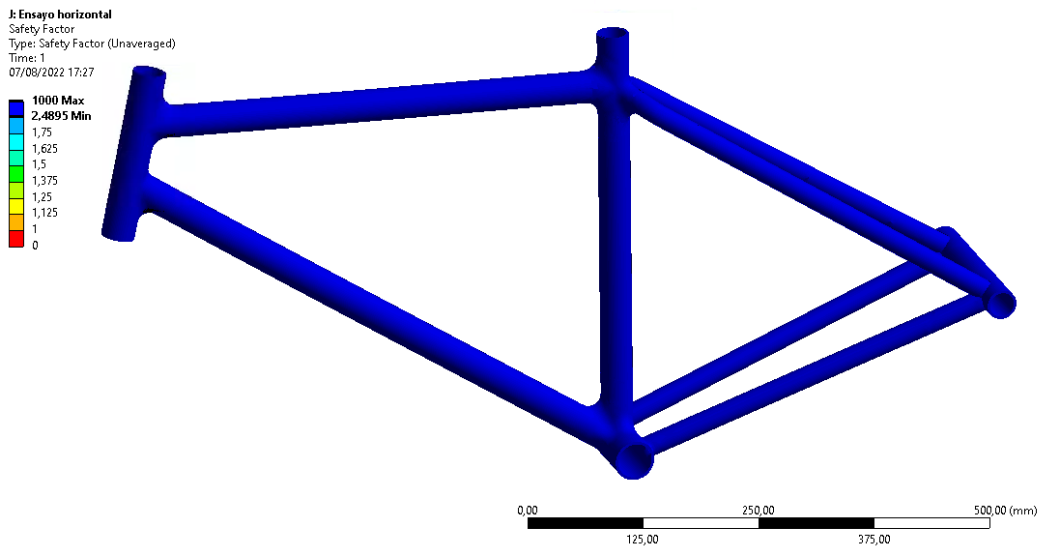


Ilustración 85: Tsai-Hill criterion

En primer lugar, se observa que en todos los casos de criterios de fallo los resultados son muy superiores a 1.5 (valor límite predefinido). En segundo lugar, el valor mínimo es muy similar a todos los criterios de fallo, por lo cualquier criterio puede ser válido para el análisis de la integridad del cuadro.

La norma indica como requisito que la flecha generada no debe ser superior al 2% del valor inicial. Se muestra en la Ilustración 86 la flecha tomada en cuenta para el análisis de los resultados. Para ello se ha supuesto el valor inicial la longitud de la horquilla desde el manillar. Siendo esta aproximadamente de 400 mm, el 20% corresponde una flecha máxima de 80mm.



Ilustración 86: Indicación de la deformación analizada en el ensayo

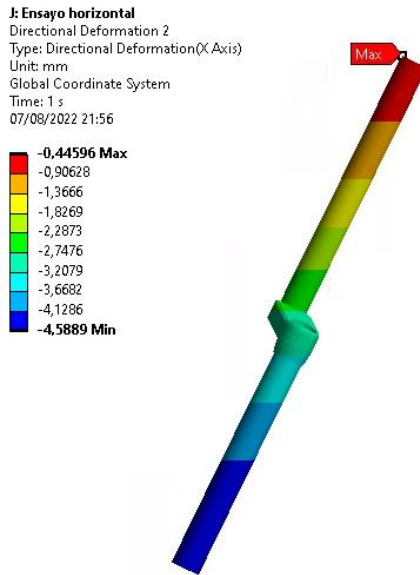


Ilustración 87: Resultado de deformación en dirección X en la horquilla- Ensayo fuerzas horizontales

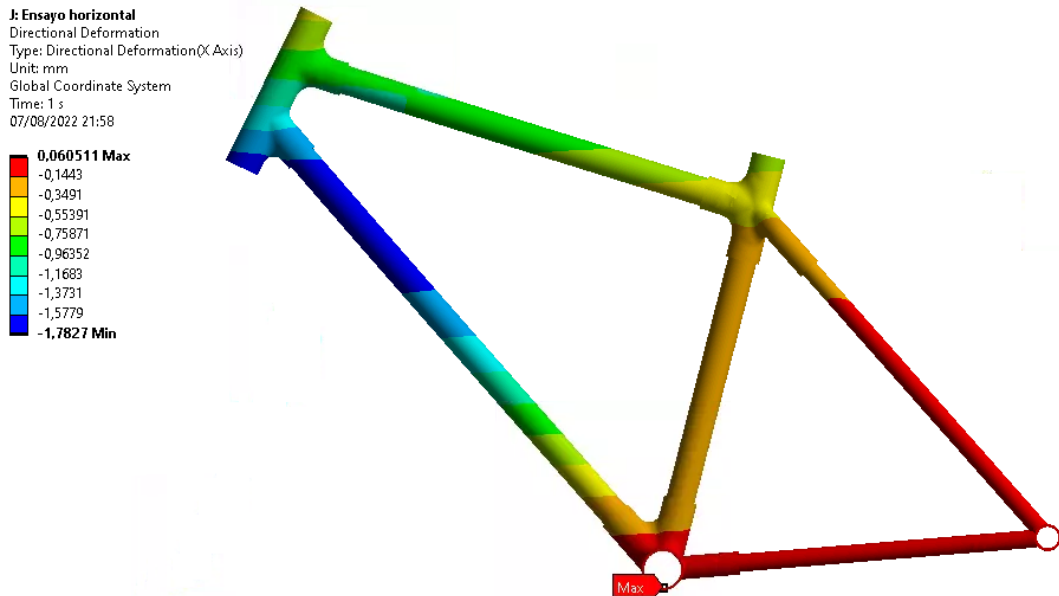


Ilustración 88: Resultado de deformación en dirección X en el cuadro- Ensayo fuerzas horizontales

Cumplimiento de requisitos

Observando las imágenes anteriores se puede observar que en ninguno de los casos se producen fallos en el material compuesto con unos factores de seguridad muy por encima del establecido como criterio de conformidad.

Consultando los resultados se puede apreciar que la flecha máxima no podría alcanzar en ningún caso el límite establecido por la norma. Asimismo, los resultados tensionales están muy por debajo de los límites propios del material compuesto utilizado.

➤ Ensayo 4- Ensayo con una fuerza vertical

En este ensayo se adjuntan igualmente resultados tensionales, de deformación total y en dirección longitudinal y resultados de los criterios de fallo.

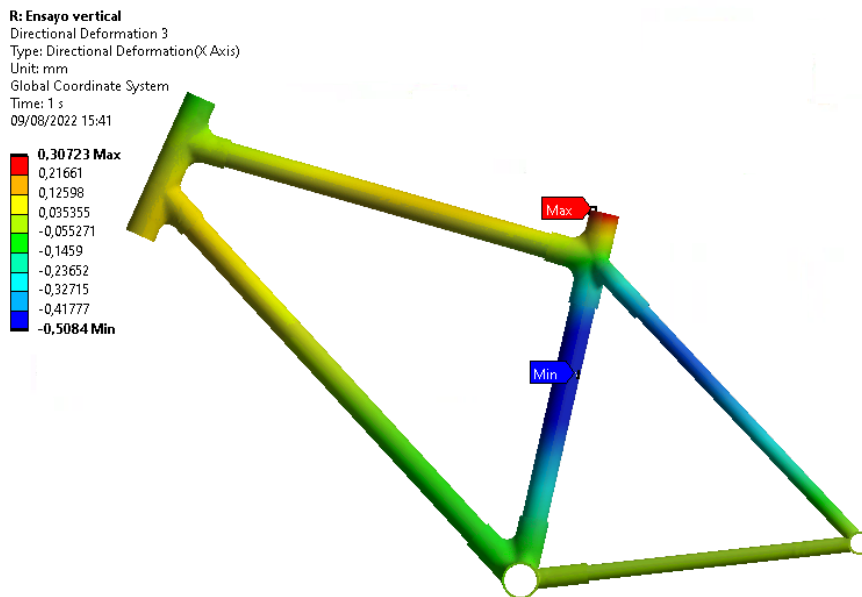


Ilustración 89: Resultado de deformación en dirección X en el cuadro- Ensayo fuerzas verticales

R: Ensayo vertical
Directional Deformation 2
Type: Directional Deformation(X Axis)
Unit: mm
Global Coordinate System
Time: 1 s
09/08/2022 15:40

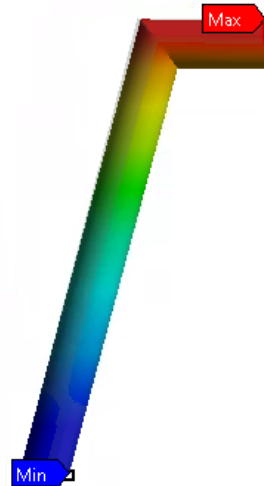
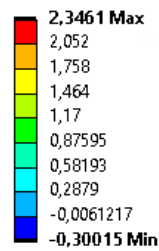


Ilustración 90: Resultado de deformación en dirección X en la tija- Ensayo fuerzas verticales

R: Ensayo vertical
Maximum Principal Stress 3
Type: Maximum Principal Stress - Top/Bottom - Layer 0
Unit: MPa
Time: 1 s
09/08/2022 15:39

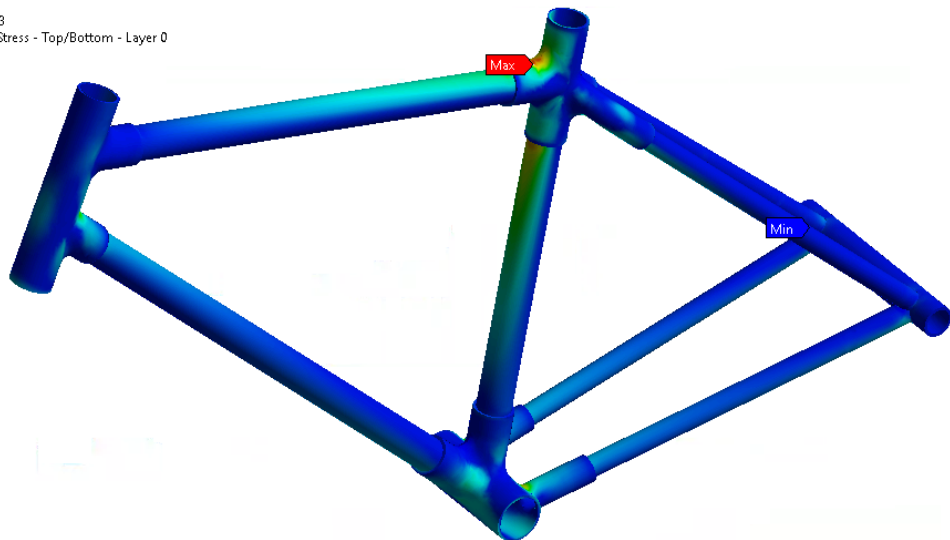
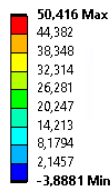


Ilustración 91: Resultado de máxima tensión principal en el cuadro- Ensayo fuerzas verticales

En este caso, se adjunta en la Ilustración 92, únicamente el criterio de fallo de Maximum Stress en el cual solo se destacan los elementos que tienen valores de factor de seguridad menores a 10.

