



MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

PROCESO DE FABRICACIÓN 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
Proceso de fabricación de un cuadro de bicicleta en fibra de carbono en la ETS de Ingeniería -
ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico 2021/2022 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: 22/08/2022

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO



Fdo.: Alberto Carnicero López, Ángel Rubio López

Fecha: 22/08/2022



TRABAJO FIN DE MÁSTER

PROCESO DE FABRICACIÓN DE UN CUADRO DE
BICICLETA EN FIBRA DE CARBONO

Autor: Alejandra Basurco Hernández de Santamaría

Director: Alberto Carnicero López, Ángel Rubio López

Madrid 2022

PROCESO DE FABRICACIÓN DE UN CUADRO EN FIBRA DE CARBONO

Autor: Alejandra Basurco Hernández de Santamaría

Director: Alberto Carnicero López, Ángel Rubio López.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO

Palabras clave: fibra de carbono, impresión 3D, preimpregnado, fabricación.

1. Introducción

Se ha diseñado, calculado y fabricado un cuadro de bicicleta en material compuesto de fibra de carbono. En el presente documento se recoge la información correspondiente a la fabricación del cuadro, y es continuación del Trabajo Fin de Máster “*Diseño y cálculo de un cuadro de bicicleta en fibra de carbono*” [1], presentado para el Máster en Ingeniería para la Movilidad y Seguridad, realizado por la misma autora de esta memoria.

Para la fabricación del cuadro ha sido necesario un exhaustivo análisis de los procesos de fabricación existentes, y de cómo adaptar lo a las capacidades disponibles en los laboratorios de Comillas-ICAI. De la misma forma, se ha realizado un trabajo de búsqueda de recursos asequibles. Adicionalmente, ha sido necesaria una organización y planificación con el objetivo de llegar a fabricar el cuadro que previamente había sido diseñado y validado mediante análisis de elementos finitos. Todos los objetivos han sido alcanzados, habiéndose fabricado con éxito un cuadro de bicicleta de material compuesto de fibra de carbono a partir de herramientas y equipos de la universidad y materiales accesibles a cualquier persona.

2. Estado de la cuestión: Métodos de fabricación disponibles

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, como se muestra en la Ilustración 1.

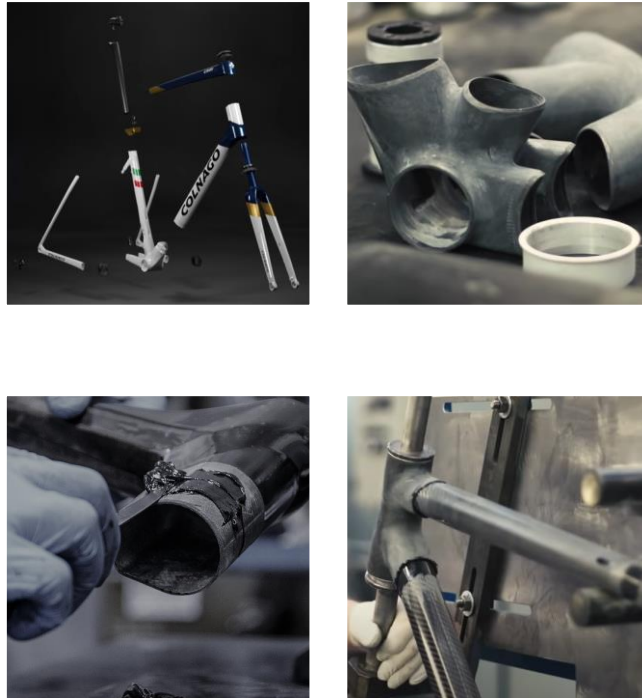


Ilustración 1: Montaje de la bicicleta por Colnago

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, como se muestra en el Ilustración 2.

El material de impresión es el filamento CARBON X CF-PC que se expone en la Ilustración 3.

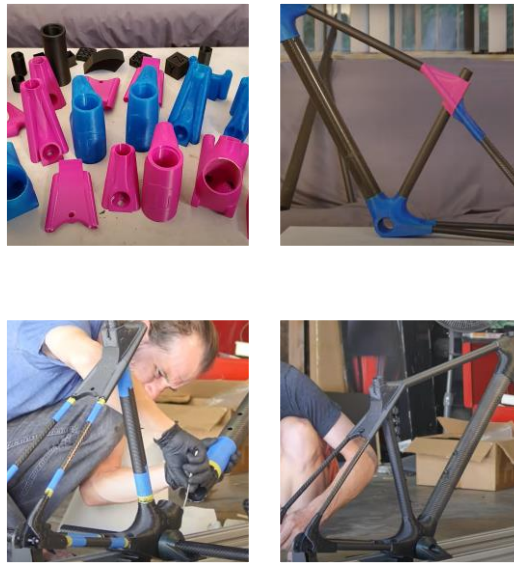


Ilustración 2: Proceso mediante impresión 3D en material con fibra de carbono

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

El policarbonato 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 3: 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 laminación el preimpregnado debe curarse a altas temperaturas, para lo cual se necesita un horno de las dimensiones del cuadro.

3. Descripción del proyecto

A continuación, se describe en detalle el método llevado a cabo para el ejecución de la fabricación del cuadro en fibra de carbono.

El proceso se basa en un método de fabricación por partes, las cuales serán unidas mediante adhesivo de resina epoxy.

Se parte de tubos comerciales, los cuales trabajan conjuntamente gracias a piezas de unión. Estas piezas se han fabricado mediante preimpregnados en distintos tejidos, utilizando como molde piezas impresas en 3D en un material soluble, convirtiéndose de esta forma en moldes desechables.

Previo a la fabricación, se dispone del diseño de la geometría del cuadro, así como la estructura de apilado de láminas de preimpregnado planteada y justificada mediante análisis estructurales de elementos finitos. El diseño del cuadro se compone de las piezas mostradas en la Ilustración 4 e Ilustración 5.

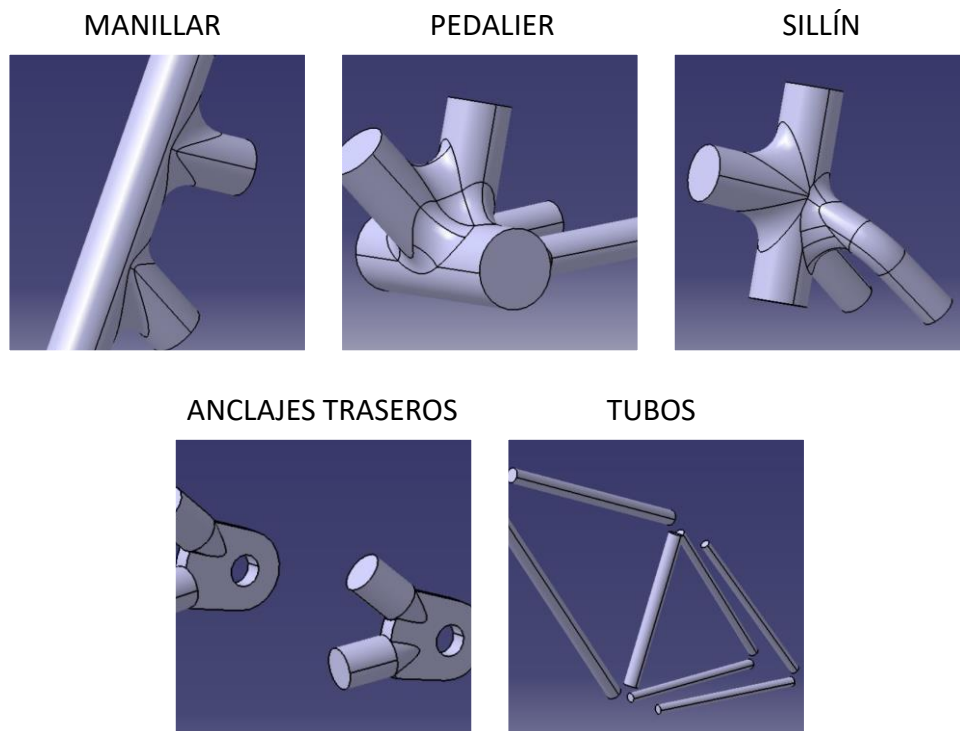


Ilustración 4: Modelos CAD de los componentes del cuadro

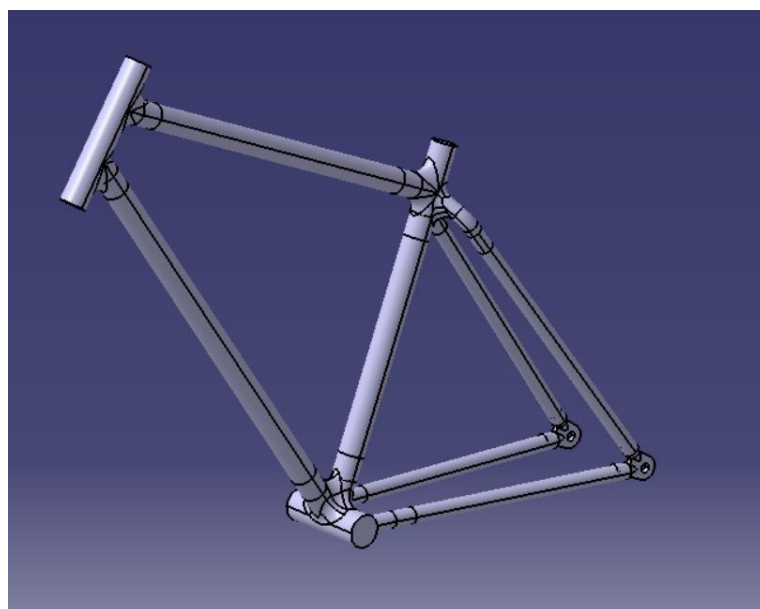


Ilustración 5: Modelo CAD completo del cuadro

Por otro lado, la lista y presupuesto de los materiales necesarios para llevar a cabo la fabricación se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1: Lista y presupuesto de materiales para la fabricación

Componente	Referencia proveedor	Uds	Medida	Precio/ud (IVA incl)	Total (IVA incl.)	Referencia web
Prepreg UD	VTC401-UD100-12K-T700-40%RW-300	1	m ²	78,65	78,65	[3]
Prepreg tejido WOVEN	VTC401-C200T-T300-2X2T-3K-42%RW	1	m ²	78,65	78,65	[3]
Tubo 32x26		2	m	86,24	172,48	[2]
Tubo 20x16		2	m	49,01	98,02	[2]
Bolsas de vacío		1	uds	7,26	7,26	[3]
Manta de absorción		1	uds	3,93	3,93	[3]
Masilla de cierre		1	uds	11,98	11,98	[3]
Adhesivo	EPX Adhesive DP490	2	uds	53,713	107,426	
				TOTAL (IVA incl.)	558,4 €	

4. Método: fases y subprocesos

A continuación, se introducen las fases y subprocesos que conlleva la fabricación:

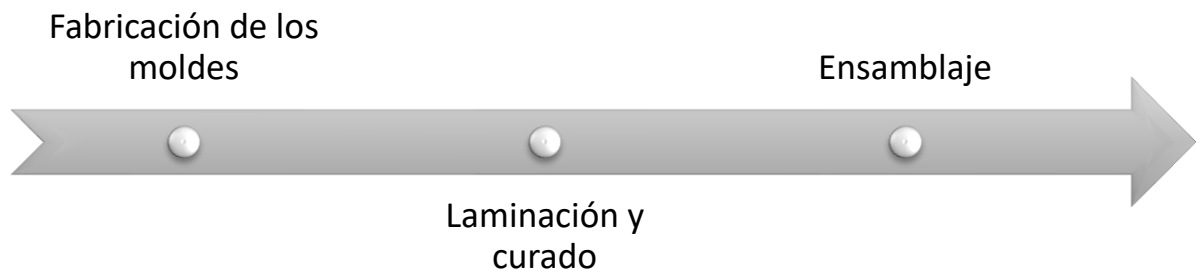


Figura 1: Proceso de fabricación

Detalle de cada una de las fases:

➤ Fabricación de los moldes

La fabricación de los moldes se lleva a cabo usando como técnica la fabricación aditiva, introduciendo un nuevo material soluble en agua con el objetivo de generar moldes desechables tras su laminación.

Se detallan los pasos a seguir en la Figura 2.

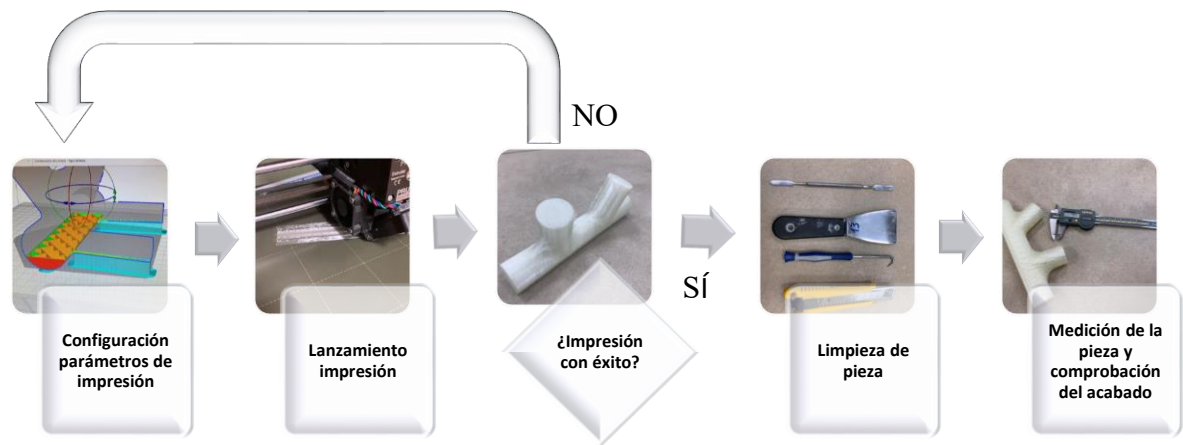


Figura 2: Proceso de impresión de los moldes

Al tratarse de un material nuevo que, además, tiene la particularidad de disolverse en agua, encontrar la configuración de parámetros de impresión óptima es la parte del proceso más complicada.

El material usado para la impresión es el Moviflex PVOH soluble en agua, material basado en alcohol polivinílico.

A lo largo del proceso se han encontrado diversos problemas asociados con la impresión, por lo que se necesitaron varios intentos por pieza para conseguir un buen resultado. Algunos de las complicaciones se listan a continuación:

1. Atasco en el extrusor
2. Mala adherencia de las capas a la cama de la impresora
3. Deterioro del material debido a la humedad
4. Mala transición entre el soporte y pieza
5. Incorrecta orientación de la pieza durante la impresión.

En la Ilustración 6: Fallos ocurridos durante la impresión de los moldes, se muestran imágenes del resultado de algunos de estos fallos.

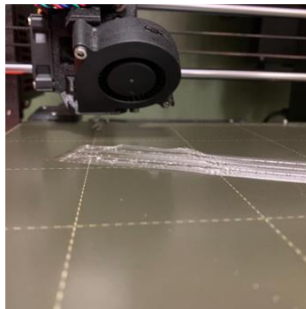
Ataco en el extrusor



Mala transición entre soporte y pieza



Poca adherencia



Incorrecta orientación de la pieza



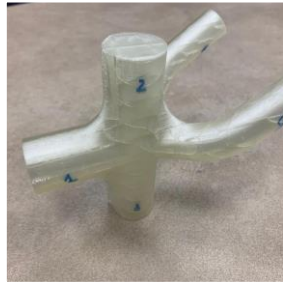
Ilustración 6: Fallos ocurridos durante la impresión de los moldes

Una vez encontrada la configuración que genere buenos resultados en la impresión, se procede a postprocesar la pieza, suprimiendo el material de soporte y lijando las superficies rugosas.

Con el objetivo de conseguir buenos acabados y las medidas correctas en las piezas finales de fibra de carbono, es necesario confirmar el modelo impreso comparando sus medidas con las del modelo CAD diseñado.

Tras seguir todos estos pasos con cada uno de los modelos del cuadro se obtienen los siguientes moldes preparados para el siguiente paso: la laminación y el curado. En la Ilustración 7 se muestran los resultados finales de los moldes.

SILLÍN



PEDALIER



MANILLAR



Ilustración 7: Moldes terminados y listos para laminar

➤ Laminación y Curado

Una vez terminados y preparados todos los moldes, pasamos a laminar, apilando los patrones de preimpregnado en el orden y orientación establecido previamente en cada molde.

Finalizado el proceso de laminación, se realiza el curado del material compuesto para adquirir las propiedades mecánicas esperadas.

Este subproceso se compone de las fases mostradas en la Figura 3.