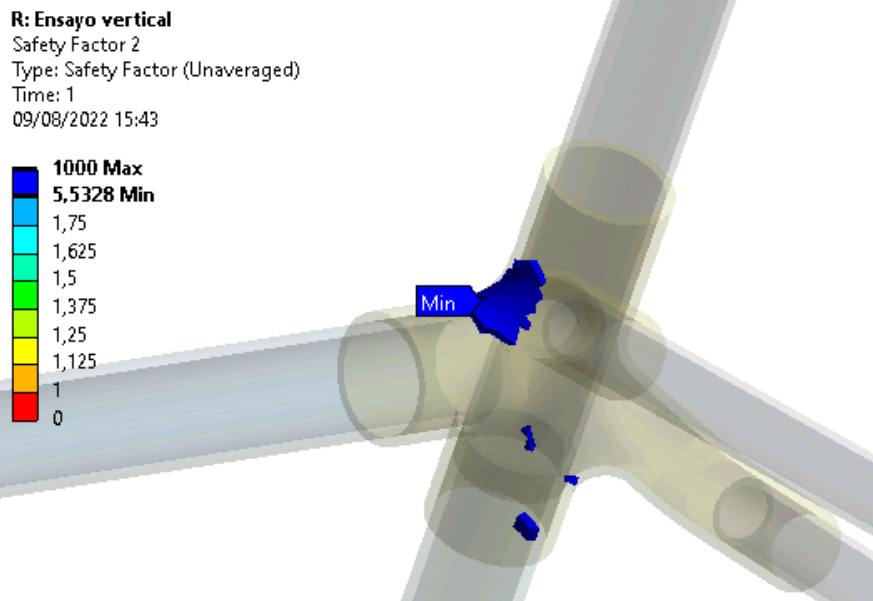


Ilustración 92: Max stress criterion con $FS < 10$

De la misma forma que se indicó en los resultados del ensayo con fuerzas horizontales, se presenta en la Ilustración 93, el esquema de la flecha considerada para analizar posteriormente los resultados de deformación.



Ilustración 93: Indicación flecha

Cumplimiento de requisitos

Tras analizar los resultados se puede apreciar que el estado tensional del cuadro tras el ensayo está por debajo de los límites del material compuesto. Asimismo, los resultados de

los diferentes criterios de fallo dan unos factores de seguridad muy altos lo que significa que el riesgo de cualquier fallo en el material compuesto es mínimo.

En lo referente al segundo requisito, los resultados de deformación en la tija, son menores que el límite requerido para superar el ensayo.

Ensayo 5- Ensayo pedaleo en pendiente

Se presentan a continuación, los resultados obtenidos de la simulación del ensayo de pedaleo en pendiente.

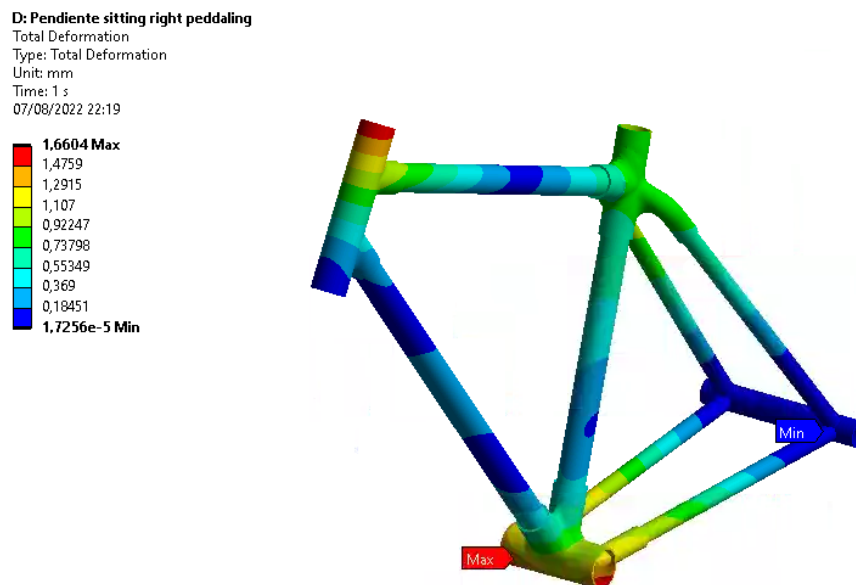


Ilustración 94: Resultado de deformación total - Ensayo pedaleo en pendiente

D: Pendiente sitting right peddaling
Maximum Principal Stress
Type: Maximum Principal Stress - Top/Bottom - Layer 0
Unit: MPa
Time: 1 s
07/08/2022 22:20

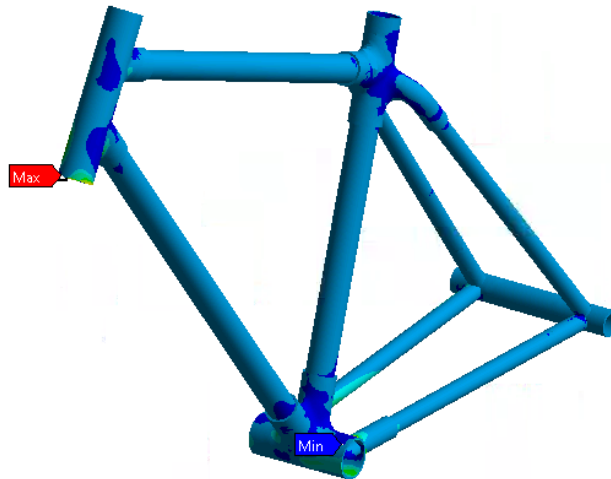
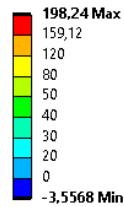


Ilustración 95: Resultado de máxima tensión principal - Ensayo pedaleo en pendiente

Se puede observar que los niveles tensionales producidos en el cuadro no son muy altos; además de que en general, estos valores son entorno a los 35 MPa a excepción de los puntos más cercanos a las zonas donde se imponen las condiciones de contorno.

D: Pendiente sitting right peddaling
Frictional Stress
Type: Frictional Stress - Top/Bottom - Layer 0
Unit: MPa
Time: 1 s
07/08/2022 22:22

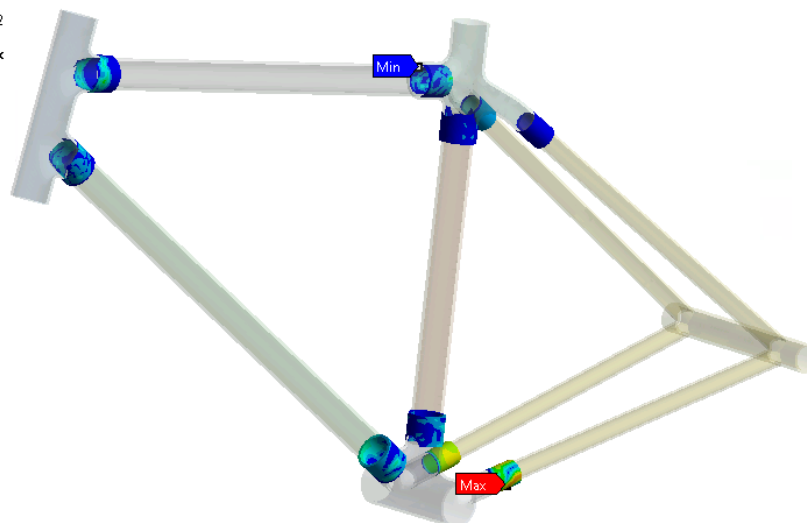
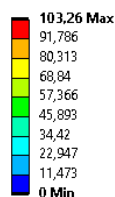


Ilustración 96: Resultado frictional stress Ensayo Pedaleo en Pendiente

Se adjunta a continuación, los resultados de los criterios de fallo tanto de Maximum Stress como Tsai-Hill y Tsai-Wu.