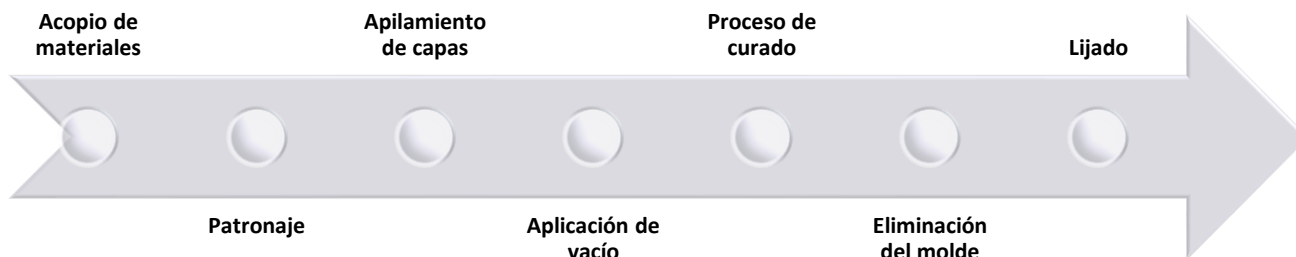
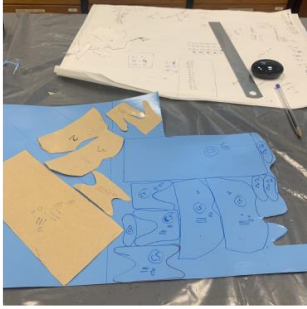


Figura 3: Fases del proceso de laminado y curado

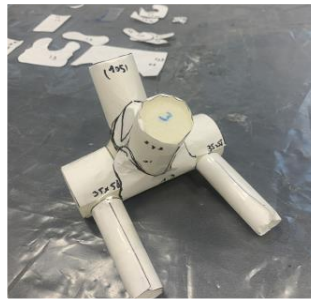
Una vez se dispone de todo el material necesario, se comienza con la generación de los patrones que envolverán el molde. Es una tarea compleja, ya que se trata de piezas con geometrías complicadas que hacen que los patrones sean numerosos y pequeños. Al mismo tiempo, debe contarse con el hecho de que, en el caso de los preimpregnados unidireccionales, la dirección de las fibras importa y, por tanto, los patrones no son iguales entre sí, dificultando la tarea.

A medida que se recortan los patrones se van aplicando sucesivas capas de estos patrones hasta conformar la pieza final. Una vez terminado el laminado se procede al proceso de curado. Todo este proceso de muestra en la Ilustración 8: Generación de patrones y apilamiento de capas.

Recorte de patrones



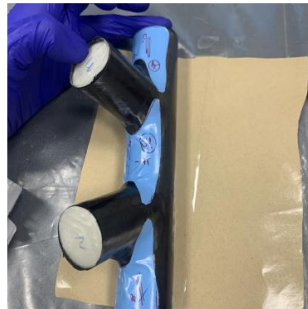
Diseño de patrones



Apilado de capas



Apilado de capas



Apilado de capas



Ilustración 8: Generación de patrones y apilamiento de capas

Para ello, se debe aplicar vacío a la pieza, con el objetivo de homogenizar la resina y eliminar cualquier resto de aire entre las capas, como se puede observar en la Ilustración 9.

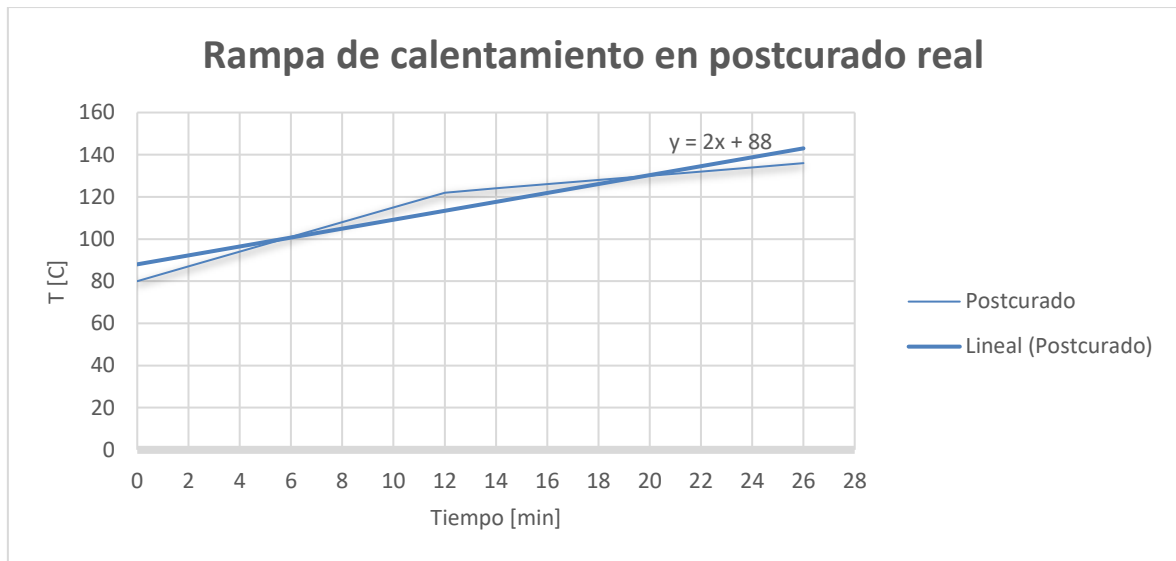


Ilustración 9: Proceso de aplicación de vacío

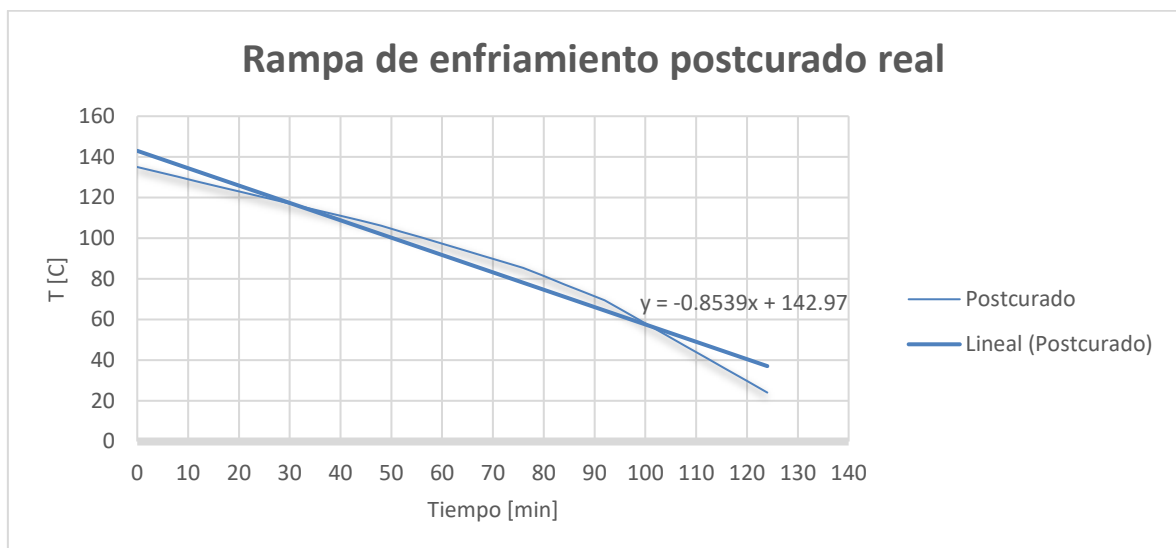
Dependiendo del fabricante del preimpregnado se pueden aplicar diferentes procesos de curado, siguiéndole un proceso de postcurado con el fin de conseguir las características mecánicas óptimas del material. A continuación, se listan los periodos de curado realizados para cada pieza:

1. El curado del sillín se llevó a cabo a 65°C durante 16 horas. Tras ese periodo se llevó a cabo el postcurado a 135°C durante 2 horas.
2. El curado del manillar se realizó a 80°C durante 8 horas tal y como indicaba el fabricante. Tras el curado, se llevó a cabo el postcurado a 135°C durante dos horas.
3. El curado del pedalier se realizó en 1 hora a 100°C y después el postcurado a 135°C durante 2 horas.

En la gráfica 1 y 2 se muestran las rampas de calentamiento y enfriamiento llevadas a cabo durante el proceso de postcurado.



Gráfica 1: Rampa de calentamiento para el postcurado



Gráfica 2: Rampa de enfriamiento para el postcurado

Como se ha comentado anteriormente, el molde está hecho de un material soluble por lo que el molde se elimina al terminar el curado en una cuba ultrasónica, la cual, mediante ultrasonidos y temperatura, elimina por completo el molde del interior de la pieza.



Ilustración 10: Estado de la pieza y el molde tras un periodo en la cuba ultrasónica

Finaliza el proceso con el lijado de la pieza para suavizar la superficie y los bordes de la pieza.

Se adjuntan en la Ilustración 11, el resultado tras el proceso de laminado y curado.



Ilustración 11: Resultado del proceso de laminación y curado

➤ Ensamblaje

Llegados a este punto todos los componentes del cuadro están listos para ensamblar. Para ello, previamente se han cortado los tubos con las medidas correspondientes y lijado las superficies donde se aplicará el epoxy. El epoxy utilizado en este caso es el 3M Scotch-Weld EPX Adhesive DP490. Una vez efectuado el pegado, dejamos transcurrir entre pegado y pegado un par de días para completar el curado del adhesivo. Una vez completado el curado se procede al proceso de acabado, con los últimos retoques del cuadro.

La fase de ensamblaje se resume en los siguientes pasos:



El resultado obtenido tras el ensamblaje de todos los componentes del cuadro es el mostrado en la Ilustración 12.



Ilustración 12: Resultado tras el proceso de ensamblaje

5. Resultado final

El resultado final del cuadro es una estructura compuesta de tres piezas fabricadas por apilado de preimpregnados y por tubos comerciales. Las piezas traseras serán fabricadas en aluminio mediante fundición y ensambladas más adelante mediante el epoxy utilizado en el pegado del resto de piezas.

En la Ilustración 13 se muestra el resultado final del cuadro a falta de los anclajes traseros,



Ilustración 13: Cuadro final



Ilustración 14: Cuadro final

6. Lecciones aprendidas

Durante el proceso sucedieron una serie de deslices que llevaron a cambiar algunos pasos del proceso.

1. El primero y más importante de todos fue la gestión de la llegada de los materiales para la fabricación.

Los preimpregnados se han de conservar a una temperatura de -16°C con el objetivo de evitar el proceso de curado de la resina. Sin embargo, cuando llegó el paquete con el material, se mantuvo éste durante un periodo de casi 10 días a una temperatura aproximada de 26°C . La consecuencia de este hecho supuso el inicio del curado del preimpregnado woven lo cual hizo que la lámina se rigidizara y disminuyese considerablemente la capacidad de pegado. Por tanto, se hizo casi imposible la aplicación de este tipo de lámina durante el moldeo. Se intentó, sin embargo, aplicarlo en la primera pieza moldeada, obteniendo el resultado mostrado en la Ilustración 15 e Ilustración 16. En dichas ilustraciones, se observa que se han levantado las capas debido a la falta

de adhesión de la resina.

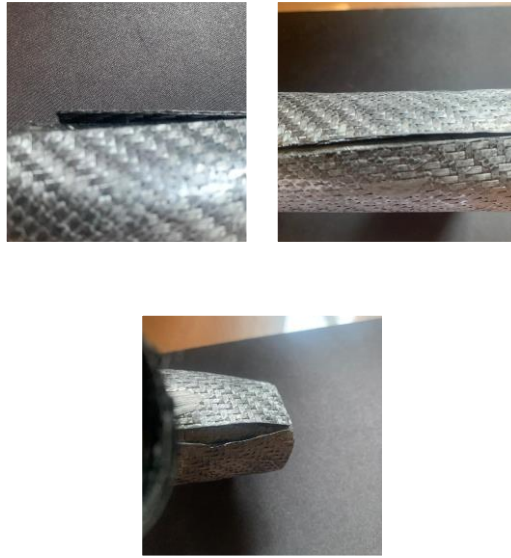


Ilustración 15: Resultado tras el curado en las últimas capas de tejido woven

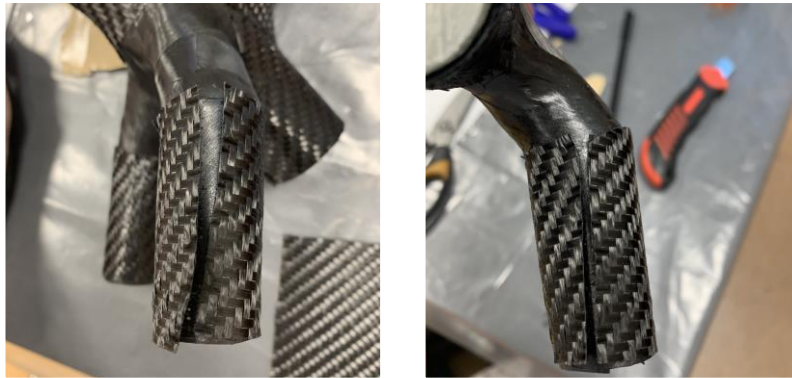


Ilustración 16: Estado del tejido woven durante el apilado

Debido a esto, se cambió el apilado suprimiendo las capas de este tejido (woven) y usando en su lugar las de tejido UD, en las siguientes direcciones.

Tabla 2: Apilado final del sillín

SILLÍN				
Capa	Tipo	Grosor	Ángulo	Total espesor (mm)
1	WOVEN	0.3	0	2.6
2	WOVEN	0.3	0	
3	UD	0.2	45	
4	UD	0.2	0	
5	UD	0.2	-45	
6	UD	0.2	0	
7	UD	0.2	0	
8	UD	0.2	-45	
9	UD	0.2	0	
10	UD	0.2	45	
11	UD	0.2	0	
12	UD	0.2	0	

Tabla 3: Apilado final del pedalier

PEDALIER				
Capa	Tipo	Grosor	Ángulo	Total espesor (mm)
1	UD	0.2	0	2.4
2	UD	0.2	45	
3	UD	0.2	0	
4	UD	0.2	-45	
5	UD	0.2	45	
6	UD	0.2	0	
7	UD	0.2	0	
8	UD	0.2	45	
9	UD	0.2	-45	
10	UD	0.2	0	
11	UD	0.2	45	
12	UD	0.2	0	

Tabla 4: Apilado final del manillar

MANILLAR				
Capa	Tipo	Grosor	Ángulo	Total espesor (mm)
1	UD	0.2	0	2.4
2	UD	0.2	45	
3	UD	0.2	0	
4	UD	0.2	-45	
5	UD	0.2	45	
6	UD	0.2	0	
7	UD	0.2	0	
8	UD	0.2	45	
9	UD	0.2	-45	
10	UD	0.2	0	
11	UD	0.2	45	
12	UD	0.2	0	

Se han adjuntado las tablas en orden de ejecución del laminado. Es por ello por lo que el sillín en un principio se aplicó las dos primeras capas de tejido woven. Aunque el laminado debe ser simétrico, debido a la imposibilidad de continuar usando este tejido, se cambió las capas woven por las unidireccionales.

Por ese motivo también, el acabado de las piezas no es el mismo que el de los tubos, los cuales están fabricados con un tejido de tipo woven.

2. El segundo desacierto fue el cálculo y la provisión del material compuesto.

Si bien es cierto que se calculó la cantidad de preimpregnado necesitado en base a la superficie a laminar, el número de capas y un desperdicio del 20%, en la realidad la cantidad necesitada fue mucho mayor. Se generó mayor desperdicio en la generación de los patrones y el tejido woven tubo que sustituirse por el unidireccional.

Finalmente, tuvo que hacerse un pedido durante la laminación para poder continuar con el moldeado de la última pieza.

3. El tercer desliz del proyecto surge en el momento de ensamblar las piezas y pegar los tubos.

El pegado se realizó por partes en días diferentes para esperar al curado del adhesivo.

Debido a que el proceso de laminación no es exacto se generaron desviaciones que hicieron que la última pieza encajase justa y forzando algo la estructura, lo que generó tensiones residuales en el cuadro una vez curado.

Se adjuntan imágenes del desvío en la Ilustración 17.



Ilustración 17: Demostración de la desviación de los últimos componentes a ensamblar

4. El último inconveniente, es el generado por la desviación durante el pegado de los tubos. Debido a este hecho, los anclajes diseñados con anterioridad basado en las medidas del CAD, ya no encajan en el cuadro. Es por ello por lo que se tiene que proceder al rediseño de estas piezas.

7. Conclusiones y trabajos futuros

Al llegar al final de esta memoria se concluye que la fabricación de un cuadro para bicicleta en fibra de carbono, mediante métodos asequibles y las herramientas disponibles en los laboratorios Comillas-ICAI, es viable.

A continuación, se presentan los objetivos de forma detallada:

1. Se ha conseguido materializar exitosamente el diseño que se realizó previamente en base a cálculos y simulaciones que lo justificaban. Viendo los resultados se puede afirmar que el principal objetivo del proyecto se ha cumplido validando técnicamente este proceso de fabricación.

2. Una vez acontecido las fases de apilado, curado y ensamblaje se puede afirmar que se ha comprendido las complejidades que presentan los materiales compuestos en su utilización y manejo.
3. Este trabajo ha tenido sus inconvenientes y complicaciones que han sido solventados a lo largo del proyecto generando un registro de lecciones aprendidas necesario que permite la mejora continua del proceso.
4. Por último, tratándose de un componente clave para el montaje de una bicicleta; con una serie de modificaciones y operaciones en el acabado este cuadro puede formar parte de una bicicleta la cual podría ser utilizada en un futuro.

Este último punto sirve de introducción para presentar las tareas futuras que deja el proyecto para su culminación.

Entre esas tareas se encuentra en primer lugar terminar de fabricar los anclajes traseros de la bicicleta, los cuales no han sido terminados debido a las desviaciones generadas en el cuadro durante el ensamblaje y, por tanto, la necesidad de realizar cambios en su diseño. Además, se trata de una pieza que debido a su tamaño y geometría puede ser más apta para su fabricación en aluminio que en fibra de carbono, mediante la fundición.

En segundo lugar, adaptar todas las uniones para el montaje del resto de componentes que forman una bicicleta, como es, por ejemplo, los rodamientos, casquillos, ejes... que ya fueron tenidos en cuenta durante el diseño previo y que, por tanto, no habría problema en instalar en el cuadro.

En tercer lugar, este proceso puede volver a realizarse teniendo en cuenta todas las lecciones aprendidas, resultando en una versión mejorada tanto integral como visual.

8. Referencias

- [1] Trabajo Fin de Máster “*Diseño y cálculo de un cuadro de bicicleta en fibra de carbono*”. Alejandra Basurco Hernández de Santamaría
- [2] Proveedor de tubos de carbono. Clipcarbono. <https://www.clipcarbono.com/>
- [3] Proveedor de material. Castrocomposites <https://www.castrocomposites.com/>
- [4] Colnago, empresa fabricante de bicicletas de carrera. <https://www.colnago.com/>
- [5] Filamento CARBON X CF-PC. Filament2print.
- [6] Gee Milner. “DREAM BUILD MTB - Hope HB130”, Youtube
- [7] David Aldric. “Building a 3D Printed Carbon Fiber Bicycle.”, Youtube
- [8] Premature Yeet. “Carbon Fibre Bike Frame Build”, Youtube

MANUFACTURING PROCESS OF A CARBON FIBER FRAME

Author: Alejandra Basurco Hernández de Santamaría

Supervisor: Alberto Carnicero López, Ángel Rubio López.

Collaborating Entity: ICAI - Universidad Pontificia Comillas

ABSTRACT

Keywords: carbon fiber, 3D printing, prepreg, fabrication.

1. Introducción

This project is the continuation of the previous work carried out on the study and design of a bicycle frame, with the purpose of manufacturing the frame in carbon fiber based composite material. This development is included in the Master's Thesis "Design and calculation of a carbon fiber bicycle frame" presented for the Master's Degree in Engineering for Mobility and Safety, carried out by the same author of this report.

The challenge of these two projects was to finally achieve the development and materialization of the design after a difficult work of study, analysis, organization and planning.

After considering this report, this challenge has been met by presenting a frame made entirely of carbon fiber from tools and equipment of the university and materials accessible to anyone.

2. State of art

This section includes different manufacturing methods that are in operation today and that have served as the basis for the implementation of this project.

The bicycle design and manufacturing company, Colnago, uses a manufacturing method based on carbon fiber tubes that are joined together with carbon fiber prepreps and an epoxy adhesive.

There are other methods for making prototype frames. The following is a summary of processes that are simpler and cheaper to execute, but whose finish is not as precise as their performance.

1. One option is through additive manufacturing and the use of a material containing carbon fiber. The method consists of manufacturing the frame in parts by getting the joining parts by 3D printing and assembling the whole with adhesive.

The printing material is CARBON X CF-PC filament.

CarbonX exPC CF filament is made from the easy-to-print polycarbonate base, reinforced with < 20 % carbon fiber.

Polycarbonate withstands temperatures of approximately 100 °C without deformation. Today, PC has a wide range of applications in the domestic, industrial and architectural fields. It is widely used to manufacture electronic and electrical-related products, food packaging, toys, office equipment, glass frames or engineering products.

In 3D printing, PC is widely used to produce strong and durable plastics with a high melting point. It should be noted that PC is more difficult to 3D print than PLA or ABS due to the common problems of bed adhesion, warping and moisture absorption.

In order to prepare the filament for the task it is designed for, it is often enriched with carbon fibers or glass fibers. Carbon fiber (CF) ensures stiffness and dimensional stability, which considerably reduces the risk of warping.

All these characteristics make CF reinforced filaments suitable for the automotive industry (high tensile strength and modulus, high temperature tolerance and low thermal expansion) and the aerospace industry (weight reduction up to 50 % with preservation of functionality).

2. Another option is to use an inner mold in a soft, lightweight material in which to apply all the prepreg sheets. In this case, the mold is still present after completion, remaining inside the frame once finished. The mold material can be polystyrene or similar. The problem with this method is that once the lamination process is completed, the prepreg must be cured at high temperatures, for which an oven of the size of the frame is required.

3. Project definition

The project describes in detail the method carried out for the execution of the manufacture of the carbon fiber frame.

The process is based on a manufacturing method by parts, which will be joined by means of epoxy resin adhesive.

The joining parts will be manufactured by pre-impregnated plies in different fabrics, using as molds 3D printed parts in a soluble material, thus becoming one-use molds. The frame's bars will be commercial carbon fiber tubes.

Prior to manufacturing, the frame geometry design is available, as well as the proposed and justified prepreg laminate structure. The frame design is composed of the following parts:

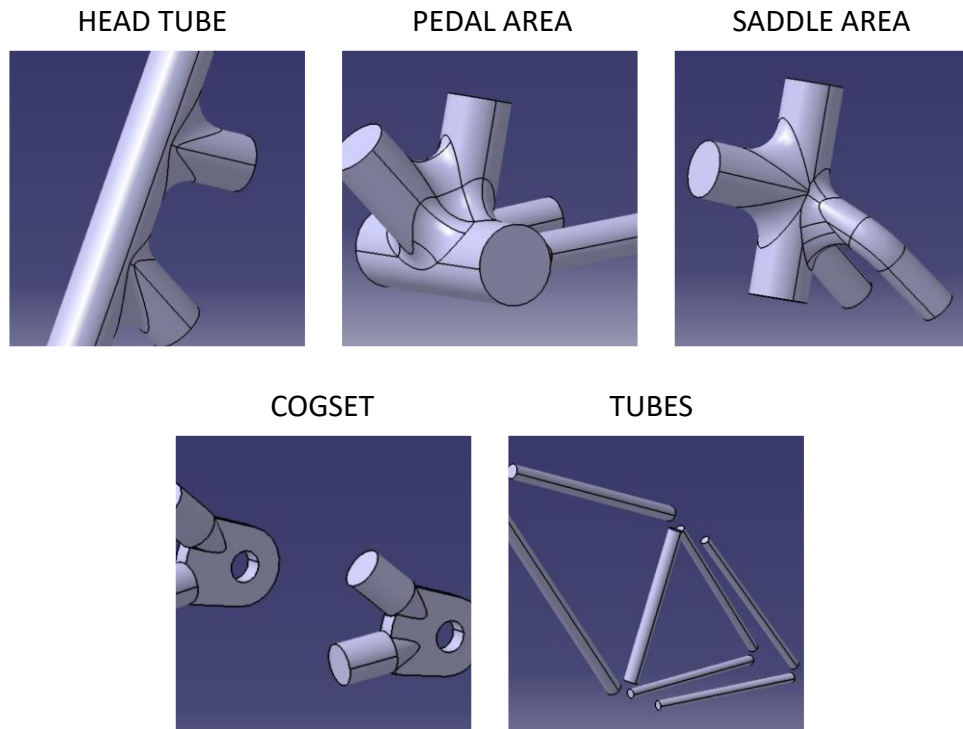


Ilustración 18: Frame components CAD models

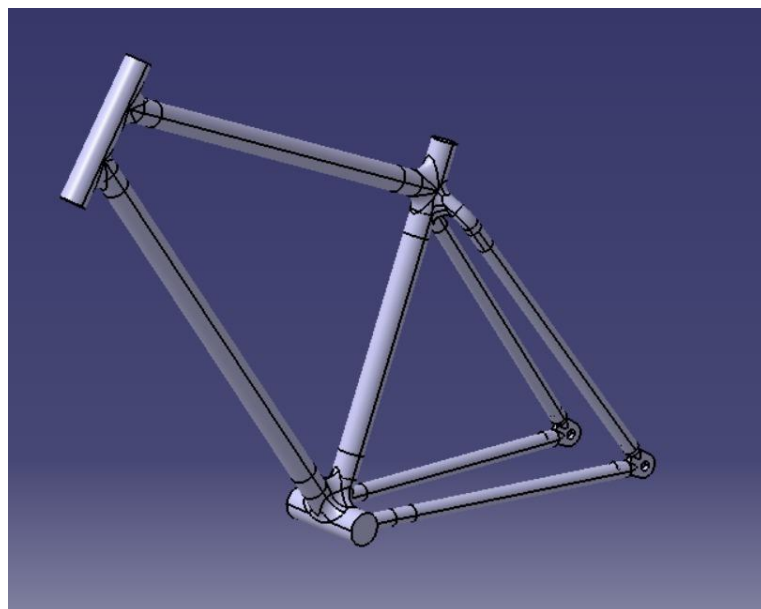


Ilustración 19: Complete carbon frame CAD model

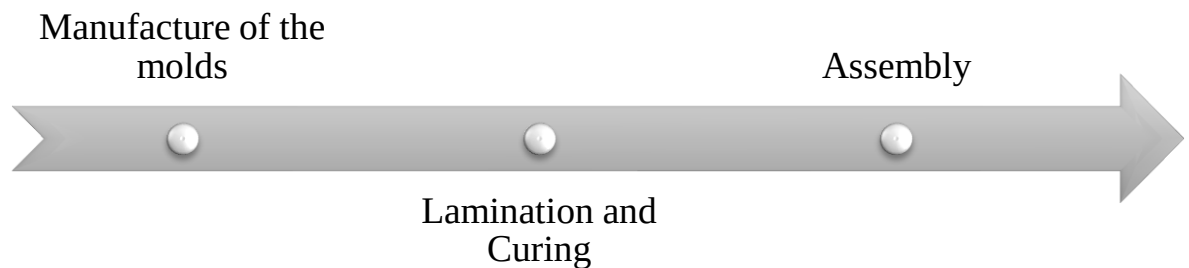
The list and budget of the materials required to carry out the fabrication is shown below:

Tabla 5: Bill of materials

Componente	Referencia proveedor	Uds	Medida	Precio/ud (IVA incl)	Total (IVA incl.)
Prepreg UD	VTC401-UD100-12K-T700-40%RW-300	1	m ²	78,65	78,65
Prepreg tejido WOVEN	VTC401-C200T-T300-2X2T-3K-42%RW	1	m ²	78,65	78,65
Tubo 32x26		2	m	86,24	172,48
Tubo 20x16		2	m	49,01	98,02
Tubo 14x12		1	m	24,78	24,78
Vacum bag		1	uds	7,26	7,26
Manta de absorción		1	uds	3,93	3,93
Masilla de cierre		1	uds	11,98	11,98
Adhesivo	EPX Adhesive DP490	2	uds	53,713	107,426
				TOTAL (IVA incl.)	583,2 €

4. Method: phases and sub-processes

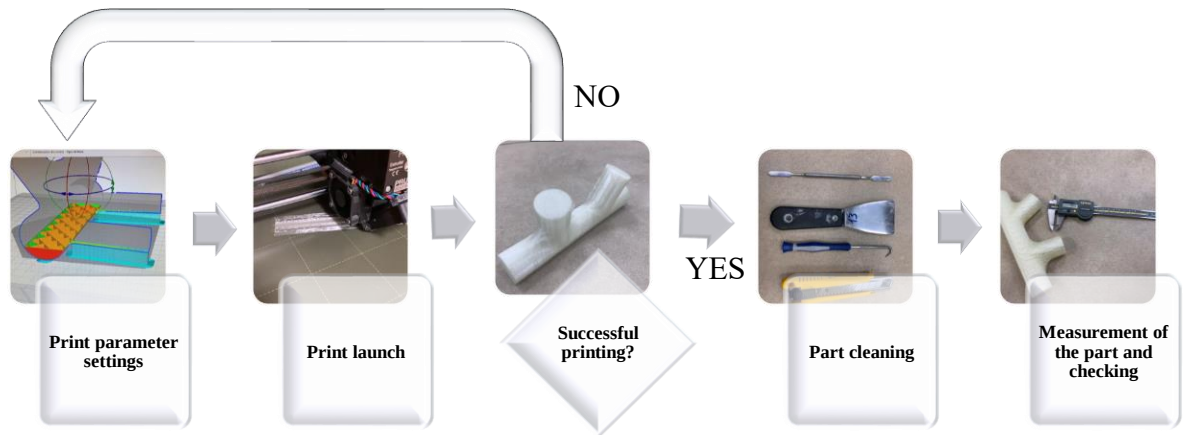
The phases and sub-processes involved in manufacturing are introduced:



➤ Manufacture of the molds

The manufacture of the molds is carried out using additive manufacturing as a technique, introducing a new water-soluble material with the aim of generating one-use molds after lamination.

Detail of the steps to be followed:



Since this is a new material that, in addition, has the particularity of dissolving in water, finding the optimum configuration of printing parameters is the most complicated part of the process.

Once the configuration that generates good printing results has been found, the part is post-processed, removing the support material and sanding rough surfaces.

In order to achieve good finishes and correct measurements in the final carbon fiber parts, it is necessary to confirm the printed model by comparing its measurements with those of the designed CAD model.

After following all these steps with each of the frame models, the following molds are obtained ready for the next step: lamination and curing.



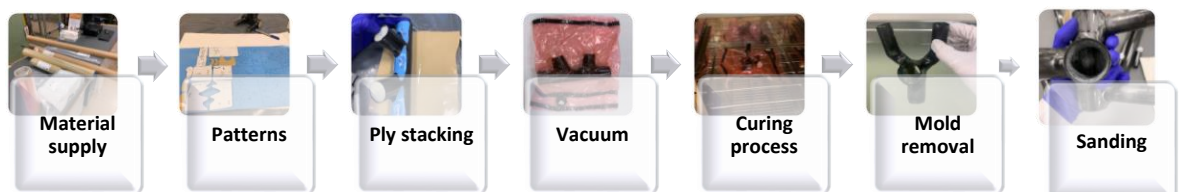
Ilustración 20: Results of the molds manufacturing process

➤ Lamination and Curing

Once all the molds are finished and prepared, we proceed to laminate, stacking the prepreg patterns in the order and orientation previously established in each mold.

Once the lamination process is finished, the composite material is cured to acquire the expected mechanical properties.

This sub-process consists of the following phases:



Once all the necessary material is available, we start with the generation of the patterns that will wrap the mold. This is a complex task, since these are parts with complicated geometries, which means that the patterns are numerous and small. At the same time, one must consider the fact

that, in the case of unidirectional preregs, the direction of the fibers matters and, therefore, the patterns are not equal to each other, making the assignment difficult.

As the patterns are cut out, successive layers of these patterns are applied until the final piece is formed. Once the lamination is finished, the curing process takes place.

To do this, a vacuum must be applied to the part in order to homogenize the resin and eliminate any remaining air between the layers.

Depending on the manufacturer of the prepreg, different curing processes can be applied, followed by a post-curing process in order to achieve the optimum mechanical characteristics of the material.

As mentioned above, the mold is made of a soluble material, so the mold is removed at the end of the curing process in an ultrasonic tank, which, by means of ultrasound and temperature, completely removes the mold from the inside of the part.

The process ends with the sanding of the part to smooth the surface and edges of the part.

Attached below is the result after the lamination and curing process:



Ilustración 21: Result of lamination and curing process

➤ Assembly

At this point all the components of the frame are ready to be assembled. To do this, the tubes have been previously cut with the corresponding measurements and the surfaces where the epoxy will be applied have been sanded. Once the gluing is done, we allow the necessary time for the adhesive to cure, to move on to the finishing process, with the final touches to the frame.

The assembly phase is summarized in the following steps:



The result obtained after the assembly of all the components of the frame is as follows:



Ilustración 22: Result of assembly process

5. Descripción del modelo/sistema/herramienta

The final result of the frame is a structure composed of three pieces manufactured by carbon fiber preregs and commercial tubing. The rear pieces will be manufactured in aluminum by casting and assembled later by means of the epoxy used in the bonding of the rest of the pieces.

This is the final result of the frame in the absence of the rear anchors.



Ilustración 23: Final frame



Ilustración 24: Final frame

5. Lessons learned

During the process, a series of mistakes occurred that led to changing some steps of the process.

1. The first and most important of all was the management of the arrival of materials for manufacturing.

The preregs must be kept at a temperature of -16°C to avoid the resin curing process. However, when the package with the material arrived, it was kept for a period of almost 10 days at a temperature of approximately 26°C . The consequence of this was that the woven prepreg began to cure, which caused the film to stiffen and considerably reduced its bonding capacity. Therefore, it became almost impossible to apply this type of film during molding. An attempt was made, however, to apply it to the first molded part, obtaining the result shown in Illustration 15, where it can be seen that the layers have been lifted due to the lack of adhesion of the resin.

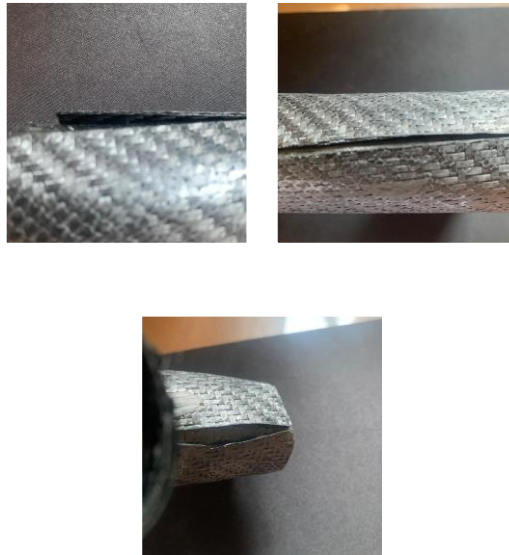


Ilustración 25: Result after curing in the last layers of woven fabrics

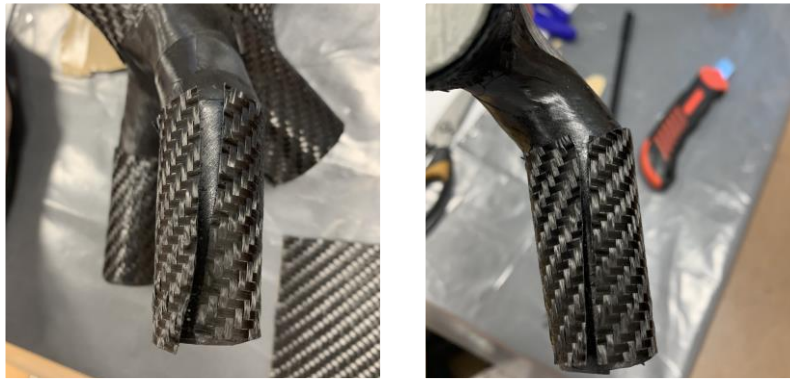


Ilustración 26: Condition of the woven fabric during stacking

Because of this, the stacking was changed by suppressing the woven layers and using UD fabrics instead, in the following directions.