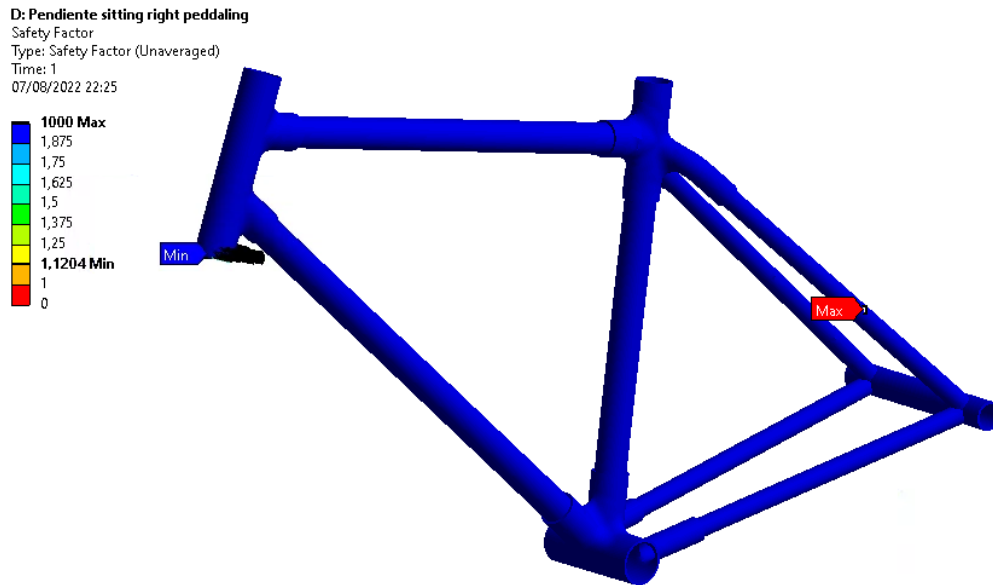


Ilustración 97: Max stress Criterion

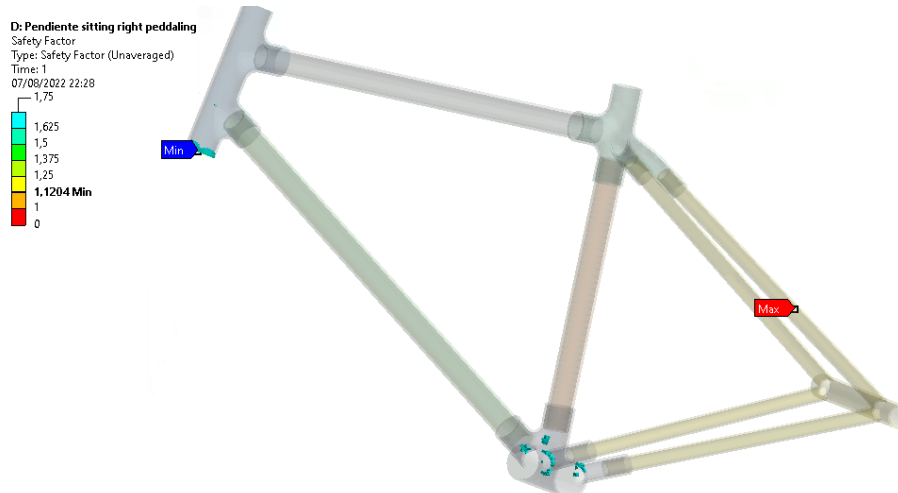


Ilustración 98: Max stress criterion con FS<4

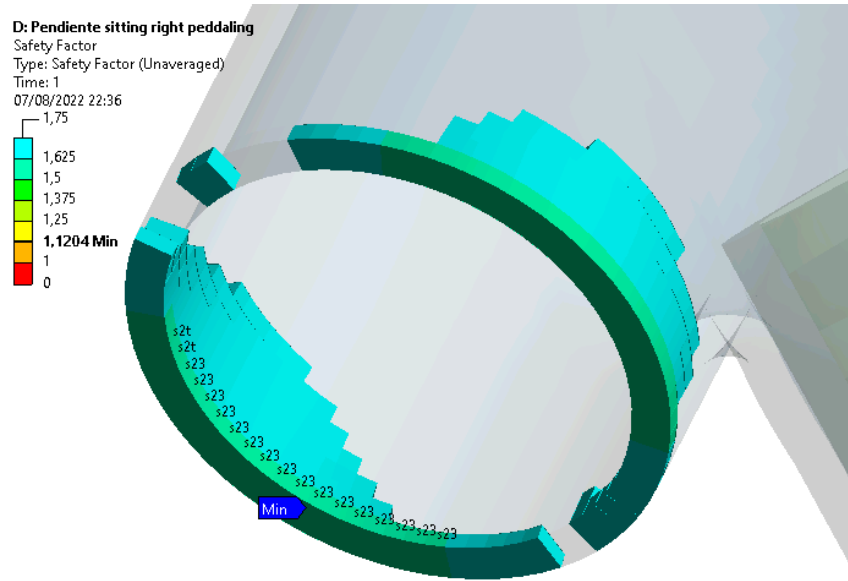


Ilustración 99: Detalle tipo de fallo para resultados de $FS < 2$

El resultado S23 identifica fallo por esfuerzo cortante. En la siguiente imagen se muestran los tipos de fallos que se pueden dar según el criterio de fallo de Maximum Stress.

Maximum Stress Configuration

	Name	Weighting Factor
<input checked="" type="checkbox"/>	Fiber Failure (s1)	1
<input checked="" type="checkbox"/>	Matrix Failure (s2)	1
<input checked="" type="checkbox"/>	In-Plane Shear Failure (s12)	1
<input checked="" type="checkbox"/>	Out-of-Plane Shear Failure (s13)	1
<input checked="" type="checkbox"/>	Out-of-Plane Shear Failure (s23)	1
<input checked="" type="checkbox"/>	Delamination (s3)	1

Ilustración 100: Fallos según el criterio de fallo Maximum Stress



Ilustración 101: Tsai-Hill criterion



Ilustración 102: Tsai-Wu criterion

Se puede observar en la Ilustración 98, Ilustración 101 e Ilustración 102, que los valores mínimos en este caso son similares, difiriendo más el de Maximum Stress cuyo valor mínimo es algo menor. Sin embargo, se puede observar que esos casos se dan en puntos críticos donde se han aplicado las condiciones de contorno y cuyos resultados no son del todo fiables.

Cumplimiento de requisitos

Tras analizar los resultados se puede concluir que la estructura de apilado es correcta para garantizar que tras los ensayos no se produzca ninguna fisura o rotura en el material compuesto.

En la siguiente sección se realiza un estudio de vibraciones del cuadro analizando los diferentes modos de vibración del cuadro y sus respectivas frecuencias. Asimismo, se simulará un ensayo utilizando un power spectral density (PSD) cuyos datos fueron tomados durante un recorrido en bicicleta.

4.4 ANÁLISIS DE VIBRACIONES

En este apartado se va a realizar un análisis vibratorio del cuadro con el fin de tener en cuenta sus modos y frecuencias naturales y analizar el comportamiento del cuadro con un espectro de frecuencias medido en una situación real.

En la Tabla 19, se muestran los 10 primeros modos naturales y sus frecuencias del cuadro en su diseño final.

Tabla 19: Modos y frecuencias del cuadro

MODO	FRECUENCIA (Hz)
1,	97,538
2,	145,44
3,	256,9
4,	287,09
5,	331,14
6,	335,35
7,	393,11
8,	417,42
9,	457,65
10,	498,98

La frecuencia más baja está en 100Hz, sin embargo, lo que interesa conocer es cuáles de esos modos tienen un ratio alto de participación en el eje z. La gran mayoría de las vibraciones que afectan a una bicicleta es debidas al terreno y, por tanto, en dirección z a través de los neumáticos.

EFFECTIVE MASS										
MODE	FREQUE NCY	MODAL MASS	KENE	X-DIR	RATIO%	Y-DIR	RATIO%	Z-DIR	RATIO%	
1	97.54	5.99E-04	112.4	1.90E-10	0	9.71E-04	73.48	2.06E-10	0	
2	145.4	3.31E-04	138	1.92E-09	0	6.84E-07	0.05	7.98E-10	0	
3	256.9	1.93E-04	251.6	1.91E-09	0	1.07E-04	8.11	1.04E-09	0	
4	287.1	2.72E-04	442.1	1.79E-04	13.53	4.97E-09	0	3.30E-05	2.5	
5	331.1	2.32E-04	501.3	1.74E-04	13.15	3.09E-09	0	1.79E-04	13.54	
6	335.4	2.07E-04	460.1	6.01E-07	0.05	1.92E-07	0.01	7.96E-07	0.06	
7	393.1	1.83E-04	557.6	2.94E-08	0	6.76E-07	0.05	1.10E-07	0.01	
8	417.4	1.86E-04	638.1	1.35E-06	0.1	8.41E-10	0	3.15E-04	23.84	
9	457.6	8.62E-05	356.4	5.84E-05	4.42	7.23E-08	0.01	1.34E-05	1.01	
10	499	1.15E-04	566.9	5.49E-08	0	1.76E-05	1.33	3.54E-08	0	
sum				4.13E-04	31.26	1.10E-03	83.04	5.41E-04	40.97	

Tabla 20: Resumen de las masas modales, las energías cinéticas y las masas efectivas traslacionales

Se muestran en las siguientes imágenes la forma de los modos en la que se da mayor participación en cada uno de los ejes.

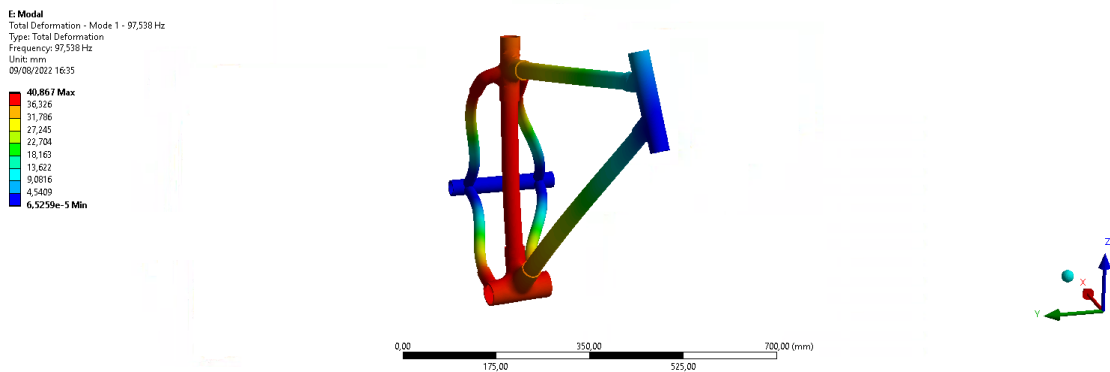


Ilustración 103: Modo 1 a 97Hz con alta participación en el eje Y

E Modal
Total Deformation - Mode 4 - 287,09 Hz
Type: Total Deformation
Frequency: 287,09 Hz
Unit: mm
09/08/2022 16:36

75,964 Max
67,532
59,009
50,667
42,234
33,801
25,368
16,936
8,5038
0,071203 Min



Ilustración 104: Modo 4 a 287Hz con alta participación en el eje X

E Modal
Total Deformation - Mode 8 - 417,42 Hz
Type: Total Deformation
Frequency: 417,42 Hz
Unit: mm
09/08/2022 16:37

76,309 Max
67,876
59,443
51,009
42,576
34,143
25,709
17,276
8,8436
0,40522 Min



Ilustración 105: Modo 8 a 417Hz con alta participación en el eje Z

El modo cuya participación en Z es mayor, se da a una frecuencia mínima de 417 Hz, por lo que, como se verá a continuación, las frecuencias que le llegan a la bicicleta normalmente están muy por debajo de esos valores.

4.4.1 ANÁLISIS DE DATOS Y ARMÓNICO

Se montó en la bicicleta el móvil en la parte trasera cerca del eje trasero con el fin de obtener datos más precisos. Para realizar las mediciones se utilizó una aplicación del móvil: Physics Tool. Esta aplicación medía los niveles de aceleración en los tres ejes en m/s^2 . Para el procesamiento de datos y la generación de las diferentes gráficas se ha utilizado MATLAB.

Se realizaron dos recorridos diferentes: uno por carretera y otro por campo. Las muestras recogidas se muestran en la Ilustración 106 e Ilustración 107.

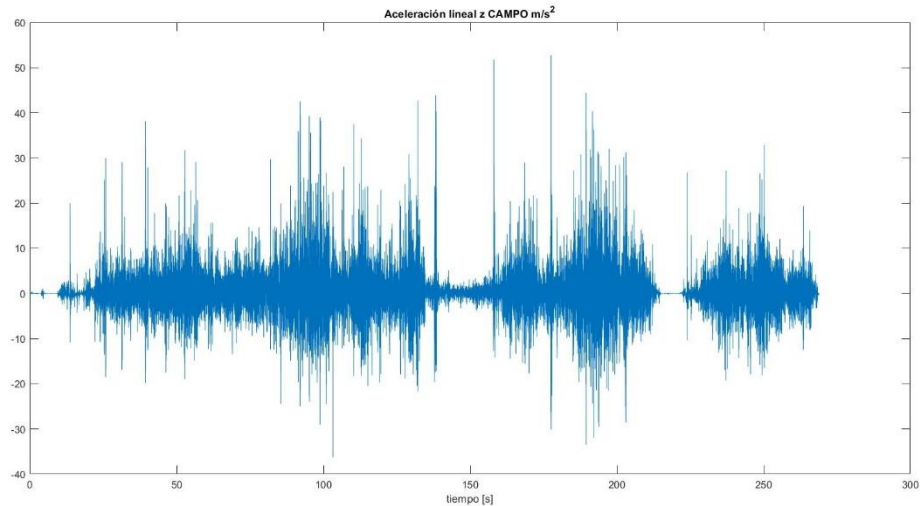


Ilustración 106: Datos recogidos en campo

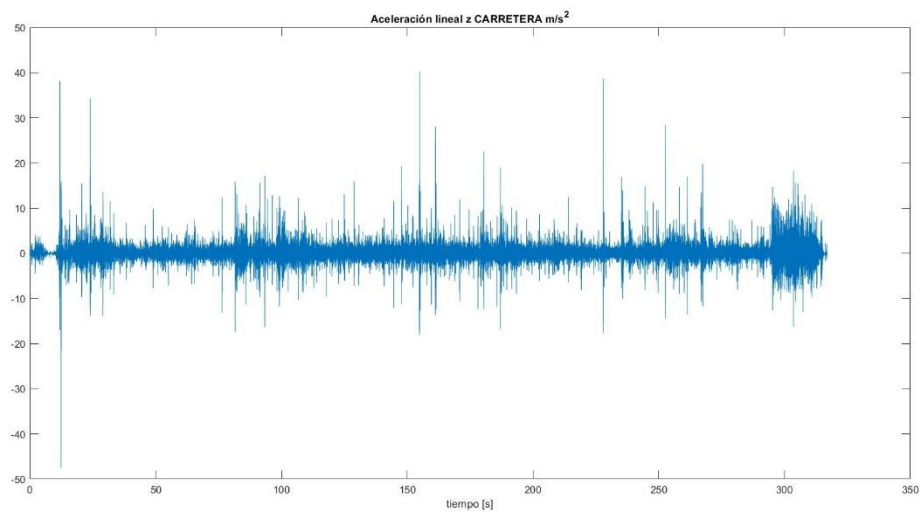


Ilustración 107: Datos recogidos por carretera

Las muestras recogidas tienen aproximadamente una duración de 5 minutos y representan la aceleración medida en m/s^2 . Se puede apreciar comparándolas, que el recorrido por carretera es mucho más suave que por campo y, por tanto, los picos son mayores y más constantes.

En la Ilustración 108 e Ilustración 109, se adjuntan los resultados en frecuencia de estas dos muestras.

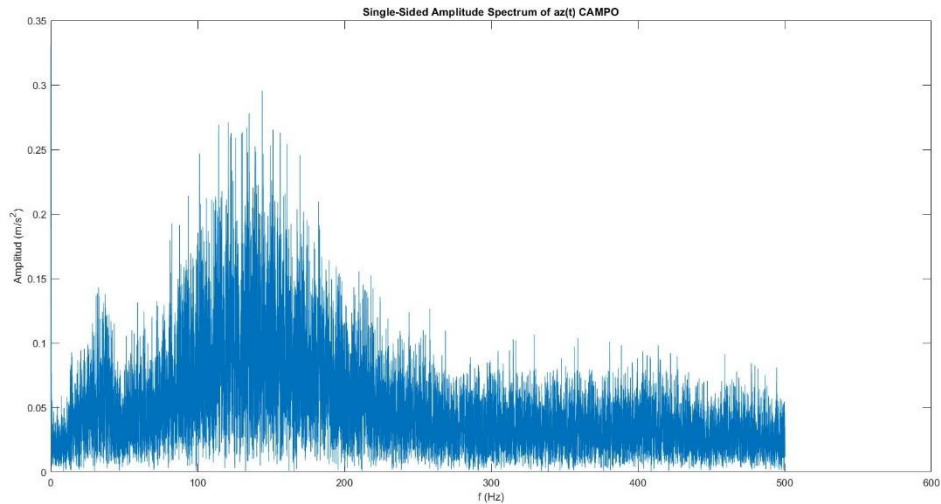


Ilustración 108: Respuesta en frecuencia de los datos de campo

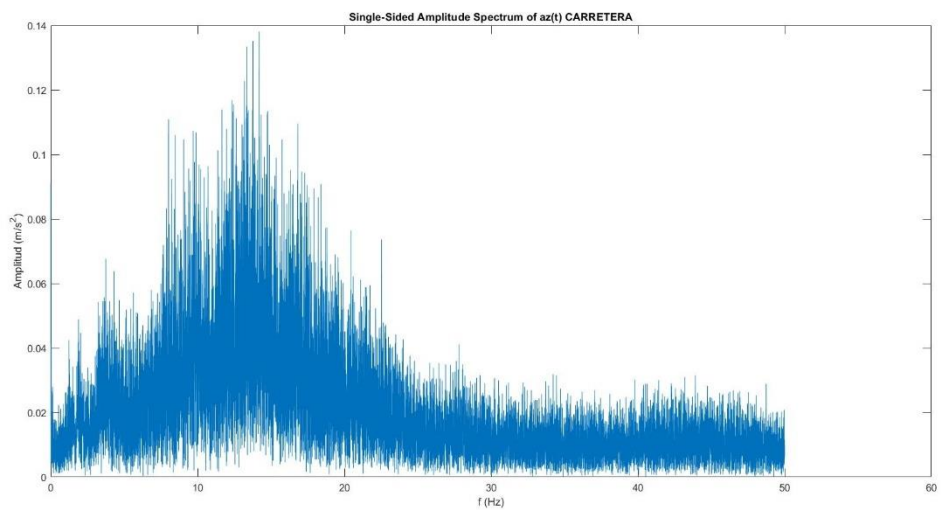


Ilustración 109: Resultado en frecuencia de los datos de carretera

Comparando ambas gráficas, la principal diferencia es el rango de frecuencias en ambas muestras. En el recorrido por campo las frecuencias a las que se ve sometida a bicicleta son más altas que las que se dan si el recorrido es por carretera. Lo mismo ocurre con la amplitud, siendo golpes más intensos por campo que por carretera.

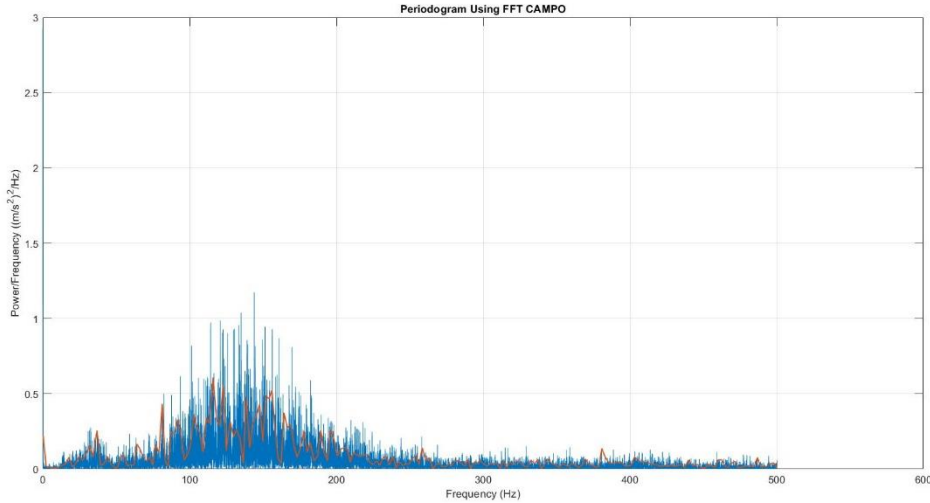


Ilustración 110: PSD datos de campo

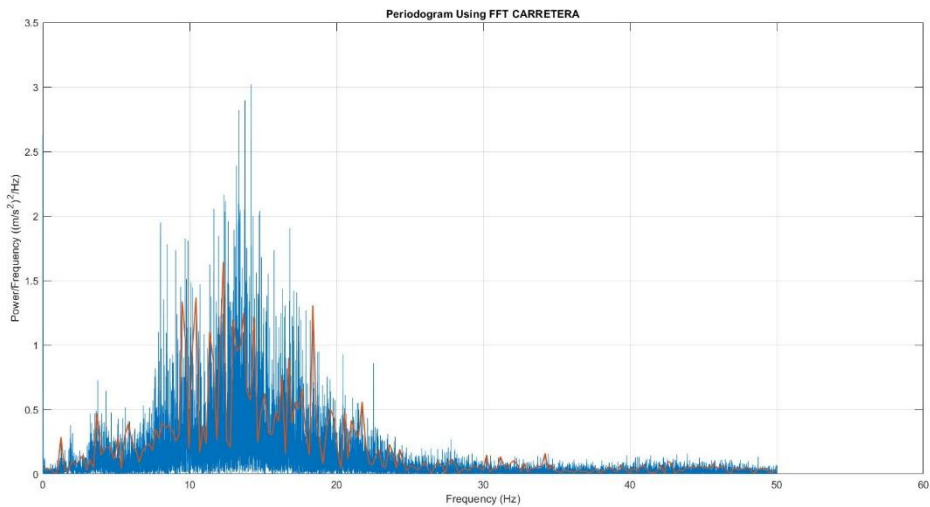


Ilustración 111: PSD datos de carretera

Finalmente se calcula el espectro en frecuencia (PSD, Power Spectral Density) en $(m/s^2)^2/Hz$ con el fin de utilizarlo como input en un Harmonic Analysis en ANSYS y así comprobar el impacto que tendría estos niveles de energía en el cuadro diseñado. Sin embargo, los datos de las gráficas en azul de ambos PSD, son demasiados como para introducirlos en el módulo y simular, por lo que se ha recogido una pequeña muestra tomando algunos picos, resultado ser la gráfica que se halla en color rojo en ambos gráficos.

Los resultados a los PSD son los siguientes.

F: Random Vibration

Equivalent Stress
Type: Equivalent Stress - Top/Bottom - Layer 0
Scale Factor Value: 3 Sigma
Probability: 99,73 %
Unit: MPa
Time: 0 s
11/08/2022 0:14

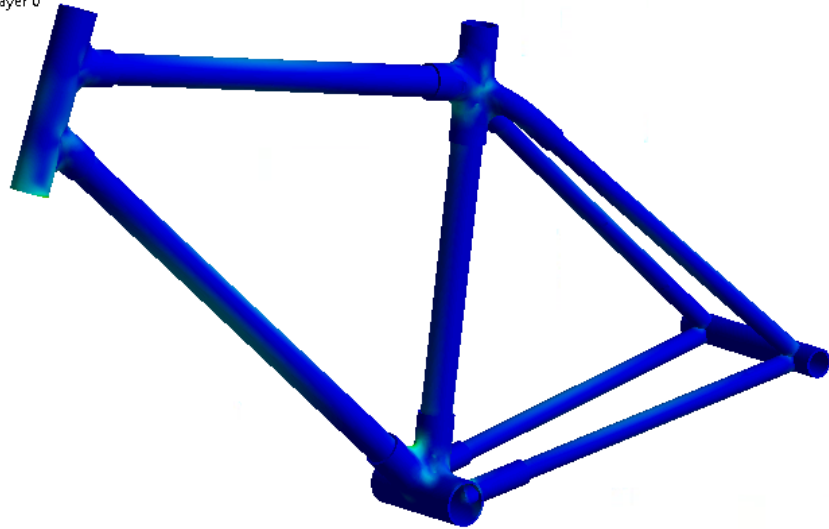
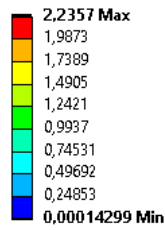


Ilustración 112: Resultado tensional con PSD de datos de campo

F: Random Vibration

Directional Deformation
Type: Directional Deformation(Z Axis)
Scale Factor Value: 3 Sigma
Probability: 99,73 %
Unit: mm
Solution Coordinate System
Time: 0 s
11/08/2022 0:15