Tabla 6: Final saddle stacking

SILLÍN				
Capa	Tipo	Grosor	Ángulo	Total espesor (mm)
1	WOVEN	0.3	0	2.6
2	WOVEN	0.3	0	
3	UD	0.2	45	
4	UD	0.2	0	
5	UD	0.2	-45	
6	UD	0.2	0	
7	UD	0.2	0	
8	UD	0.2	-45	
9	UD	0.2	0	
10	UD	0.2	45	
11	UD	0.2	0	
12	UD	0.2	0	

Tabla 7: Final peddal stacking

PEDALIER				
Capa	Tipo	Grosor	Ángulo	Total espesor (mm)
1	UD	0.2	0	2.4
2	UD	0.2	45	
3	UD	0.2	0	
4	UD	0.2	-45	
5	UD	0.2	45	
6	UD	0.2	0	
7	UD	0.2	0	
8	UD	0.2	45	
9	UD	0.2	-45	
10	UD	0.2	0	
11	UD	0.2	45	
12	UD	0.2	0	

Tabla 8: Final headtube stacking

MANILLAR				
Capa	Tipo	Grosor	Ángulo	Total espesor (mm)
1	UD	0.2	0	2.4
2	UD	0.2	45	
3	UD	0.2	0	
4	UD	0.2	-45	
5	UD	0.2	45	
6	UD	0.2	0	
7	UD	0.2	0	
8	UD	0.2	45	
9	UD	0.2	-45	
10	UD	0.2	0	
11	UD	0.2	45	
12	UD	0.2	0	

The boards have been attached in order of laminate execution. That is why the saddle was initially applied with the first two layers of woven fabric. Although the laminate should be symmetrical, due to the impossibility of continuing to use this fabric, the woven layers were changed to unidirectional ones.

For that reason, the finish of the pieces is not the same as that of the tubes, which are made with a woven type fabric.

1. The second mistake was the calculation and supply of the composite material.

Although it is true that the amount of prepreg needed was calculated based on the surface to be laminated, the number of layers and a waste of 20%, the amount needed was much higher. More waste was generated in the generation of the patterns and the woven tube fabric had to be replaced by the unidirectional one.

Finally, an order had to be placed during lamination in order to be able to continue with the molding of the last piece.

2. The third mistake of the project arose after assembling the pieces and gluing the tubes.

The gluing was done in parts on different days to wait for the adhesive to cure.

Since the lamination process is not exact, deviations were generated that caused the last piece to fit tightly and forcing the structure somewhat, which generated residual tensions in the frame once cured.

Images of the deviation are attached in Ilustración 27.



Ilustración 27: Demonstration of the deflection of the last components to be assembled.

3. The last drawback is the one generated by the deflection during the gluing of the tubes. Due to this fact, the anchorages previously designed based on CAD measurements no longer fit the frame. Therefore, these parts have to be redesigned.

5. Conclusions and future work

At the end of this report, we conclude the technical feasibility of the construction of a carbon fiber bicycle frame following the method described above.

Throughout the process, difficulties and risks have been encountered that have been solved and overcome allowing the successful completion of the project.

Going back to the beginning of the project, a series of objectives to be achieved with the execution of this project were presented. Once the project has been completed, a review of these objectives will be carried out in order to assess their fulfillment.

1. The first objective was to achieve the successful materialization of the design that was previously carried out based on calculations and simulations that justified it. Looking at the results and conclusions it can be shown that the main objective of the project has been fulfilled by technically validating this manufacturing process.
2. Once the laminating process, curing and assembly phases have taken place, it can be confirmed that the complexities that composite materials present in their use and handling have been understood.
3. As mentioned above, this work has had its drawbacks and complications that have been solved throughout the project generating a record of lessons learned necessary to allow the continuous improvement of the process.
4. Finally, being a key component for the assembly of a bicycle; with a series of modifications and finishing operations this frame can be part of a bicycle which could be used and assembled in the future.

This last point serves as an introduction to present the future tasks that the project leaves for completion.

Among these tasks is first to finish manufacturing the rear anchors of the bicycle, which have not been finished previously due to the deviations generated in the frame during assembly and, therefore, the need to make changes in its design. In addition, it is a part that due to its size and geometry may be more suitable for manufacturing in aluminum by casting than in carbon fiber.

Secondly, to adapt all the joints for the assembly of the rest of the components that make up a bicycle, such as bearings, bushings, axles... that were already considered during the previous design and that, therefore, there would be no problem to install in the frame.

Thirdly, this process can be rebuilt taking into account all the mistakes made resulting in an improved version both structurally and visually.

6. References

- [1] Trabajo Fin de Máster “*Diseño y cálculo de un cuadro de bicicleta en fibra de carbono*”.
Alejandra Basurco Hernández de Santamaría
- [2] Proveedor de tubos de carbono. Clipcarbono. <https://www.clipcarbono.com/>
- [3] Proveedor de material. Castrocomposites <https://www.castrocomposites.com/>
- [4] Colnago, empresa fabricante de bicicletas de carrera. <https://www.colnago.com/>
- [5] Filamento CARBON X CF-PC. Filament2print.
- [6] Gee Milner. “DREAM BUILD MTB - Hope HB130”, Youtube
- [7] David Aldric. “Building a 3D Printed Carbon Fiber Bicycle.”, Youtube
- [8] Premature Yeet. “Carbon Fibre Bike Frame Build”, Youtube

Índice de la memoria

Capítulo 1. Introducción	11
1.1 Motivación del proyecto.....	11
1.2 Objetivos de desarrollo sostenible.....	11
Capítulo 2. Estado de la Cuestión	13
2.1 Materiales en cuadros de bicicleta.....	13
2.2 Inspiraciones en procesos de fabricación	15
Capítulo 3. Definición del Trabajo	25
3.1 Justificación.....	25
3.2 Metodología.....	26
3.3 Objetivos	26
Capítulo 4. Diseño previo	28
4.1 Diseño del cuadro.....	28
4.2 Propuesta de laminación.....	29
4.3 Bill of Materials.....	31
4.4 Posibles procesos de fabricación	35
4.4.1 Proceso mediante tubos y piezas de unión	35
4.4.2 Proceso mediante molde monocasco.....	38
Capítulo 5. Proceso de fabricación	39
5.1 Proceso de fabricación de los moldes.....	39
5.1.1 Impresión del molde del conjunto sillín	43
5.1.2 Impresión del molde del conjunto manillar.....	51
5.1.3 Impresión del molde del conjunto pedalier	57
5.2 Proceso de laminación y curado	63
5.2.1 Proceso de laminación	66
5.2.2 Proceso de curado.....	80
5.2.3 Proceso de eliminación del molde.....	88
5.2.4 Proceso de lijado.....	90
5.2.5 Comprobación de las medidas	92
5.3 Proceso ensamblaje	94

5.3.1 Corte y lijado.....	94
5.3.2 Pegado.....	97
5.3.3 Proceso de acabado	104
5.4 Anclajes traseros.....	106
5.5 Lecciones aprendidas	107
Capítulo 6. Comprobación del diseño.....	113
Capítulo 7. Conclusiones y Trabajos Futuros.....	131
Capítulo 8. Bibliografía.....	133

Índice de figuras

Figura 1: Proceso de fabricación	10
Figura 2: Proceso de impresión de los moldes	11
Figura 3: Fases del proceso de lamiado y curado	14
Figura 4: Proceso de fabricación usado	39
Figura 5: Proceso de fabricación de los moldes	41
Figura 6: Proceso de laminación y curado.....	64
Figura 7: Demostración de la desviación durante el pegado	111

Índice de tablas

Tabla 1: Lista y presupuesto de materiales para la fabricación	10
Tabla 2: Apilado final del sillín	23
Tabla 3: Apilado final del pedalier	23
Tabla 4: Apilado final del manillar	24
Tabla 5: Bill of materials	31
Tabla 6: Final saddle stacking	38
Tabla 7: Final peddal stacking	39
Tabla 8: Final headtube stacking	39
Tabla 9: Propuesta final de laminación para la fabricación del cuadro	30
Tabla 10: Bill Of Materials	32
Tabla 11: Preimpregnados a utilizar	33
Tabla 12: Estimación de la longitud de los tubos necesarios	33
Tabla 13: Cantidad necesaria de cada tubo	33
Tabla 14: Estimación de cantidad de preimpregnado necesario	34
Tabla 15: Parámetros de impresión aconsejados por fabricante	41
Tabla 16: Parámetros de configuración en el primer intento	44
Tabla 17: Parámetros de configuración en el segundo intento	45
Tabla 18: Valores de la medición del segundo intento	48
Tabla 19: Parámetros de configuración en el segundo intento	49
Tabla 20: Valores de la medición del tercer intento	51
Tabla 21: Parámetros de configuración en el primer intento	53
Tabla 22: Parámetros de configuración en el segundo intento	54
Tabla 23: Valores de la medición del tercer intento	56
Tabla 24: Valores de la medición del primer intento	59
Tabla 25: Valores de la medición del primer intento	62
Tabla 26: Procesos de curado	82

Tabla 27: Medidas de la pieza final del sillín.....	92
Tabla 28: Medidas de la pieza final del manillar.....	93
Tabla 29: Medidas de la pieza final del pedalier	93
Tabla 30: Comparación de medidas entre los moldes y las piezas finales	93
Tabla 31: Medidas de los tubos	95
Tabla 32: Características principales del Epoxy.....	98
Tabla 33: Apilado final del sillín.....	109
Tabla 34: Apilado final del pedalier	109
Tabla 35: Apilado final del manillar.....	109

Índice de ilustraciones

Ilustración 1: Montaje de la bicicleta por Colnago.....	6
Ilustración 2: Proceso mediante impresión 3D en material con fibra de carbono	7
Ilustración 3: Filamento de policarbonato con fibra de carbono	8
Ilustración 4: Modelos CAD de los componentes del cuadro	9
Ilustración 5: Modelo CAD completo del cuadro	9
Ilustración 6: Fallos ocurridos durante la impresión de los moldes	12
Ilustración 7: Moldes terminados y listos para laminar.....	13
Ilustración 8: Generación de patrones y apilamiento de capas.....	15
Ilustración 9: Proceso de aplicación de vacío.....	16
Ilustración 10: Estado de la pieza y el molde tras un periodo en la cuba ultrasónica	18
Ilustración 11: Resultado del proceso de laminación y curado	18
Ilustración 12: Resultado tras el proceso de ensamblaje	19
Ilustración 13: Cuadro final.....	20
Ilustración 14: Cuadro final.....	21
Ilustración 15: Resultado tras el curado en las últimas capas de tejido woven	22
Ilustración 16: Estado del tejido woven durante el apilado.....	22
Ilustración 17: Demostración de la desviación de los últimos componentes a ensamblar ..	25
Ilustración 18: Frame components CAD models	30

Ilustración 19: Complete carbon frame CAD model.....	30
Ilustración 20: Results of the molds manufacturing process.....	33
<i>Ilustración 21: Result of lamination and curing process</i>	<i>34</i>
<i>Ilustración 22: Result of assembly process</i>	<i>35</i>
<i>Ilustración 23: Final frame</i>	<i>36</i>
<i>Ilustración 24: Final frame</i>	<i>36</i>
Ilustración 25: Result after curing in the last layers of woven fabrics	37
Ilustración 26: Condition of the woven fabric during stacking	38
Ilustración 27: Demonstration of the deflection of the last components to be assembled. .	40
Ilustración 28: Montaje de la bicicleta por Colnago.....	16
Ilustración 29: Recorte de patrones bien manualmente o de forma digital	17
Ilustración 30: Proceso de aplicación de los preimpregnados	18
Ilustración 31: Remanentes de fibra y resina tras la curado	19
Ilustración 32: Preparación del cuadro para accesorios y otros componentes	19
Ilustración 33: Herramienta de sujeción del cuadro durante el pegado.....	20
Ilustración 34: Proceso de fabricación de un cuadro en fibra de carbono	21
Ilustración 35: Proceso mediante impresión 3D en material con fibra de carbono	22
Ilustración 36: Filamento de policarbonato con fibra de carbono	23
Ilustración 37: Diseños de los componentes del cuadro.....	¡Error! Marcador no definido.
Ilustración 38: Modelo CAD completo del cuadro	29
Ilustración 39: Moldes impresos en 3D con el negativo de la pieza	35
Ilustración 40: Método 1: fabricación en aluminio y fibra de carbono	36
Ilustración 41: Método 2: fabricación en aluminio y fibra de carbono	37
Ilustración 42: Herramientas necesarias para la obtención de los moldes	40
Ilustración 43: Ejemplo de la orientación de la pieza en la impresión	42
Ilustración 44: Ejemplo de la calidad de la impresión según la orientación de la pieza	42
Ilustración 45: Nombramiento de diferentes partes de la pieza; 1 horizontal, 2 y 3 vertical, 4 derecha y 5 izquierda.	43
Ilustración 46: Demostración de la colocación de la pieza en la impresora.....	43
Ilustración 47: Demostración del fallo en el primer intento del modelo del conjunto sillín	45

Ilustración 48: Imagen de la simulación de impresión con la configuración del segundo intento	46
Ilustración 49: Resultado de la segunda impresión	¡Error! Marcador no definido.
Ilustración 50: Rotura de la pieza	48
Ilustración 51: Imagen de la simulación de impresión con la configuración del tercer intento	50
Ilustración 52: Nombramiento de diferentes partes de la pieza; tubos 3 y 4 a la izquierda y tubos 2 y 1 a la derecha	52
Ilustración 53: Demostración de la posición y orientación de la pieza	52
Ilustración 54: Valores de la medición del primer intento	53
Ilustración 55: Fallos de impresión en el segundo intento	55
Ilustración 56: Resultado de impresión del segundo intento	56
Ilustración 57: Nombramiento de diferentes partes de la pieza; tubos 4 y 5 a la izquierda y tubo 1 perpendicular a 2 y	57
Ilustración 58: Demostración de la colocación de la pieza en la impresora.....	57
Ilustración 59: Resultado de impresión del primer intento.....	59
Ilustración 60: Fallos en el tercer intento de impresión.....	61
Ilustración 61: Resultados de disolver el material de soporte adherido a la pieza	62
Ilustración 62: Moldes terminados y listos para laminar.....	63
Ilustración 63: Herramientas y equipos utilizados en el proceso de laminación y curado..	65
Ilustración 64: Herramientas auxiliares	66
Ilustración 65: Patrones dibujados y recortados para la primera pieza	68
Ilustración 66: Apilado de capas de preimpregnado 1	69
Ilustración 67: Apilado de capas de preimpregnado 2	69
Ilustración 68: Pieza laminada lista para curar	70
Ilustración 69: Primer error en los patrones	71
Ilustración 70: Sucesión de errores en el primer apilado	72
Ilustración 71: Despistes en la manipulación de los preimpregnados	73
Ilustración 72: Nuevos patrones para el manillar	74
Ilustración 73: Imágenes del proceso de laminación del manillar.....	75

Ilustración 74: Creación de patrones para el pedalier.....	76
Ilustración 75: Imágenes del proceso de laminación del manillar.....	77
Ilustración 76: Acabado de los radios y aplicación de patrones.....	78
Ilustración 77: Acabado de los radios y aplicación de patrones.....	78
Ilustración 78: Creación de patrones para el sillín	79
Ilustración 79: Proceso de aplicación de las capas	80
Ilustración 80: Proceso de aplicación de vacío.....	81
Ilustración 81: Limpiador ultrasónico usado para eliminar los moldes.....	88
Ilustración 82: Parámetros de limpieza en la cuba ultrasónica.....	89
Ilustración 83: Estado de las piezas tras la eliminación del molde	89
Ilustración 84: Estado de las piezas tras la limpieza	90
Ilustración 85: Bordes de las piezas desiguales.....	91
Ilustración 86: Resultado final tras el proceso completo de laminado y curado	92
Ilustración 87: Nombre de los tubos.....	95
Ilustración 88: Tubos cortados	96
Ilustración 89: Equipos usados para lijar y limpiar las piezas y acabado final	97
Ilustración 90: Pistola de aplicación y boquilla para el Epoxy.....	99
Ilustración 91: Resultado tras la aplicación del adhesivo.....	100
Ilustración 92: Proceso de pegado y ensamblaje	101
Ilustración 93: Resultado del pegado tras el primer día	102
Ilustración 94: Proceso de pegado el segundo día.....	103
Ilustración 95: Resultado final tras la curado del adhesivo	104
Ilustración 96: Lijado de excedente de adhesivo y uso de preimpregnado	105
Ilustración 97: Peso del cuadro.....	106
Ilustración 98: Resultado tras el curado en las últimas capas de tejido woven.....	107
Ilustración 99: Estado del tejido woven durante el apilado.....	108
Ilustración 100: Demostración de la desviación de los últimos componentes a ensamblar	112
Ilustración 101: Resultado de deformación total - Ensayo caída masa	113
Ilustración 102: Resultado de deformación total en el cuadro - Ensayo caída masa.....	114

Ilustración 103: Resultado de deformación en dirección X en la horquilla- Ensayo caída masa	114
Ilustración 104: Resultado de máxima tensión principal general- Ensayo caída masa	115
Ilustración 105: Resultado de deformación total - Ensayo caída del cuadro.....	116
Ilustración 106: Resultado de máxima tensión principal general- Ensayo caída del cuadro	117
Ilustración 107: Resultado de deformación en dirección X - Ensayo caída del cuadro	117
Ilustración 108: Resultado de máxima tensión principal general- Ensayo 3 Fuerzas horizontales.....	118
Ilustración 109: Resultado de máxima tensión principal en el cuadro - Ensayo 3 Fuerzas horizontales.....	119
Ilustración 110: Maximum stress criterion con $FS < 2$	119
Ilustración 111: Tsai-Wu criterion con $FS < 2$	120
Ilustración 112: Tsai-Hill criterion con $FS < 2$	120
Ilustración 113: Indicación de la deformación analizada en el ensayo	121
Ilustración 114: Resultado de deformación en dirección X en la horquilla- Ensayo fuerzas horizontales.....	121
Ilustración 115: Resultado de deformación en dirección X en el cuadro- Ensayo fuerzas horizontales.....	122
Ilustración 116: Indicación de la flecha.....	123
Ilustración 117: Resultado de máxima tensión principal en el cuadro- Ensayo fuerzas verticales.....	123
Ilustración 118: Resultado de deformación en dirección X en el cuadro- Ensayo fuerzas verticales.....	124
Ilustración 119: Resultado de deformación en dirección X en la tija- Ensayo fuerzas verticales.....	124
Ilustración 120: Max stress criterion con $FS < 10$	125
Ilustración 121: Resultado de deformación total - Ensayo pedaleo en pendiente	126
Ilustración 122: Resultado de máxima tensión principal - Ensayo pedaleo en pendiente.	126
Ilustración 123: Resultados con tensiones > 60 MPa	127

Ilustración 124: Max stress Criterion con $FS < 2$	127
Ilustración 125: Detalle tipo de fallo para resultados de $FS < 2$	128
Ilustración 126: Fallos según el criterio de fallo Maximum Stress	128
Ilustración 127: Tsai-Hill criterion con $FS < 2$	129
Ilustración 128: Tsai-Wu criterion	129

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

Este documento describe el desarrollo de un proceso de fabricación, así como la sucesión de los acontecimientos ocurridos durante ese proceso, el cual está basado y hereda los resultados de la previa tesis del Máster en Ingeniería para la Movilidad y Seguridad cuyo título es *Diseño y cálculo de un cuadro de bicicleta en fibra de carbono*.