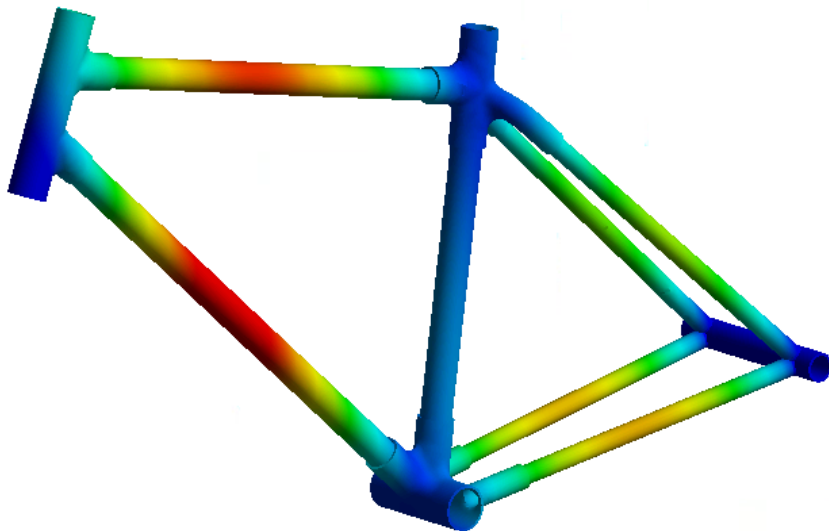
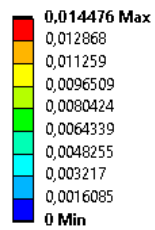


Ilustración 113: Resultado deformación con PSD de datos de campo

F: Random Vibration

Equivalent Stress
Type: Equivalent Stress - Top/Bottom - Layer 0
Scale Factor Value: 3 Sigma
Probability: 99,73 %
Unit: MPa
Time: 0 s
11/08/2022 0:22

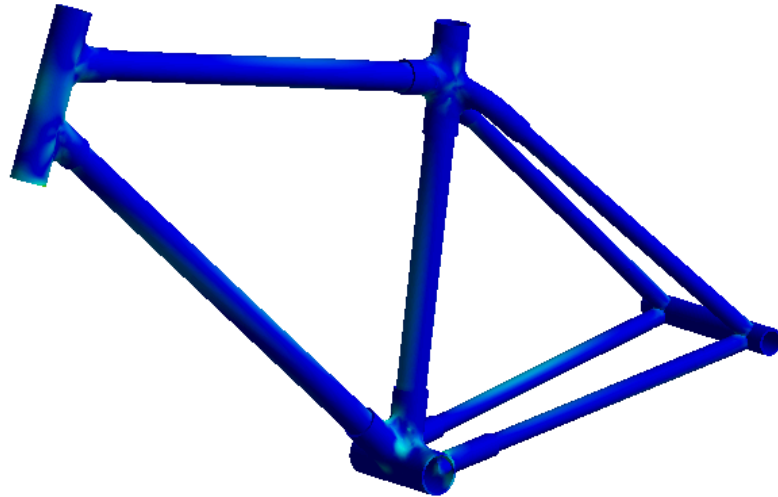
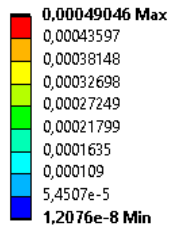


Ilustración 114: Resultado tensional con PSD de datos de carretera

F: Random Vibration

Directional Deformation
Type: Directional Deformation(Z Axis)
Scale Factor Value: 3 Sigma
Probability: 99,73 %
Unit: mm
Solution Coordinate System
Time: 0 s
11/08/2022 0:18

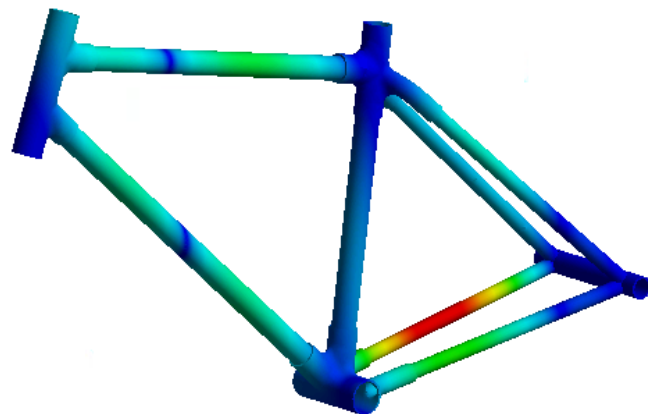
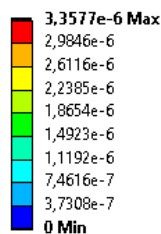


Ilustración 115: Resultado deformación con PSD de datos de carretera

Como se esperaba, el cuadro no se ve prácticamente afectado por las vibraciones introducidas por lo que el diseño bajo únicamente las vibraciones del suelo en caso de que no lleve montada suspensión es aceptable, tanto en campo como en carretera.

Capítulo 5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Tras el presente trabajo de estudio y análisis, se ha conseguido obtener un modelo de cuadro cuyo diseño está justificado y razonado desde el punto de vista estructural, superando los ensayos que especifica la norma referente a los cuadros de bicicleta.

Durante el desarrollo del proyecto ha sucedido dificultades que han sido superadas consiguiendo finalmente resultados válidos y analizables. Algunos de ellos son, por ejemplo, aprender a utilizar herramientas y módulos nuevos como el de ANSYS ACP; comenzar y organizar los diferentes croquis de cuadro iniciales; analizar y procesar en Matlab los resultados medidos de la bicicleta; conseguir resultados en los ensayos dinámicos... Todos ellos han sido superados, aprendiendo y mejorando el proceso de análisis FEM, así como el uso de otros programas.

Repasando los objetivos planteados en un principio, una vez terminado el proyecto, se puede afirmar que todos ellos han sido logrados.

Objetivo 1. Se ha conseguido exitosamente desarrollar un proceso de diseño basado en un buen análisis y estudio de los resultados.

Objetivo 2. Tras el aprendizaje del uso del módulo de ACP de ANSYS para el análisis de materiales compuestos se ha comprendido las dificultades de ensayar modelos con materiales compuestos.

Objetivo 3. Se ha adquirido destreza en el uso de herramientas y softwares como es ANYS y Matlab.

Objetivo 4. Como ya se ha introducido antes, durante el transcurso del proyecto se han ido superando diferentes problemas y dificultades, consiguiendo finalmente resultados analizables y con un resultado exitoso para el modelo final del cuadro.

A partir de este proyecto se puede y pretende llevar a cabo la materialización del cuadro en material compuesto, basándose en el método de fabricación descrito en un principio. Este proyecto, bajo el título *Proceso de fabricación de un cuadro de bicicleta en fibra de carbono [7]*, se ha consolidado, consiguiendo exitosamente un cuadro en fibra de carbono usable.

Capítulo 6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] ¿Qué son los prepregs? Rakesh Verma; Jefe de departamento Internacional (Autoclave) y Experto en compuestos ligeros, Soluciones para prototipos y productos de fibra de carbono. Publicación LinkedIn, julio 2019.
- [2] Materiales avanzados y técnicas de unión – Uso de materiales compuestos para cuadros de bicicleta, Proyecto Materiales Avanzados. Alejandra Basurco, Jordi Nadal, Diego Guzmán.
- [3] VTC401 Mechanical properties - Prepreg Carbono-Epoxi VTC401-UD300-T700-24K-37%RW-300P. CastroComposites.
- [4] VTC401 Mechanical properties - Prepreg Carbono-Epoxi MTC510-UD300-HS-33%RW (SHD0373-300P). CastroComposites.
- [5] VTC401 Mechanical properties - Prepreg Carbono-Epoxi VTC401-C200T-T300-2X2T-3K-42%RW. CastroComposites.
- [6] <https://www.fibradecarbono.es/>
- [7] Trabajo de Fin de Máster de Ingeniería Industrial - *Proceso de fabricación de un cuadro de bicicleta en fibra de carbono*, Alejandra Basurco Hernández de Santamaría.
- [8] Casquillo pedalier. https://www.hibike.es/Rodamiento/casquillo_pedalier
- [9] Juegos de dirección. <https://canecreek.com/everything-you-need-to-know-about-headsets/#>
- [10] Juego Dirección Bicicleta 1"1/8 Base Externa Ahead EC34/28.6 EC34/30
<https://www.decathlon.es/>
- [11] Norma española UNE-EN ISO 4210-6 (2015) Ciclos. Requisitos de seguridad para bicicletas.
- [12] Norma para la ejecución de las pruebas de ensayo de los materiales compuestos ISO 527-5 Plastics - Determination of tensile properties - Part 5: Test conditions for unidirectional fibre-reinforced plastic composites (ISO 527-5:2021)
- [13] Dimensiones de las probetas para los ensayos de los preimpregnados [Specimen IBA dimensions \(BS EN ISO 527:2012\), Specimen thickness was 3mm. | Download Scientific Diagram \(researchgate.net\)](#)
- [14] Criterios de fallo materiales compuestos <https://ansyshelp.ansys.com/>

Capítulo 7. ANEXOS

7.1 PLANOS DEL CUADRO Y COMPONENTES

H G F E D C B A

4

3

2

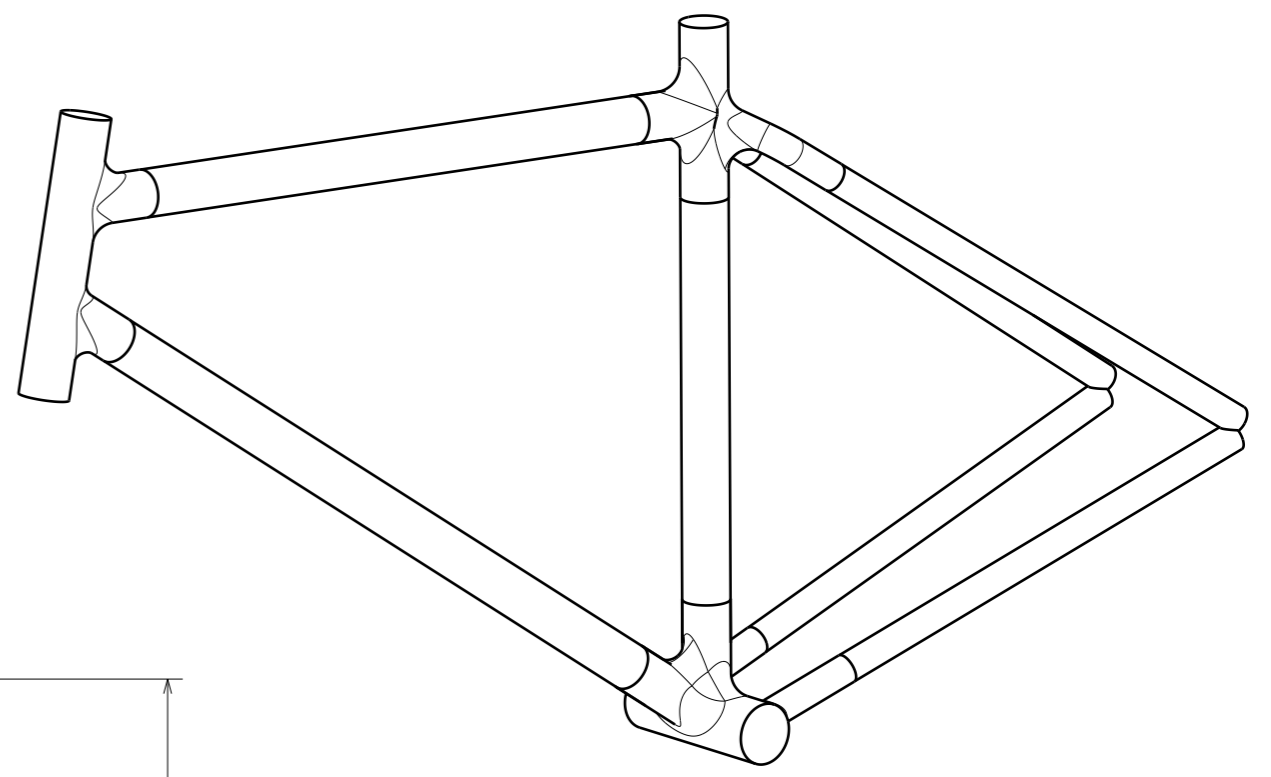
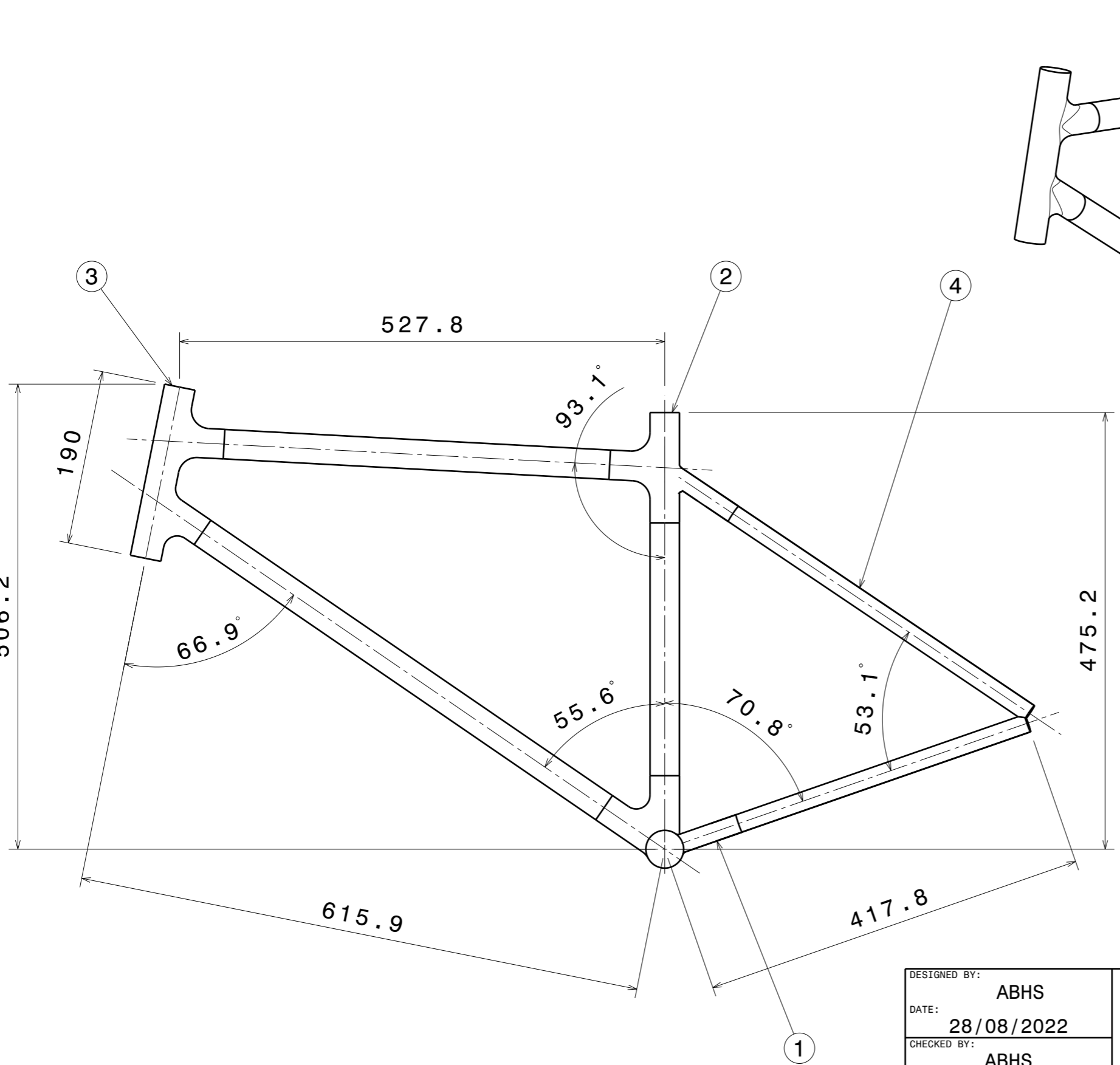
1

4

3

2

1



Bill of Material: CUADRO

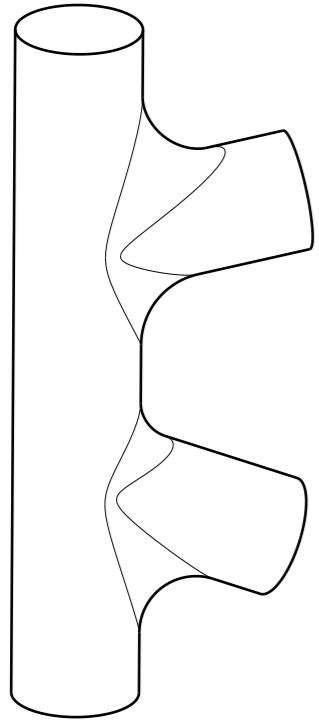
Part Number	Number
Pedalier	1
Sillín	2
Manillar	3
Tubos	4

DESIGNED BY: ABHS	<h1>CUADRO</h1>			I	-
DATE: 28/08/2022				H	-
CHECKED BY: ABHS	<h2>Ensamblaje</h2>			G	-
DATE: 28/08/2022				F	-
SIZE A3	<h3>999 - CUADRO</h3>			E	-
SCALE 1:5				D	-
WEIGHT (kg) 1,135	<h3>1/5</h3>		C	-	
DRAWING NUMBER 999 - CUADRO			B	-	
This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.			A	-	

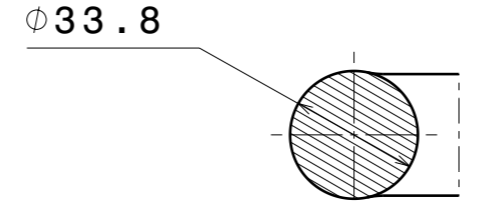
H G B A

H G F E D C B A

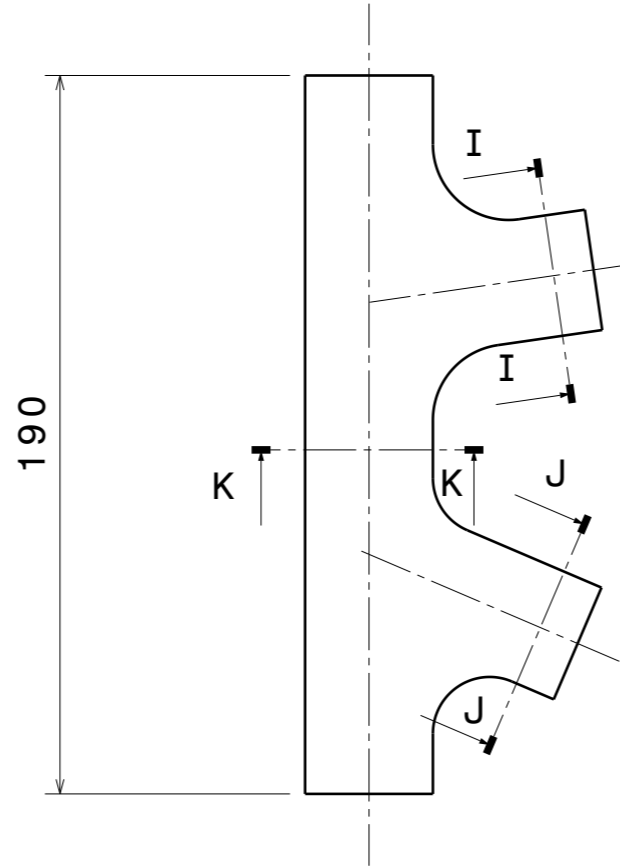
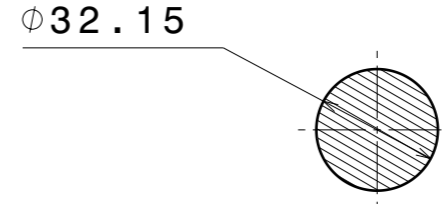
4
3
2
1



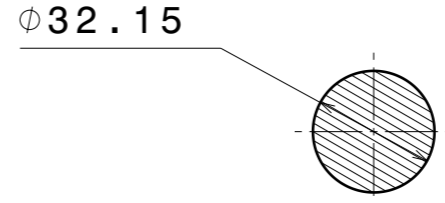
Section view K-K



Section view I-I



Section view J-J



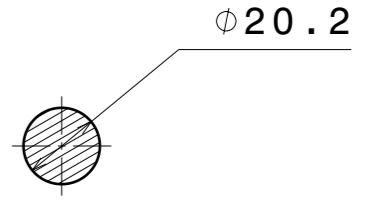
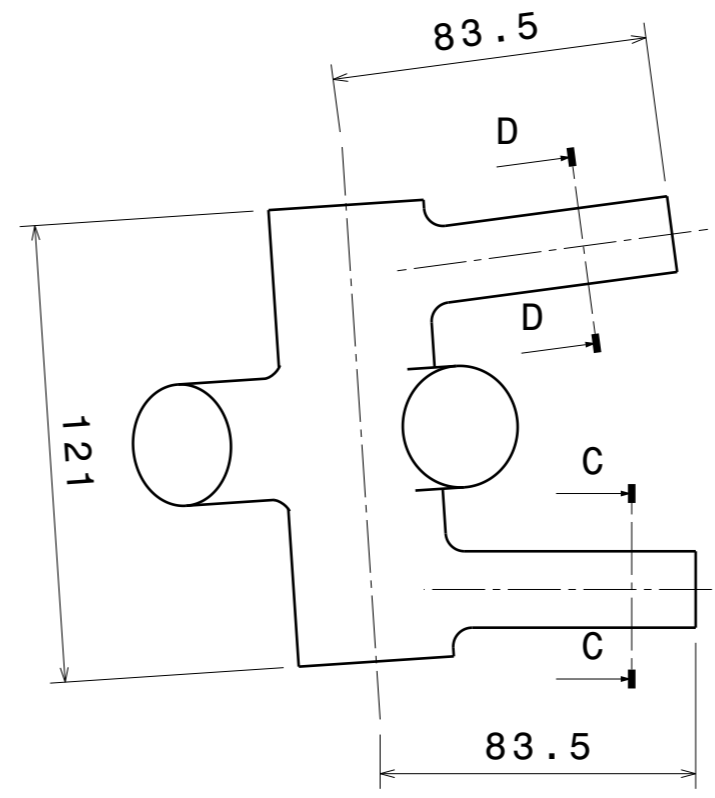
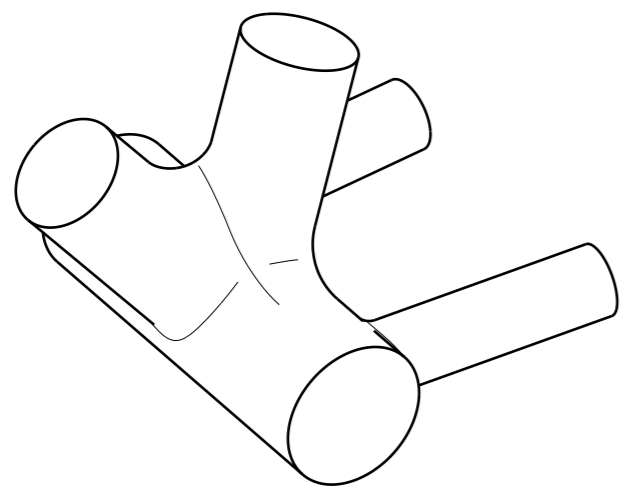
DESIGNED BY: ABHS	MANILLAR		I	-
DATE: 28/08/2022			H	-
CHECKED BY: ABHS	CUADRO		G	-
DATE: 28/08/2022			F	-
SIZE A3		DRAWING NUMBER 003-MANILLAR	E	-
SCALE 1:2	WEIGHT (kg) -		SHEET 4/5	D
This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.			C	-
			B	-
			A	-