1.1 MOTIVACIÓN DEL PROYECTO

Como se acaba de comentar, este trabajo solo aúna parte del proceso que conlleva la creación de un cuadro de bicicleta desde el boceto; sin embargo, el proyecto global alberga todo tipo de ejecuciones tanto ingenieriles, como de organización, planificación, administración de recursos y motivacionales, tratándose de un desarrollo multidisciplinar.

El motivo por el cual se decidió llevar a cabo este proyecto fue principalmente poder aprovechar la oportunidad que se brindaba con este proyecto de conseguir crear, modelar y culminar el trabajo realizado con su fabricación. Terminar el proyecto con la materialización del diseño realizado supone la validación del trabajo previo realizado, así como la del propio proceso de fabricación ideado; aceptando también que permite destacar los fallos y errores que pueden surgir con el fin de documentarlos y justificarlos encontrando soluciones que mejoran el proceso y la idea presentada.

Ha supuesto un proyecto que ha permitido demostrar mi capacidad para idear, dirigir, planificar y ejecutar un proyecto desde el principio basado en mis propias decisiones; además de aprender y encontrar mis debilidades y fortalezas en la ejecución de un proyecto.

1.2 OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE

Los ODS que más afectados se ven por el proyecto y las metas que cumple dentro de esos objetivo se describen a continuación.



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.

Capítulo 2. ESTADO DE LA CUESTIÓN

En este apartado se describen los procesos que se llevan a cabo hoy en día para la fabricación de cuadros de bicicleta con material compuesto.

2.1 MATERIALES EN CUADROS DE BICICLETA

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 caso de requerir propiedades excelentes se recurre a la fibra de carbono.

2.2 INSPIRACIONES EN PROCESOS 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.

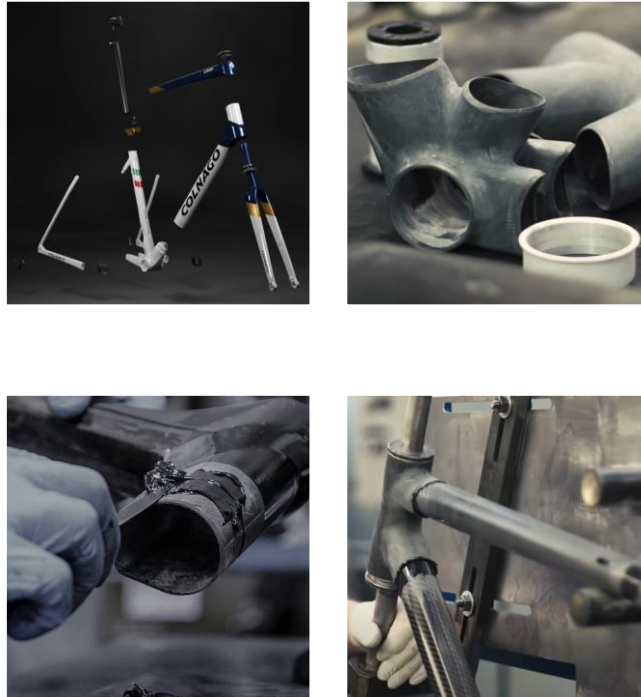


Ilustración 28: Montaje de la bicicleta por Colnago

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.

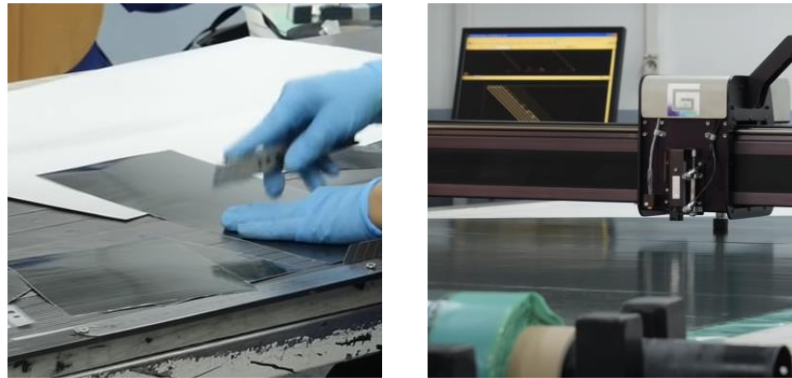


Ilustración 29: Recorte de patrones bien manualmente o de forma digital

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.

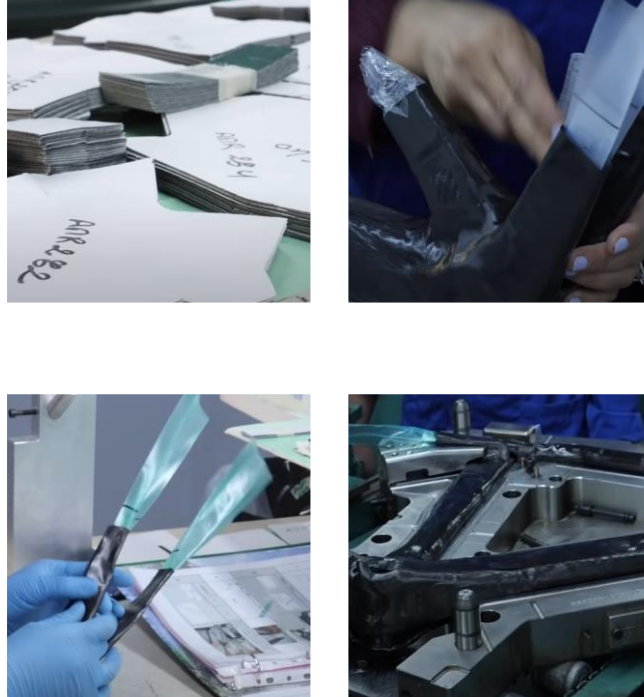


Ilustración 30: Proceso de aplicación de los preimpregnados

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 31: 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. A demás, 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 32: 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 composites. 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 33: 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.

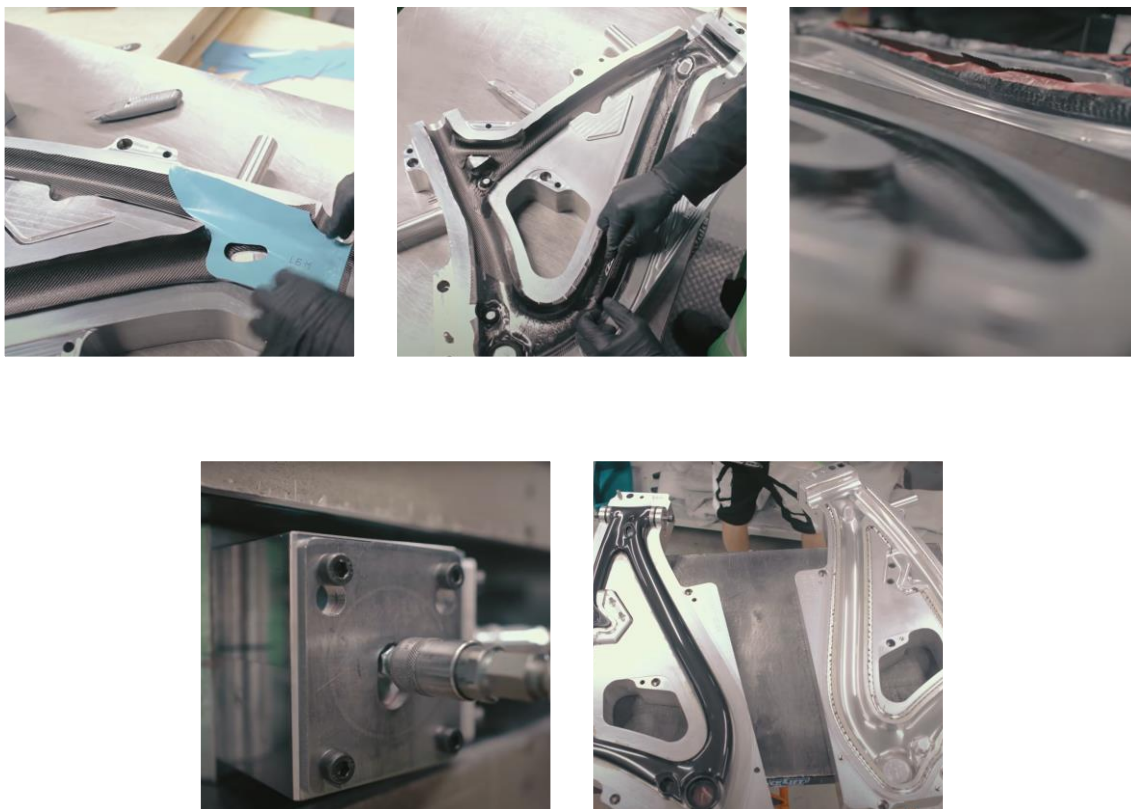


Ilustración 34: Proceso de fabricación de un cuadro en fibra de carbono

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.

6. 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.

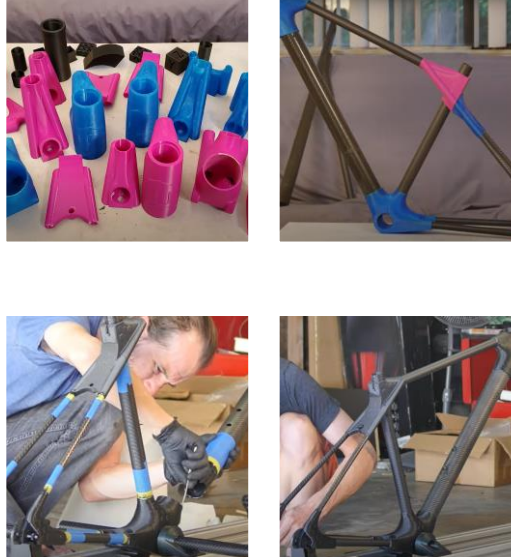


Ilustración 35: Proceso mediante impresión 3D en material con fibra de carbono

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 36: Filamento de policarbonato con fibra de carbono

7. 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 laminación 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

Del apartado anterior se puede concluir que los altos precios hoy en día de las bicicletas en fibra de carbono están justificados debido al gran trabajo, inversión y uso de equipos y trabajadores cualificados que se necesita para fabricarlos.

Fabricar un prototipo de cuadro de bicicleta en aluminio no es nada sencillo, requiriendo grandes máquinas de CNC de varios ejes y grandes cualidades o máquinas para soldar. En cambio, comprar una bicicleta sencilla en aluminio es rentable y se encuentran a un precio asequible.

Con los materiales compuestos es todo lo contrario. Tras explicar los diferentes métodos de fabricación que se han llevado a cabo, se puede apreciar que la fabricación prototipada de un cuadro de bicicleta es viable y con unos buenos acabados finales.

Lo que ofrece este proyecto es presentar un método complementario que 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.

Esto permite conseguir un cuadro completo en fibra de carbono sin restos de molde en el interior de los tubos y piezas y con un buen acabado tanto visual como en calidad. Las innovaciones que se pretenden introducir respecto a los anteriores procesos son las siguientes:

1. Utilizar el método por partes utilizando moldes realizados por fabricación aditiva desechables, de manera que, una vez usados los moldes para laminar la pieza, estos son eliminados quedando la pieza en fibra de carbono.
2. El cuadro está fabricado en su totalidad únicamente en fibra de carbono.
3. Otra de las ventajas del uso de la fibra de carbono es la posibilidad de jugar con sus características y conseguir piezas más rígidas o flexibles según la orientación de las fibras y el número de capas.
4. Permite utilizar equipos más compactos y baratos en su uso y adquisición.

3.2 METODOLOGÍA

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

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.
- Planificación: Una vez organizadas las ideas y los parámetros de diseño, se procede a planificar, organizar y administrar los recursos necesarios para la ejecución del proceso. Esta etapa está formada a su vez por los siguientes fases:
 - Diseño previo: Recoger y tomar los resultados previos del estudio y análisis del diseño a fabricar.
 - Previsión de los materiales y equipos: Confirmar la disponibilidad de todos los recursos necesarios, así como planear la adquisición de todos los materiales a utilizar.
- Ejecución: Desarrollo y realización de las tareas planificadas.
- Uso de diferentes recursos: Utilizar tanto programas informáticos como recursos de la universidad como el uso de laboratorios y herramientas o la ayuda de profesores para llegar a las soluciones que se quieren presentar al problema.

3.3 OBJETIVOS

Los objetivos que se pretende conseguir con este proyecto son los siguientes:

1. **Objetivo 1.** Materializar un proyecto de diseño previamente estudiado y analizado. El objetivo principal es conseguir finalizar y comprobar el resultado de una nueva idea de fabricación, así

como documentar los errores y equivocaciones cometidos. Se pretende conseguir una respuesta a si el método es viable desde el punto de vista de ejecución y cumplimiento de expectativas.

2. **Objetivo 2.** Entender y conocer las complejidades del uso de materiales compuestos en procesos de diseño.
3. **Objetivo 3.** Resolver diferentes problemas que surjan a lo largo del desarrollo del proyecto como, por ejemplo, problemas en la ejecución del laminado, problemas de planificación de tiempos, problemas debidos a la viabilidad técnica del método...
4. **Objetivo 4.** Conseguir un cuadro que permita su uso en un futuro tras montar el resto de componentes necesarios para formar una bicicleta.

Capítulo 4. DISEÑO PREVIO

Todo este proceso de diseño y análisis por método de elementos finitos se describe en profundidad en el Trabajo de Fin Máster – “*Diseño y cálculo de un cuadro de bicicleta en fibra de carbono*”, redactado por la autora de este proyecto como tesis final del Máster en Ingeniería para la Movilidad y Seguridad.