H G B A

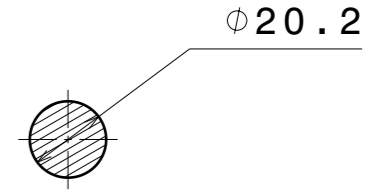
H G F E D C B A

4

4



Section view D-D



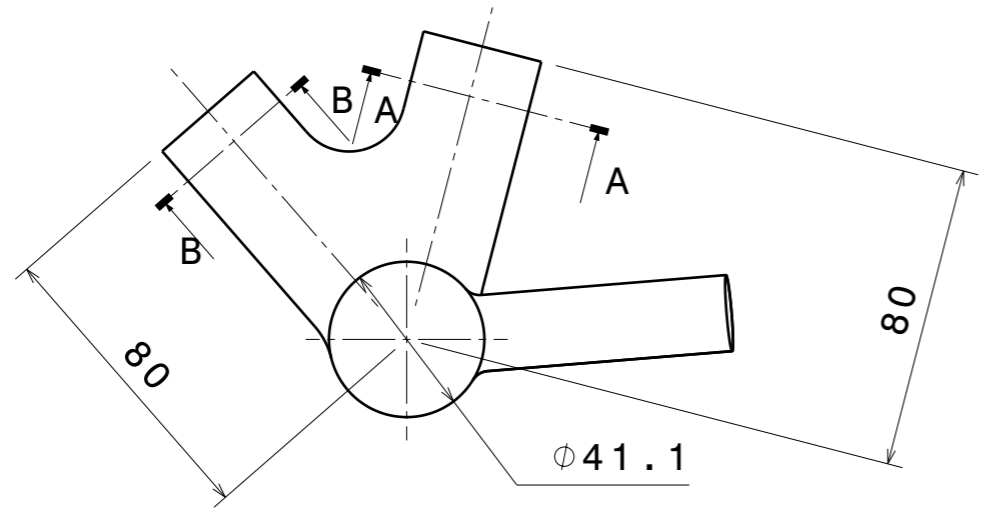
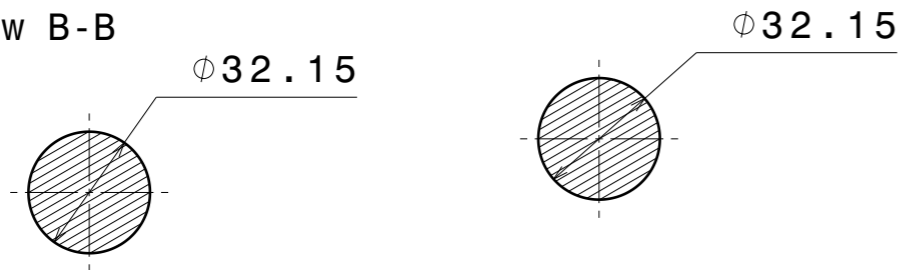
Section view C-C

3

3

Section view A-A

Section view B-B



2

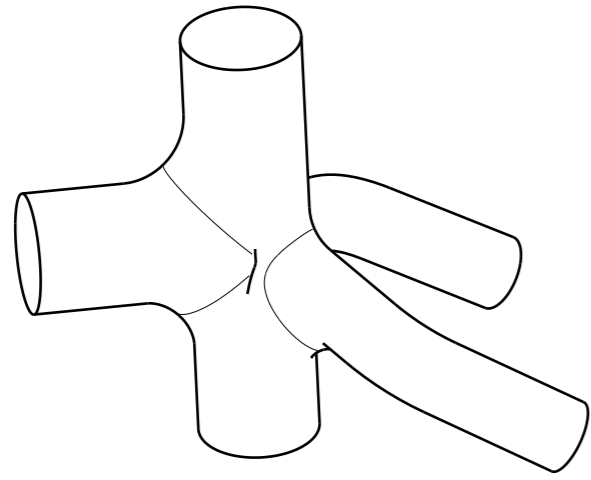
2

1

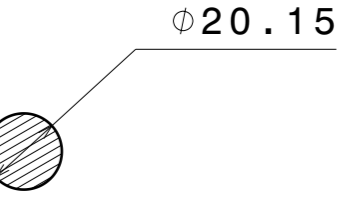
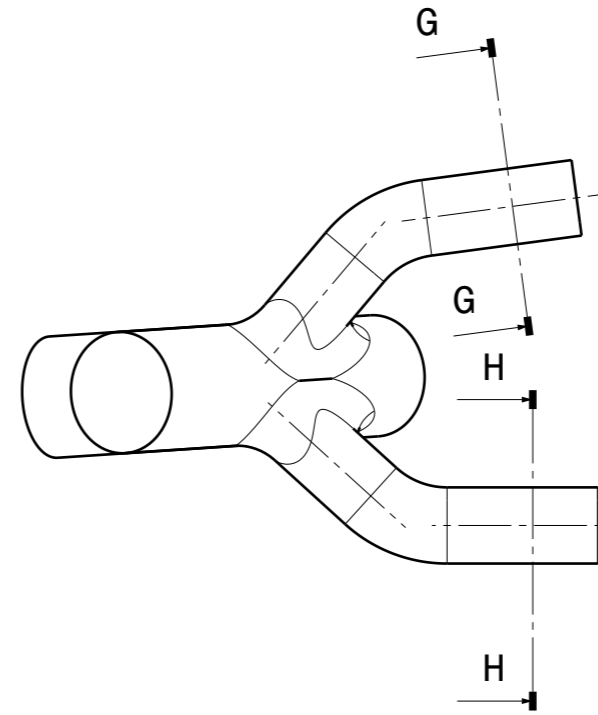
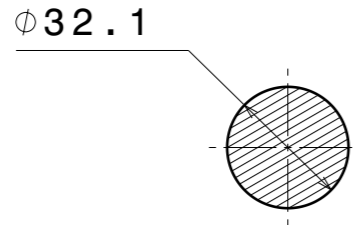
1

DESIGNED BY: ABHS	<h1>PEDALIER</h1>			I	-	
DATE: 28/08/2022				H	-	
CHECKED BY: ABHS	<h1>CUADRO</h1>			G	-	
DATE: 28/08/2022				F	-	
SIZE A3		<h1>001 - PEDALIER</h1>			E	-
SCALE 1:2	WEIGHT (kg) -				DRAWING NUMBER	SHEET 2/5
<h1>001 - PEDALIER</h1>				C	-	
				<h1>001 - PEDALIER</h1>		
This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.						

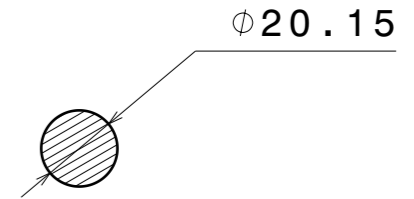
H G F E D C B A



Section view E-E

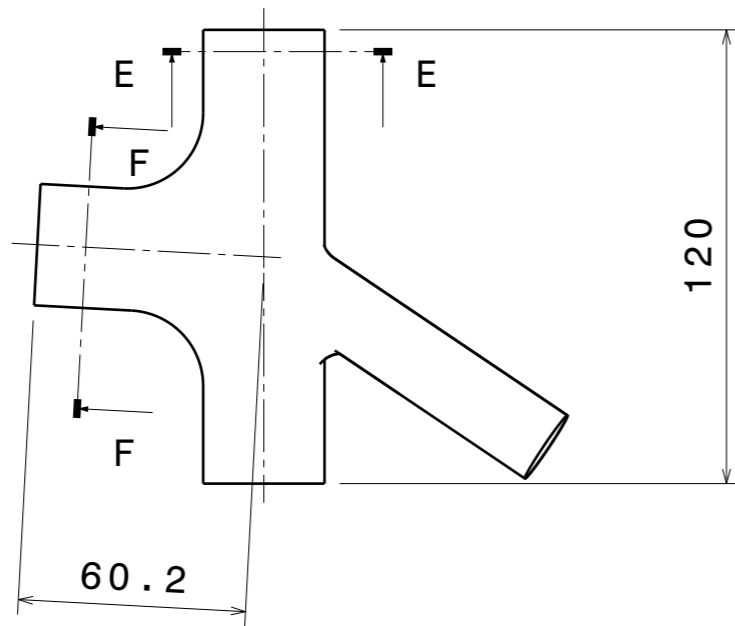
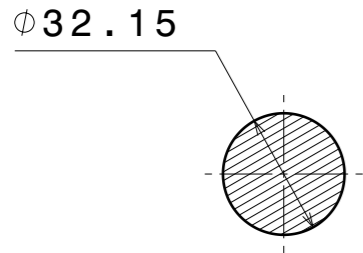