4.1 DISEÑO DEL CUADRO

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. 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. Es por ello por lo que el diseño del cuadro se compone de las siguientes partes:

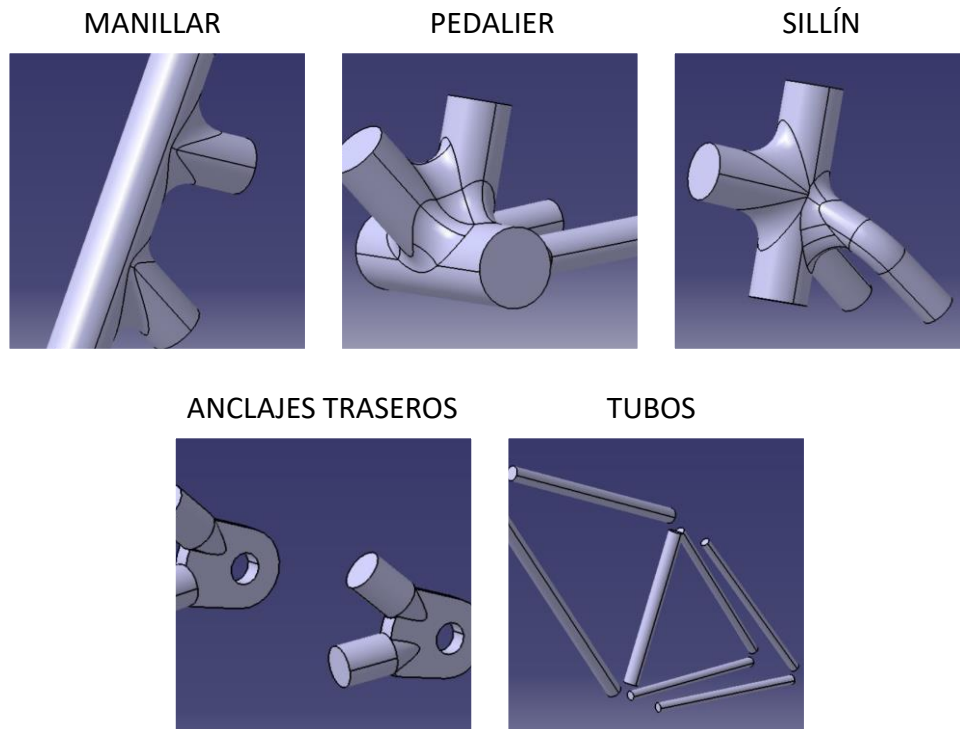


Ilustración 37: Diseños de los componentes del cuadro

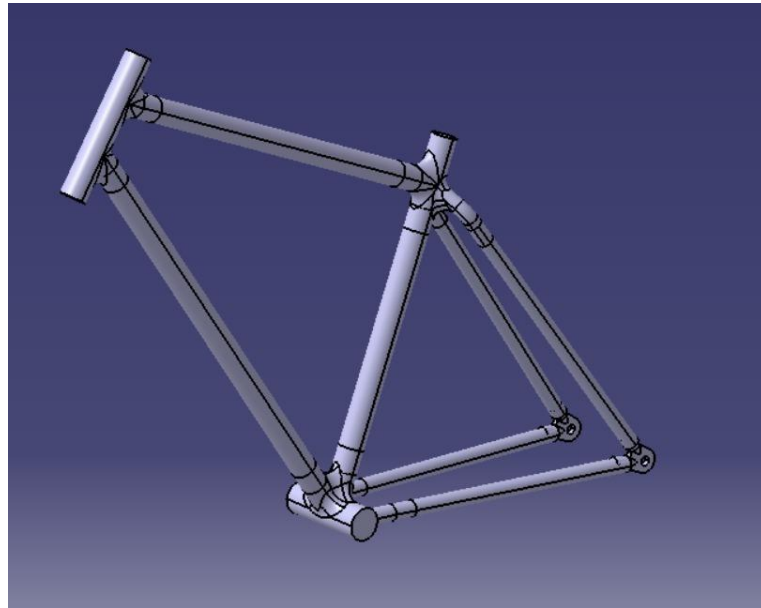


Ilustración 38: Modelo CAD completo del cuadro

Todo este diseño se está justificado por una serie de simulaciones y análisis que permitía encontrar el laminado óptimo para la fabricación de las diferentes piezas.

4.2 PROPUESTA DE LAMINACIÓN

Tras la ejecución y análisis de sucesivas simulaciones e iteraciones en el laminado de las piezas, el apilado propuesto para la fabricación es el siguiente:

Tabla 9: Propuesta final de laminación para la fabricación del cuadro

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 *BILL OF MATERIALS*

Una vez desarrollado todo el diseño del cuadro y teniendo todas las piezas modeladas se lleva a cabo la lista de materiales necesarios para la fabricación completa del cuadro, así como la estimación económica del proyecto.

Tabla 10: Bill Of Materials

Componente	Proveedor	Referencia proveedor	Uds	Medida	Precio/ud (sin IVA incl)	Total (sin IVA incl.)	Precio/ud (IVA incl)	Total (IVA incl.)
Prepreg unidireccional	Castrocomposites	Prepreg Carbono- Epoxi VTC401-UD100-12K- T700-40%RW-300	1	m ²	65	65	78,65	78,65
Prepreg tejido	Castrocomposites	VTC401-C200T-T300-2X2T-3K-42%RW	1	m ²	65	65	78,65	78,65
Tubo 32x26	Clip carbono		2	m	71,27	142,54	86,24	172,48
Tubo 20x16	Clip carbono		2	m	40,5	81	49,01	98,02
Tubo 14x12	Clip carbono		1	m	20,48	20,48	24,78	24,78
Bolsas de vacío/vacum bag	Castrocomposites		1	uds	6	6	7,26	7,26
Manta de absorción Zetafelt /breather cloth	Castrocomposites		1	uds	3,25	3,25	3,93	3,93
Masilla de cierre	Castrocomposites		1	uds	9,9	9,9	11,98	11,98
Adhesivo	3m	EPX Adhesive DP490	2	uds	48,83	97,66	53,713	107,426
					TOTAL (sin IVA incl.)	490,8 €	TOTAL (IVA incl.)	583,2 €

A continuación, se adjunta las estimaciones de materiales para la ejecución del proyecto.

Tabla 11: Preimpregnados a utilizar

Materiales disponibles	
UD	VTC401-UD100-12K-T700-40%RW-300
WOVEN	VTC401-C200T-T300-2X2T-3K-42%RW

Tabla 12: Estimación de la longitud de los tubos necesarios

TUBOS	Longitud (mm)	Desperdicio	Nº tubos	Longitud total (m)
FE	579,89	20%	1	0,70
BC	480,18	20%	1	0,58
CE	336,23	20%	1	0,40
CD	430	20%	2	1,03
DE	375	20%	2	0,90

Tabla 13: Cantidad necesaria de cada tubo

	Cantidad	L (m)	L minima (m)	Total (m)
TUBO 32x26	1	0,98	1,00	
	1	0,70	1,00	2,00
TUBO 20x16	2	1,03	1,00	
	2	0,90	1,00	2,00

La estimación de la cantidad de tubos a pedir se basa en la longitud de cada una de las barras según el modelo CAD aplicando un desperdicio del 20%. Se suman las longitudes de cada tipo de tubo mientras estas sean menores de 1 m, ya que la longitud mínima de los tubos comerciales es de 1 m.

Tabla 14: Estimación de cantidad de preimpregnado necesario

Pieza	mm ²	N capas	UD			N capas	WOVEN		
			Total área	Desperdicio	Total (m ²)		Total área	Desperdicio	Total (m ²)
		UD	(mm ²)			Woven	(mm ²)		
MANILLAR	26618	8	212944	20%	0,26	4	106472	20%	0,13
SILLÍN	26475	8	211800	20%	0,25	4	105900	20%	0,13
PEDALIER	33211	8	265688	20%	0,32	4	132844	20%	0,16
				TOTAL	0,83			TOTAL	0,41
				COMPRA	1m²			COMPRA	1m²

Para la estimación de preimpregnados, se obtiene el área de cada una de las piezas y se suma un desperdicio del 20%. Teniendo en cuenta el número de capas por pieza necesario de cada uno de los materiales, se obtiene la cantidad necesaria por m² de material.

4.4 POSIBLES PROCESOS DE FABRICACIÓN

Aunque se describan en este apartado diferentes métodos de fabricación planteados antes de ejecutar el definitivo, la organización y planificación del método de fabricación es una de las primeras tareas a realizar antes de comenzar con la fase de diseño del cuadro. Conocer y tener claro el método de producción es necesario ya que va a determinar el diseño del cuadro y de esto depende que se pueda o no materializar.

Sabiendo esto, en este apartado se describen otros posibles procesos que se valoraron en su momento.

4.4.1 PROCESO MEDIANTE TUBOS Y PIEZAS DE UNIÓN

1. Piezas de unión en fibra de carbono

- Método 1: moldes fabricados por impresión 3D con el modelo en negativo. El proceso sería proceder a la laminación en estos moldes introduciendo finalmente una bolsa y ejerciendo presión proceder a la fase de curado en el horno.



Ilustración 39: Moldes impresos en 3D con el negativo de la pieza

Posibles inconvenientes y desventajas:

- Moldes de plástico. Las temperaturas que se alcanzan durante el proceso de curado es de 135°C, por lo que los materiales de impresión pueden sufrir reblandecimiento o contracciones que modifiquen el resultado de la pieza final.
- Las geometrías como el sillín y el pedalier son complicadas como para diseñar un molde en negativo.

- Método 2: Moldes de material soluble con la forma de la pieza final. Este es el método realizado finalmente en este proyecto.

Posibles inconvenientes y desventajas:

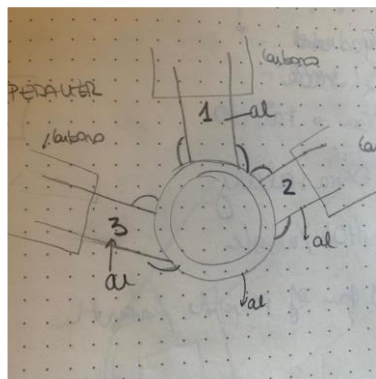
- Rigidez baja o fragilidad alta para manipulación durante el apilado.

2. UNIONES ALUMINIO.

Mecanizados tubulares y unión mediante soldadura:

- Método 1: Para la fabricación del pedalier, corte ranurado en el tubo principal y más tarde, efectuar la unión mediante soldadura. Los tubos de fibra de carbono serían pegados mediante adhesivo al aluminio.

Idea mecanizado en aluminio



Croquis pieza pedalier

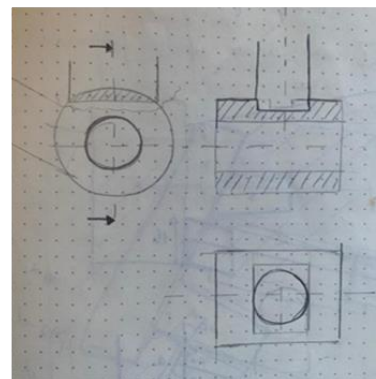


Ilustración 40: Método 1: fabricación en aluminio y fibra de carbono

Inconveniente:

- Desde punto de vista estructural no son convenientes esos cortes.
- Corrosión por par galvánico.
- Aumento del peso por el uso de aluminio en lugar de la fibra de carbono.
- Dificultad de manipulación de la pieza en la fresadora debido a los ángulos de trabajo.

Ventajas:

- Rigidez

- Método 2: corte circular en los extremos de los tubos y posterior soldadura.

Inconveniente: difícil asegurar ángulo respecto a los demás tubos. Inventar sistema de agarre que asegure esos ángulos con cierta precisión.

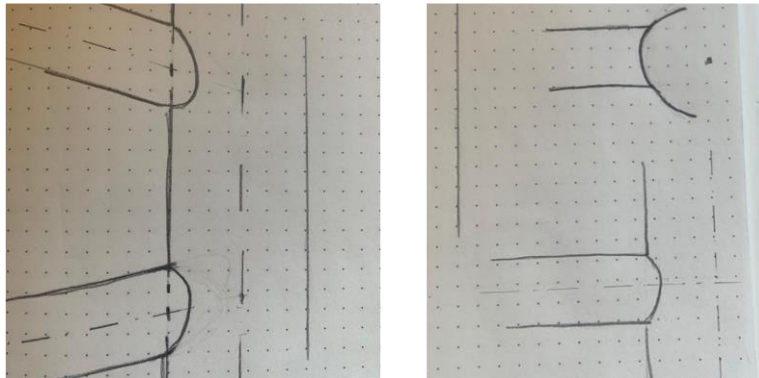


Ilustración 41: Método 2: fabricación en aluminio y fibra de carbono

3. TUBOS

- Método 1: Tubos fabricados en ICAI a partir de preimpregnados.

Ventajas:

- Control total de las propiedades.
- Posibilidad de crear formas no cilíndricas.
- Relativamente sencillo de fabricar.

Inconvenientes:

- Tarea laboriosa.
- Necesidad de imprimir los moldes, lo que supone mayor tiempo de fabricación y uso de materiales.
- Como se usan preimpregnados, es necesario realizar el proceso de curado.

- Acabados peores e irregulares.
 - Finalmente, mucho más costoso que los tubos comerciales.
-
- Método 2: Tubos comerciales. Esta es la opción que se eligió finalmente para los tubos del cuadro.

Inconvenientes:

- Menor control de las propiedades del material.
- Forma de los tubos estipulada.

Ventajas:

- Facilidad y sencillez.
- Precios más económicos.

4.4.2 PROCESO MEDIANTE MOLDE MONOCASCO

El método por monocasco es el proceso utilizado por los grandes fabricantes que se han descrito en el Capítulo 2.

Ventajas:

- Mejor acabado.
- Mejores propiedades mecánicas.

Inconvenientes:

- Trabajo "extra" en diseño y modelizado de los moldes y piezas auxiliares.
- Coste de los moldes si son en metal.
- Complejidad de los moldes si son impresos en 3D, además de que puede que imposible debido a las dimensiones del molde.
- Muy laborioso el apilado de capas.
- Se necesitarían hornos del tamaño del cuadro.

Capítulo 5. PROCESO DE FABRICACIÓN

En este capítulo se presenta el proceso de fabricación finalmente llevado a cabo explicando detalladamente sus fases, así como su desarrollo.

El proceso se basa en un método de fabricación por partes, las cuales serán unidas mediante adhesivo de resina epoxy. Las piezas de unión serán fabricadas mediante el uso de preimpregnados en distintos tejidos, usando de molde piezas impresas en 3D utilizando un material soluble, convirtiéndose de esta forma en moldes desechables. Las barras propias del cuadro serán tubos comerciales en fibra de carbono. El proceso se divide principalmente en los siguientes subprocesos:

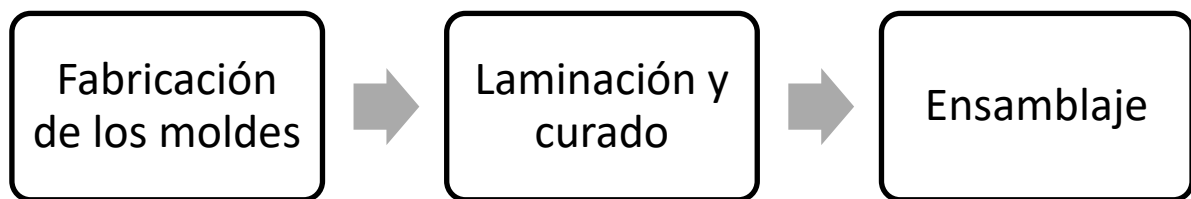


Figura 4: Proceso de fabricación usado

Cada uno de estos subprocesos serán descritos a continuación.

5.1 PROCESO DE FABRICACIÓN DE LOS MOLDES

Según el diseño del cuadro llevado a cabo anteriormente, son tres las piezas a laminar correspondientes con los nodos del cuadro. Para ello se debe fabricar con anterioridad los respectivos moldes.

Estos son los materiales y equipos necesarios:

- ▲ Impresora PRUSA I3
- ▲ Material Moviflex PVOH soluble en agua (2 bobinas): material soluble en agua basado en alcohol polivinílico. Se puede utilizar como un material de soporte para la fabricación aditiva basada en procesos de FFF (fabricación de filamentos fundidos).

- ▲ Ordenador
- ▲ Calibre Pie de Rey
- ▲ Espátula
- ▲ Software Ultimaker Cura
- ▲ Laca fijadora

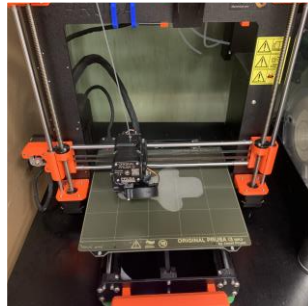
Herramientas



Material Moviflex



Impresora Prusa I3



Calibre pie de rey digital



Ilustración 42: Herramientas necesarias para la obtención de los moldes

El proceso de impresión de los moldes se describe de la siguiente forma:

1. Configuración de los parámetros de impresión
2. Lanzamiento impresión
3. Limpieza de pieza
4. Medición de la pieza y comprobación del acabado

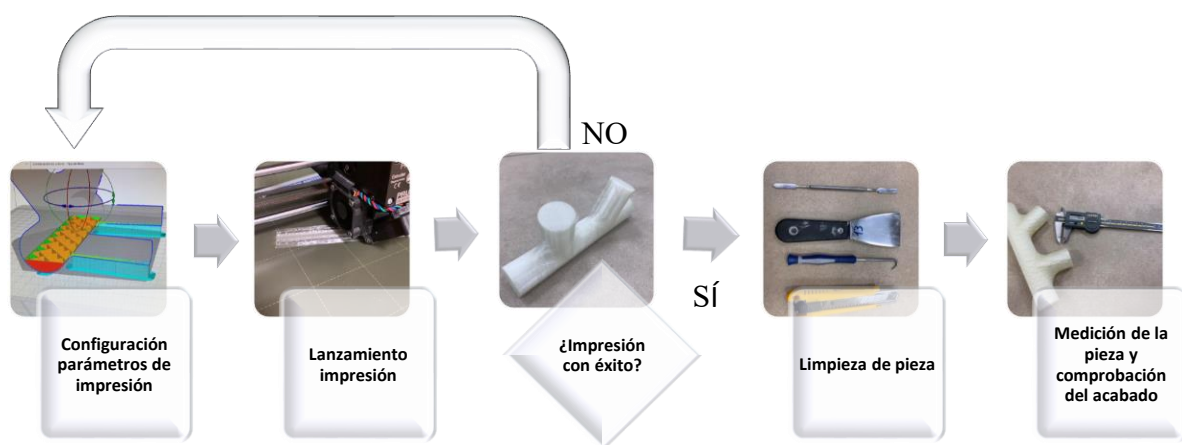


Figura 5: Proceso de fabricación de los moldes

Al tratarse de un material nuevo que, además, tiene la particularidad de disolverse en agua, encontrar la configuración de parámetros de impresión óptima es la parte del proceso más complicada. Si bien es cierto que el fabricante aconseja una serie de parámetros no siempre la impresión sale bien debido a que entran en juego otros factores como son el estado del material, el tiempo transcurrido desde su apertura y el nivel de humedad que ha podido coger, entre otros.

La configuración aconsejada por fabricante es la siguiente:

Tabla 15: Parámetros de impresión aconsejados por fabricante

Temperatura de la boquilla	190-215°C
Temperatura de la cama	25-70°C
Velocidad de impresión	20-50 mm/s
Velocidad de impresión de la interfaz	10-20 mm/s

En todos los intentos, para conseguir una buena impresión, se debe tener en cuenta diversas técnicas de impresión.

En primer lugar, en una impresión la colocación de la pieza es muy importante. Debido a que la deposición de material es por capas, la dirección perpendicular a la capa es la más frágil debido a que se genera una zona débil entre capas por la que es más fácil que pueda romper o despegarse. Es por eso por lo que, a la hora de imprimir el diseño, es importante orientar bien la pieza para conseguir el mejor acabado para el uso que se le va a dar.

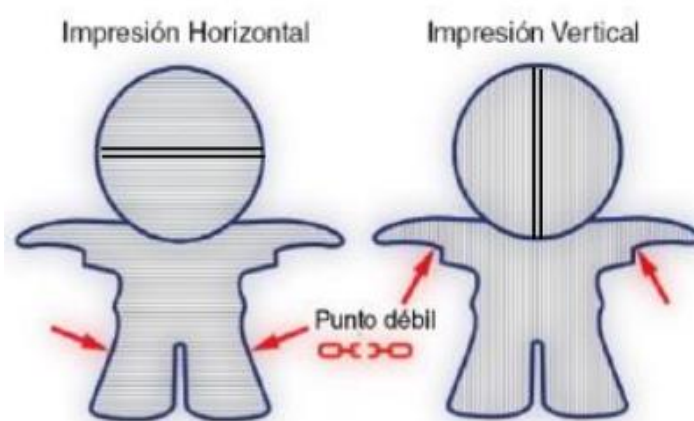


Ilustración 43: Ejemplo de la orientación de la pieza en la impresión

En segundo lugar, la orientación de la capa influirá en la calidad y la resistencia de la superficie. Por esta razón y debido a que es muy importante obtener una buena calidad de superficie para garantizar la tolerancia requerida en cada uno de los moldes, es necesario tener en cuenta orientar bien la pieza en base a este hecho.

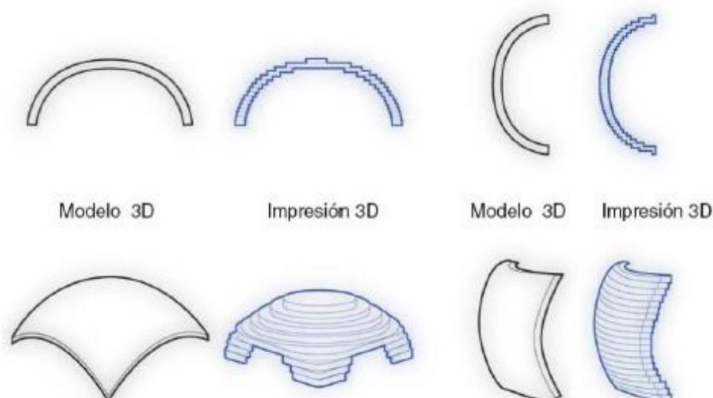


Ilustración 44: Ejemplo de la calidad de la impresión según la orientación de la pieza

A continuación, se describirá el proceso de impresión de cada una de las piezas.

5.1.1 IMPRESIÓN DEL MOLDE DEL CONJUNTO SILLÍN

La pieza correspondiente a la del conjunto sillín es la mostrada en el Capítulo 4 en la Ilustración 37. Se han nombrado las diferentes partes de la pieza para poder mencionarlas más adelante.



Ilustración 45: Nombramiento de diferentes partes de la pieza; 1 horizontal, 2 y 3 vertical, 4 derecha y 5 izquierda.

En este caso la colocación de la pieza sobre la cama de impresión es la siguiente:

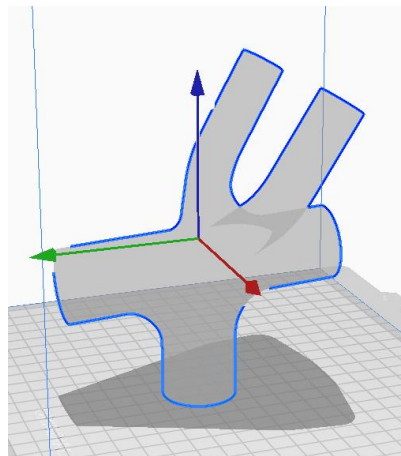


Ilustración 46: Demostración de la colocación de la pieza en la impresora

El acabado superficial de los tubos es muy importante, así como la tolerancia geométrica de cilindridad para poder encajar bien con el resto de piezas. Es por eso por lo que se ha elegido esta orientación. Tanto el tubo inferior como los dos superiores tendrán un mejor acabado; mientras que

los otros dos, el apilado será transversal y las tolerancias peores. Aun así, este hecho se puede mejorar aumentando la densidad del soporte y añadiendo la opción de añadir una cama entre el soporte y la pieza.

PRIMER INTENTO

La configuración en este intento fue la siguiente:

Tabla 16: Parámetros de configuración en el primer intento

Sillín	Primer Intento
Altura de capa inicial	0.2mm
Altura de capa general	0.15mm
Ancho de línea	0.4 mm
Velocidad capa general	60mm/s
Temperatura impresión	200°C
Adherencia a la placa de impresión	Balsa
Soporte	Zigzag
Techo soporte-pieza	No
Relleno	7%
Tiempos de impresión	9h36min
Precio €	6.57
Gr/m	49/22.65
Éxito	No

El primer intento de impresión resultó fallido debido a que, en la séptima capa, que es la primera de la pieza, no se pegó a la balsa y se acumuló material en el extrusor. En la imagen siguiente se observa como quedó el filamento del extrusor. Se ve como el material se acumuló en la punta subiendo ligeramente hacia arriba, por lo que no se formó esa capa correctamente. El diámetro del extrusor que se usó en este caso es de 0.4mm y en la configuración el ancho de línea estaba establecido en 0.4mm. Como solución se cambió a 0.3mm en la configuración para evitar este tipo de atascos en el extrusor.



Ilustración 47: Demostración del fallo en el primer intento del modelo del conjunto sillín

SEGUNDO INTENTO

La configuración en este intento fue la siguiente:

Tabla 17: Parámetros de configuración en el segundo intento

Sillín	Segundo Intento
Altura de capa inicial	0.2mm
Altura de capa general	0.15mm
Ancho de línea	0.3mm
Velocidad capa general	60mm/s
Temperatura impresión	200°C
Adherencia a la placa de impresión	Balsa
Soporte	Zigzag
Ángulo de soporte	50
Techo soporte-pieza	No
Relleno	7%
Tiempos de impresión	8h32min
Precio €	7.17

Gr/m	53/24.71
Éxito	No

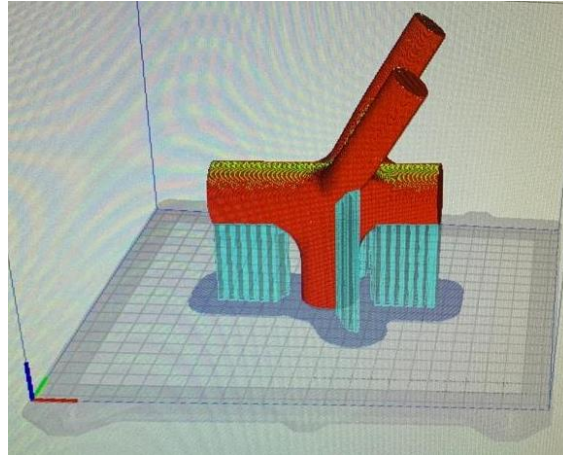


Ilustración 48: Imagen de la simulación de impresión con la configuración del segundo intento

Para este segundo intento los cambios realizados fueron:

- ▲ Cambiar el ancho de línea de 0.4mm a 0.3mm

El resultado de la impresión fue el siguiente:



Ilustración 49: Resultado de la segunda impresión

Se puede observar que la pieza en general resultó bien impresa; sin embargo, se puede apreciar en la Ilustración 49 arriba a la derecha como el soporte no se generó bien y la pieza no se pudo apoyar en él. Asimismo, los dos tubos que salen hacia arriba (4 y 5) tenían soporte, pero por un fallo en la impresión en uno de los tubos (4) no llegó a generarse soporte; aunque eso no ha sido problema: la calidad superficial es mejor que en el que tuvo soporte. Por otro lado, al manipular la pieza, con muy poca fuerza, uno de dos tubos más delgados se rompió por una de las capas.



Ilustración 50: Rotura de la pieza

Al tratarse del molde, el acabado debe de estar lo mejor posible y sin agujeros, es por eso por lo que se necesita lanzar otro intento que solucione estos problemas.

Tras la impresión, se realizaron medidas con el calibre con el fin de estudiar las tolerancias y sopesar la opción de realizar cambios en el CAD. Los tubos 2 y 3 al fallar la impresión, no se podía medir con precisión y se aprecia en los tubos horizontales falta de cilindridad. En cambio, en los tubos impresos verticalmente se puede observar que la tolerancia es mucho mejor.

Tabla 18: Valores de la medición del segundo intento

Intento 2	Medida 1	Medida 2	Medida 3
1	32.05	32.05	32.06
2	32.28	32.33	32.29
3	32.26	32.11	32.09
4	20.04	20.02	20.01
5	20.2	20.11	20.1

Observando los resultados se procedió a cambiar las medidas en el CAD para conseguir medidas de 20.2mm y 32.2mm y conseguir el gap necesario para añadir el adhesivo más tarde. Por tanto, se aumentaron las medidas en los tubos 4, 5 y 1 0,15mm.

TERCER INTENTO

Para el tercer intento los cambios fueron los siguientes:

- ⬆ Se aumentó el porcentaje de relleno para rigidizar la pieza.
- ⬆ Se aumentó el ángulo de voladizo para evitar que salga soporte para los dos tubos superiores.
- ⬆ Se cambió la adherencia de la capa de balsa a borde tal y como aparece en la imagen.
- ⬆ Se cambió la forma del soporte de zigzag a triángulo.
- ⬆ Se añadió un techo entre el soporte y el comienzo de la pieza para las partes en voladizo.

Tabla 19: Parámetros de configuración en el segundo intento

Sillín	3intento
Altura de capa inicial	0.2mm
Altura de capa general	0.15mm
Ancho de línea	0.3mm
Velocidad capa general	60mm/s
Temperatura capa inicial	215
Temperatura inicial	205
Temperatura impresión	215
Adherencia a la placa de impresión	Borde
Soporte	Triángulo
Techo soporte-pieza	Sí
Relleno	10%
Tiempos de impresión	9h4min
Precio €	6.13
Gr/m	46/21.12
Éxito	Sí

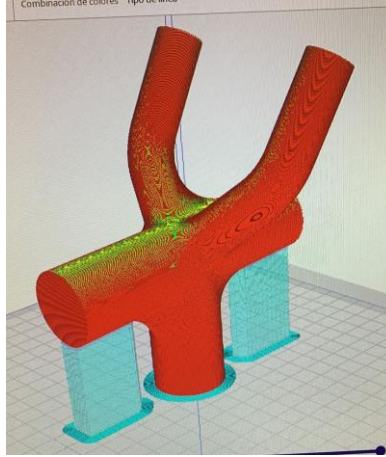


Ilustración 51: Imagen de la simulación de impresión con la configuración del tercer intento

Este fue el resultado de la tercera impresión:



Tabla 20: Valores de la medición del tercer intento

Intento 3	Medida	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Medida 5
	CAD					
1	32.15	32.23	32.23	32.27	32.26	32.22
2	32.1	31.76	32.31	32.23	31.92	32.02
3	32.1	32.26	32.32	32.06	31.88	31.92
4	20.15	20.22	20.24	20.24	20.21	20.20
5	20.15	20.13	20.18	20.25	20.29	20.16

Se puede apreciar en las medidas que las partes que se encuentran en voladizo presentan peor calidad que las que se imprimen de manera vertical. Se sigue observando falta de cilindridad y una tolerancia bastante grande en los tubos 2 y 3. Sin embargo, en el resto de tubos la tolerancia es muy buena y cumple con los parámetros esperados.

Aun contando con fallos de calidad en algunas partes de la pieza, se dio por buena la impresión y finalizado el molde.

5.1.2 IMPRESIÓN DEL MOLDE DEL CONJUNTO MANILLAR

El conjunto pedalier corresponde a la mostrada en Capítulo 4 en la Ilustración 37: Diseños de los componentes del cuadro. Para poder hacer referencia a las diferentes partes de la pieza, estas se nombraron de la siguiente manera:



Ilustración 52: Nombramiento de diferentes partes de la pieza; tubos 3 y 4 a la izquierda y tubos 2 y 1 a la derecha

La orientación y posición en la que se colocó la pieza para la impresión es la siguiente.

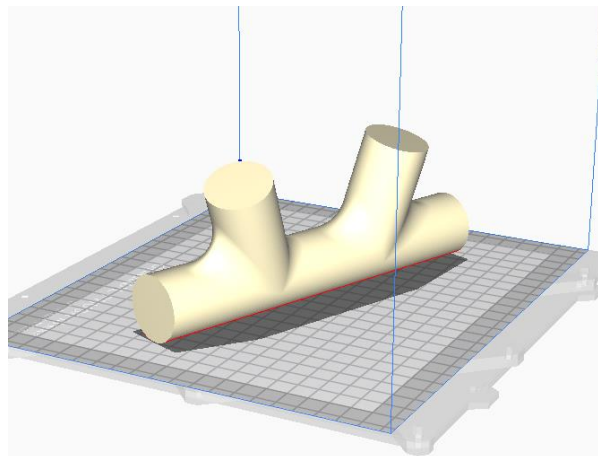


Ilustración 53: Demostración de la posición y orientación de la pieza

Hasta conseguir una buena impresión de esta pieza, se necesitaron tres intentos que se describen a continuación.

PRIMER INTENTO

Este intento fue el primero que se llevó a cabo. Se comenzó con una temperatura de 200°C y una velocidad de 35mm/s. En un principio costaba que se adhiriese la pieza a la cama, por lo que se fue aumentando la temperatura hasta mejorar la adherencia y llegar a los 60°C.

Tabla 21: Parámetros de configuración en el primer intento

Manillar	Primer Intento
Altura de capa inicial	0.2mm
Altura de capa general	0.2mm
Ancho de línea	0.4mm
Velocidad impresión	35mm/s
Temperatura impresión	200°C
Relleno	20%
Soporte	Zigzag
Adherencia a la placa de impresión	Balsa
Tiempos de impresión	11h 18min
Precio €	
Gr/m	69/32.07
Éxito	Sí

Las medidas tomadas en la pieza fueron las siguientes:

Intento 1	CAD	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Medida 5
1	32.1	32.10	32.45	32.30	32.5	32.00
2	32.1	31.80	32.20	32.20	31.95	32.10
3	32.1	32.15	32.25	32.35	32.25	32.30
4	32.1	32.25	32.20	32.30	32.25	32.30

Ilustración 54: Valores de la medición del primer intento

SEGUNDO INTENTO

El primer intento salió exitoso; sin embargo, manipulando la pieza uno de los tubos se despegó por una de las capas. Por tanto, se lanzó otra impresión con la siguiente configuración.

Tabla 22: Parámetros de configuración en el segundo intento

Manillar	Segundo Intento
Altura de capa inicial	0.2
Altura de capa general	0.15
Ancho de línea	0.3mm
Velocidad impresión	40 mm/s
Temperatura impresión	215
Relleno	7%
Soporte	Triángulos
Adherencia a la placa de impresión	Falda
Tiempos de impresión	12h 25min
Precio €	
Gr/m	46/21.09
Éxito	No

Lo que más sorprende es el tiempo de impresión cuando se ha reducido en un 13% la densidad de relleno y la velocidad se ha subido a 40mm/s. Esto es debido principalmente a la reducción del ancho de línea de 0.4mm a 0.3mm.

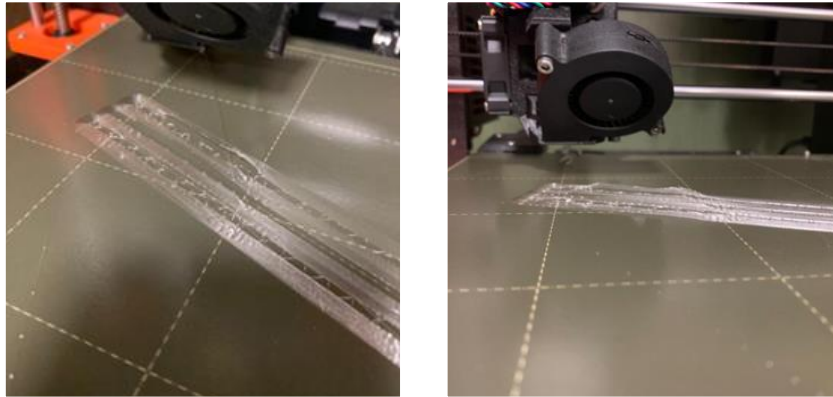


Ilustración 55: Fallos de impresión en el segundo intento

En este segundo intento la impresión falló en las primeras capas. La falda que se había establecido como tipo de adherencia a la cama se despegó. Es por eso por lo que se reinició la impresión varias veces, añadiendo adhesivo a la cama, en este caso laca especial para impresoras de FDM y aumentar la fijación de las primeras capas.

Finalmente, en el último intento, las capas seguían levantándose un poco; sin embargo, a medida que se apilaban, estas capas se iban fijando y recolocando. El resultado final fue el siguiente:



Ilustración 56: Resultado de impresión del segundo intento

El resultado final resultó bastante bueno a pesar de las primeras capas; pero debido a que formaban parte del soporte, la pieza en sí no se vio afectada.