Section view G-G



Section view H-H

Section view F-F

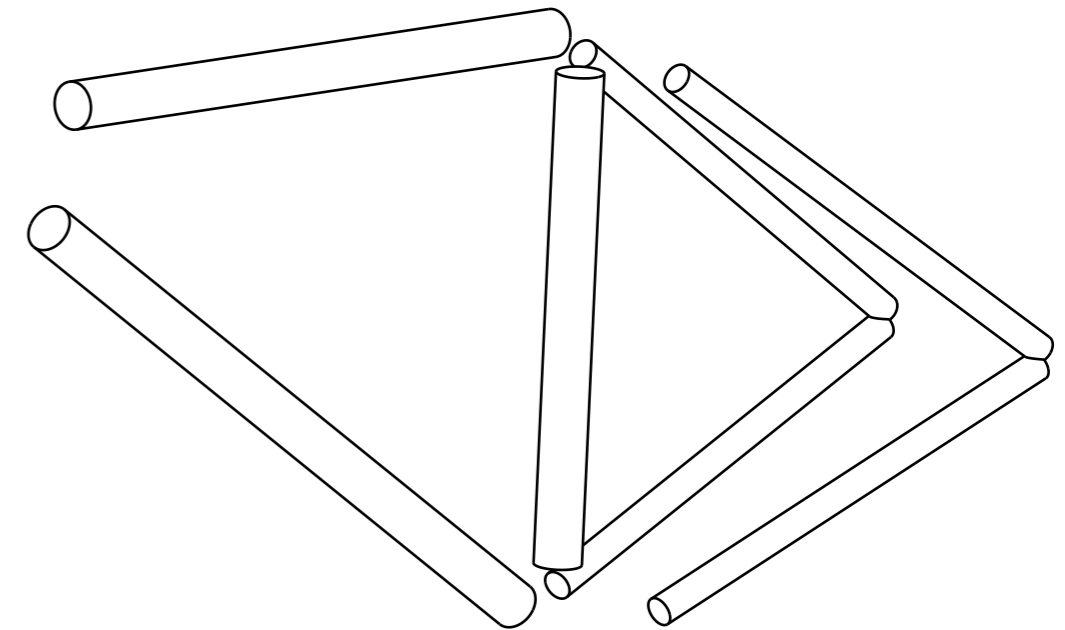
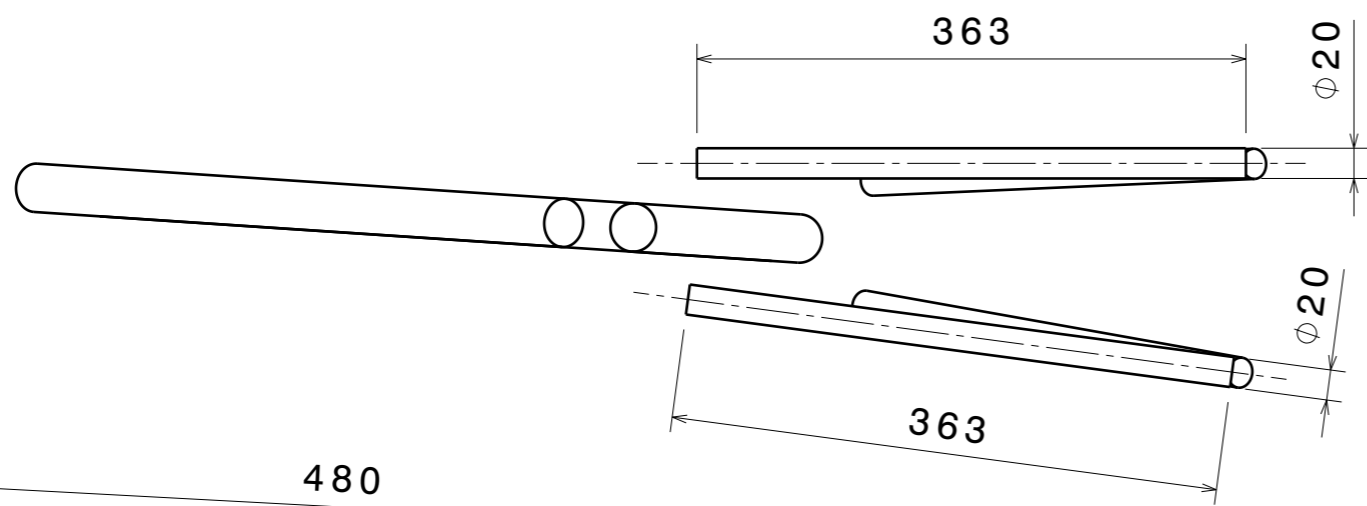


DESIGNED BY: ABHS	<h1>SILLÍN</h1>		I	-
DATE: 28/08/2022			H	-
CHECKED BY: ABHS			G	-
DATE: 28/08/2022	<h1>CUADRO</h1>		F	-
SIZE A3			E	-
SCALE 1:2			D	-
WEIGHT (kg) -	DRAWING NUMBER 002-SILLÍN	SHEET 3/5	C	-
This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.			B	-
			A	-

H G F E D C B A

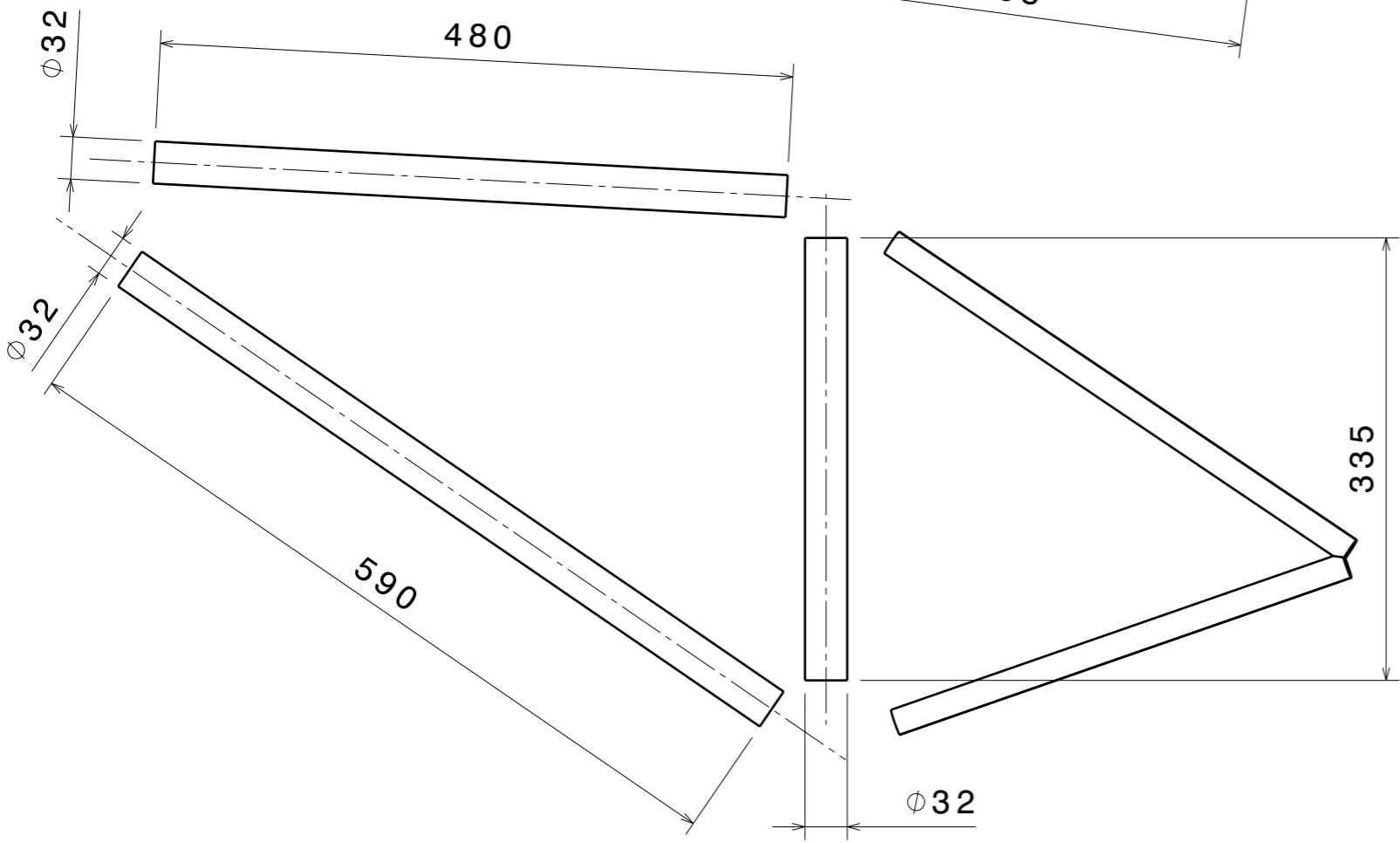
4

4



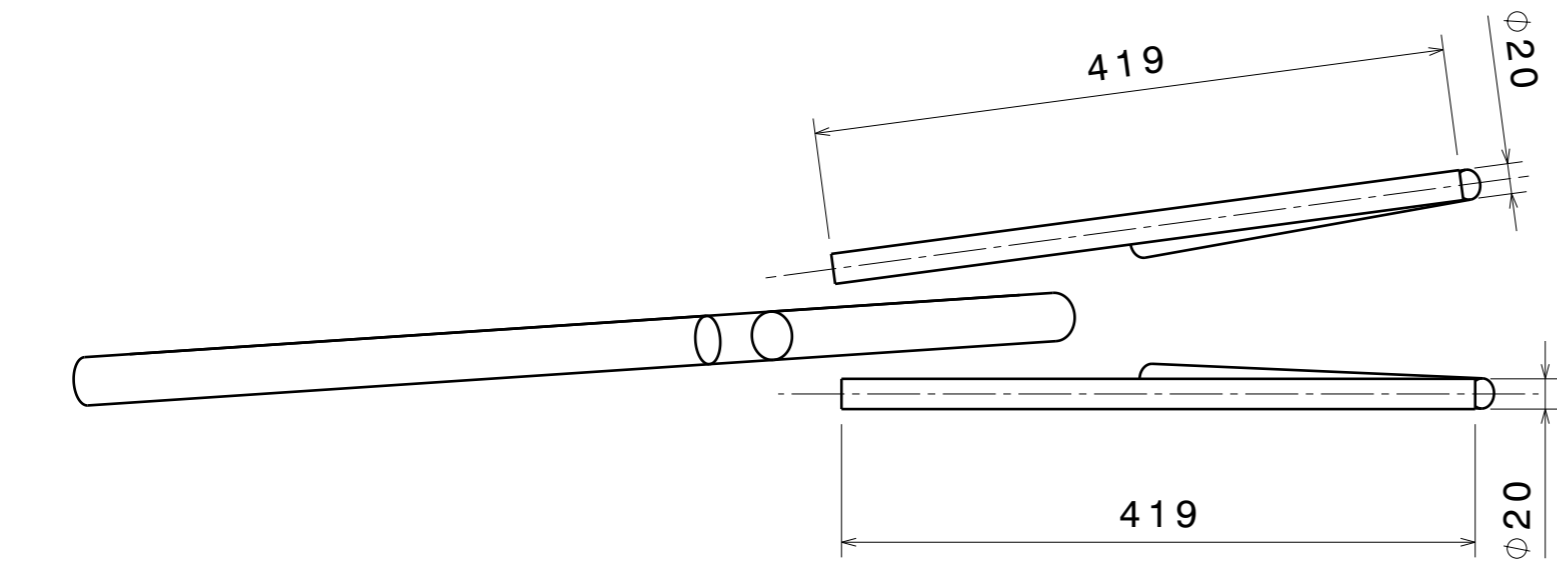
3

3



2

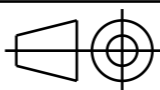
2



1

1

H G F E D C B A

DESIGNED BY: ABHS	<h1>TUBOS</h1>		I	-
DATE: 28/08/2022			H	-
CHECKED BY: ABHS	<h1>CUADRO</h1>		G	-
DATE: 28/08/2022			F	-
SIZE: A3		<h1>004 - TUBOS</h1>	E	-
SCALE: 1:5	WEIGHT (kg): -		D	-
DRAWING NUMBER:		<h1>5/5</h1>	C	-
DRAWING NUMBER: 004 - TUBOS			B	-
SHEET:		A	-	

This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.