Como se comentará más adelante, esta pieza se usó como molde; sin embargo, debido a problemas en el laminado tubo que repetirse dando lugar al tercer intento de impresión.

TERCER INTENTO

Se volvió a imprimir la pieza y esta vez se mejoraron en el CAD ciertas medidas. La configuración de los parámetros fue la misma que en la vez anterior.

Las medidas tomadas fueron las siguientes:

Tabla 23: Valores de la medición del tercer intento

Intento 1	CAD	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Medida 5
1	34.2	34.12	34.41	34.28	34.43	34.01
2	32.2	31.82	32.22	32.19	31.98	32.09
3	32.2	32.17	32.25	32.34	32.24	32.31
4	34.2	34.18	34.22	34.33	34.23	34.33

5.1.3 IMPRESIÓN DEL MOLDE DEL CONJUNTO PEDALIER

El conjunto pedalier corresponde a la mostrada en el Capítulo 4 en la Ilustración 37. Para poder hacer referencia a las diferentes partes de la pieza, estas se nombraron de la siguiente manera:



Ilustración 57: Nombramiento de diferentes partes de la pieza; tubos 4 y 5 a la izquierda y tubo 1 perpendicular a 2 y

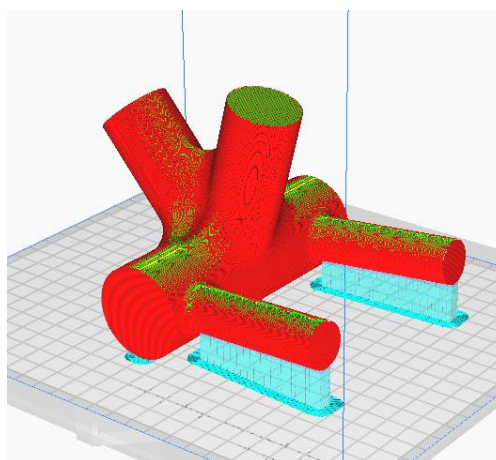


Ilustración 58: Demostración de la colocación de la pieza en la impresora

PRIMER INTENTO

El primer intento para imprimir el conjunto del pedalier se lanzó con la misma configuración que la de la pieza conjunto sillín.

Sillín	3intento
Altura de capa inicial	0.2mm
Altura de capa general	0.15mm
Ancho de línea	0.3mm
Velocidad capa general	60mm/s
Temperatura capa inicial	215
Temperatura inicial	205
Temperatura impresión	215
Adherencia a la placa de impresión	Borde
Soporte	Triángulo
Techo soporte-pieza	Sí
Relleno	10%
Tiempos de impresión	11h 40min
Precio €	
Gr/m	60/27.66
Éxito	Sí

Tras salir exitosa la impresión del molde del sillín, se lanzó esta pieza con la misma configuración y se imprimió correctamente. Estos fueron los resultados:



Ilustración 59: Resultado de impresión del primer intento

Sin embargo, en los tubos 4 y 5 al despegar el soporte, parte de la pieza también se despegaba. El problema estuvo en que los tubos 4 y 5 no estaban orientados perfectamente horizontalmente; por lo que una misma capa del soporte en toda la longitud del tubo forma parte de la pieza. Por tanto, al querer quitar el soporte en un lado, en el otro lado se está quitando parte de la pieza. Esto se aprecia en las dos fotos abajo a la derecha de la Ilustración 59.

La pieza debería repetirse ya que el acabado de esos dos tubos no fue correcto.

Tabla 24: Valores de la medición del primer intento

Intento 3	Medida	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Medida 5
	CAD					
1	41.1	41.16	41.19	40.84	41.30	40.74
2	32.15	32.23	32.27	32.17	32.26	32.24
3	32.15	32.31	32.18	32.23	32.34	32.21
4	20.2	-	-	-	-	-
5	20.2	-	-	-	-	-

Como se ha visto en otras piezas, aquellos tubos impresos en horizontal presentaron una tolerancia mayor que aquellos impresos en vertical.

SEGUNDO INTENTO

Para realizar el segundo intento simplemente se intentó colocar los tubos 4 y 5 lo más horizontalmente posible con el fin de evitar lo ocurrido con la anterior pieza.

El resultado fue una maraña de filamento por lo que no se imprimió ninguna pieza y fue material que se tuvo que tirar.

Se desconoce la causa de tal hecho, ya que la configuración fue la misma que el anterior. Uno de los problemas fue que se dejó la impresión por la noche sin vigilancia y cualquier fallo en una capa pudo acabar en ese resultado.

TERCER INTENTO

El tercer intento de impresión de esta pieza se llevó a cabo dos semanas después que el primer intento debido a problemas de disponibilidad del laboratorio, la impresora y la dedicación a otros procesos del trabajo.

La configuración en este intento fue la misma que en los dos anteriores. Sin embargo, los resultados no fueron buenos.

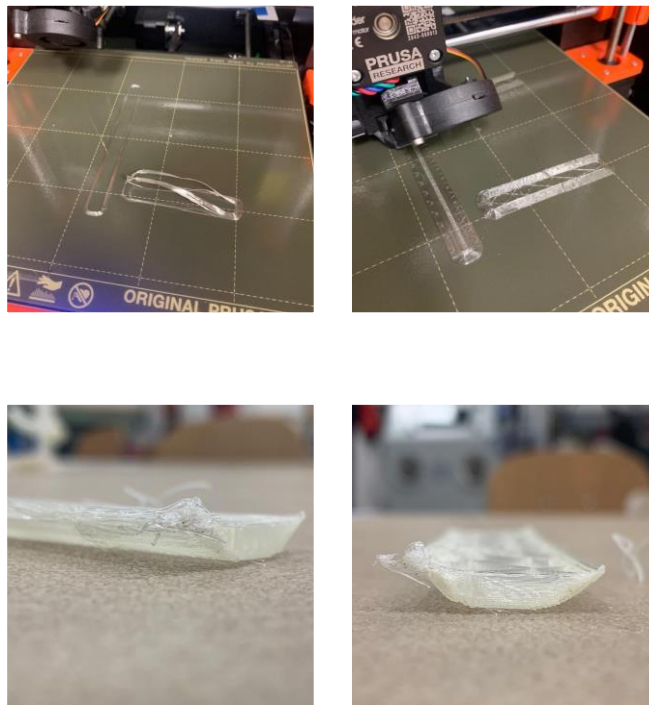


Ilustración 60: Fallos en el tercer intento de impresión

Por un lado, la balsa no se adhería bien a la placa por lo que se levantaba el material evitando que se apilaran correctamente las capas.

Por otro lado, una vez comenzada la pieza había partes en las que el material se despegaba de la capa anterior, por lo que esta se quedaba algo levantada y hacía que al moverse el extrusor el sensor de profundidad chocase con el material. Por ello, se producía lo que aparece mostrado en la Ilustración 60 abajo a la izquierda.

Después de varios intentos, el problema siguió produciéndose en el mismo sitio, aun cambiando parámetros como por ejemplo bajar la temperatura de impresión y la velocidad de impresión de las primeras capas, el error siguió produciéndose.

Se llegó a la conclusión de que el material, el cual es muy propenso a coger humedad debido a su condición de solubilidad, estuvo mucho tiempo fuera del envoltorio al aire libre lo que pudo estropearse con el paso de los meses cogiendo humedad.

Finalmente se pidió una bobina nueva; sin embargo, no se llegó a imprimir de nuevo esta pieza debido a falta de tiempo.

Debido a que la pieza del primer intento resultó buena a excepción del problema del soporte en los tubos 4 y 5, se llegó a la siguiente solución. Se aprovechó la posibilidad de disolver el material para quitar el material de soporte sin tener que quitar capas que perteneciesen ya a la pieza. El resultado fue el siguiente:



Ilustración 61: Resultados de disolver el material de soporte adherido a la pieza

Se midió el diámetro de los tubos tras quitarle el soporte, dando los siguientes valores:

Tabla 25: Valores de la medición del primer intento

Intento 3	Medida	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Medida 5
	CAD					

	ICAI	ICADE	CIHS			
1	41.1	41.16	41.19	40.84	41.30	40.74
2	32.15	32.23	32.27	32.17	32.26	32.24
3	32.15	32.31	32.18	32.23	32.34	32.21
4	20.2	21.22	20.85	20.32	20.27	20.52
5	20.2	20.30	20.39	20.48	20.42	20.23

Tras varios intentos para imprimir cada una de las piezas, los moldes estaban preparados para la laminación.

SILLÍN



PEDALIER



MANILLAR



Ilustración 62: Moldes terminados y listos para laminar

5.2 PROCESO DE LAMINACIÓN Y CURADO

Una vez estuvieron todos los moldes preparados comenzó la fase de laminación y aplicación de las capas de preimpregnado. El proceso se constituye de las siguientes fases, las cuales se describen más adelante.



Figura 6: Proceso de laminación y curado

A continuación, se presentan los materiales y equipos necesarios para llevar a cabo el procedimiento.

MATERIALES PARA LA FABRICACIÓN

1. Preimpregnados tipo WOVEN 2X2 de fibra de carbono
2. Preimpregnados tipo UNIDIRECCIONAL de fibra de carbono
3. Tubos de fibra de carbono 32x26
4. Tubos de fibra de carbono 20x16
5. Tubo de fibra de carbono 14x12
6. Moldes impresos
7. Epoxy adhesivo

HERRAMIENTAS Y EQUIPOS NECESARIOS DEL LABORATORIO

1. Horno
2. Bomba de vacío
3. Conector bomba vacío
4. Material de protección
5. Bata
6. Pila de ultrasonidos

Materiales para la fabricación



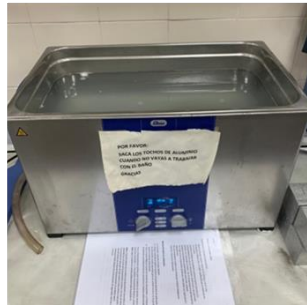
Bomba de vacío



Estufa



Pila de ultrasonidos



Lija eléctrica



Ilustración 63: Herramientas y equipos utilizados en el proceso de laminación y curado

7. Material para la fabricación
8. Bolsas de vacío
9. Manta de absorción
10. Masilla de cierre
11. Papel
12. Boli/rotulador
13. Tijeras
14. Cúter
15. Regla



Ilustración 64: Herramientas auxiliares

5.2.1 PROCESO DE LAMINACIÓN

Inicialmente tuvieron en cuenta varios puntos antes de comenzar con el proceso.

PREVIO AL PROCESO

- ✓ Los prepregs deben de estar guardados a una temperatura de -18°C en el congelador con el fin de mantener su estado correctamente. Se deben sacar con tiempo para que adopten una temperatura óptima para poder manipularlas correctamente.
- ✓ Debe de estar disponible el horno para el momento de la fabricación.
- ✓ Deben de estar todas los moldes correctamente impresos. Para ello, deberán de haberse analizado con anterioridad, medido correctamente y lijado con el fin de no tener remanentes de soporte.

Todos las fases que han de llevarse a cabo durante el proceso de laminación se listan a continuación.

1. Tener claro el orden y dirección de todas y cada una de las capas.
2. Hacer los patrones de las capas.
3. Con la forma de los patrones recortar las láminas de preimpregnado.
4. Apilar cada una de las capas de preimpregnado.
5. Si es necesario, aplicar resina epoxy para asegurar que no se despegan las capas entre ellas debido a la forma del molde.

6. Una vez apiladas todas las capas se envuelve la pieza con la manta de absorción o breather cloth, con el fin de asegurar un buen escape de aire y de absorber todo el exceso de resina (en caso de que sea necesario utilizar algo).
7. Meter la pieza envuelta en la manta dentro de la bolsa de vacío previamente preparada.
8. Aplicar vacío
9. Mandar la pieza a curar

Se explica en adelante el desarrollo de cada una de las piezas modeladas.

MANILLAR

Esta pieza fue la primera que se llevó a cabo. La primera iteración de laminación de esta pieza se llevó a cabo de la siguiente manera.

El primer paso fue hacer los patrones para las capas. Para esta pieza, se pensó que lo mejor era generar un patrón que envolviese el tubo principal recortando el agujero para que entrasen los dos tubos que salen del principal. Para ello, siguiendo la estructura de apilado definida, se recortan los patrones teniendo en cuenta la dirección de las fibras. En las imágenes a continuación, a la izquierda se ven patrones a 45° y -45° en preimpregnados unidireccionales y a la derecha se en los

patrones pintados en el preimpregnado de tipo woven.



Ilustración 65: Patrones dibujados y recortados para la primera pieza

Luego de tener todos los patrones recortados, se procedió a apilar los patrones según lo definido con anterioridad. En la siguiente Ilustración 66, se ve como en las dos imágenes de arriba se aplica las primeras capas de preimpregnado woven y a continuación, los preimpregnados unidireccionales, terminando simétricamente con los de tejido.

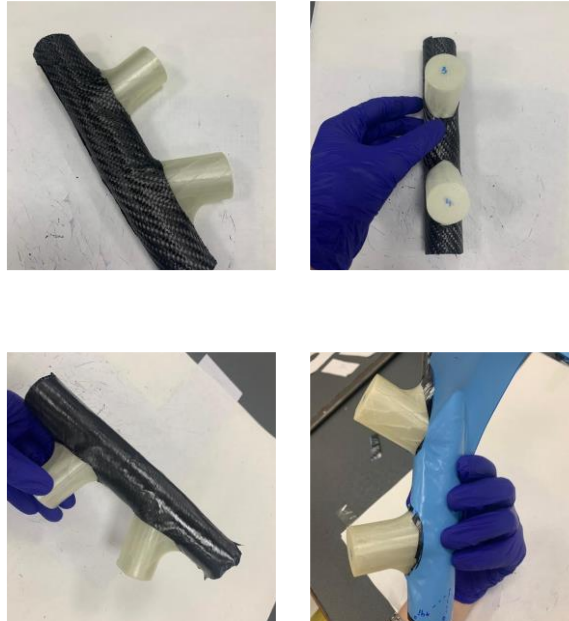


Ilustración 66: Apilado de capas de preimpregnado 1

Una vez laminado el tubo principal se pasó a laminar los otros dos tubos de la pieza. El proceso es el mismo que en el anterior, se recortaron los patrones y se aplicaron según lo establecido.

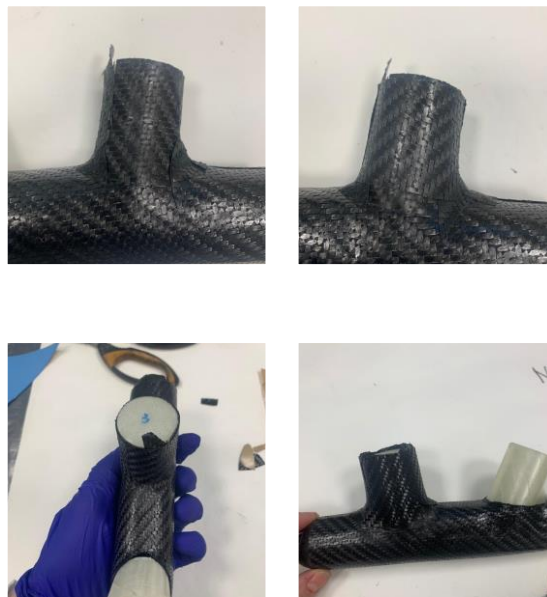


Ilustración 67: Apilado de capas de preimpregnado 2

Una vez terminados los dos tubos de la pieza, se tuvo la pieza lista y terminada para aplicarle vacío y curar.

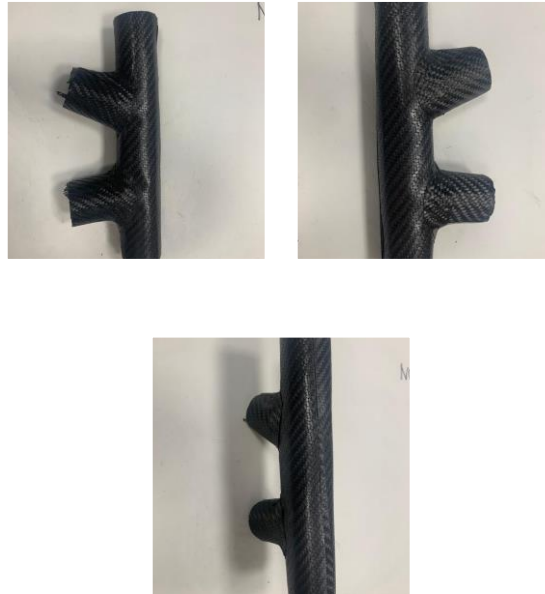


Ilustración 68: Pieza laminada lista para curar

5.2.1.1 Equivocaciones

Al ser la primera pieza que se laminó, hubo una serie de errores que hicieron que la pieza no fuese válida y tuviera que repetirse aprendiendo de los errores cometidos.

1. El primero de ellos fue en el diseño de los patrones para esta pieza. El error estuvo en querer cubrir la mayor parte de la pieza con un patrón entero. La idea de cubrir el tubo principal recortando los agujeros de los otros dos tubos dio lugar a varios fallos en el laminado.



Ilustración 69: Primer error en los patrones

2. Al ser un patrón tan grande y complicado de aplicar, era muy sencillo que se generaran arrugas al laminar. Se observa el resultado en la Ilustración 70, en la imagen de arriba a la izquierda.
3. Por el mismo motivo, era fácil que el patrón se fuese torciendo y la dirección de las fibras cambiase al rodear el tubo. Se puede apreciar en la tercera foto abajo a la izquierda de la Ilustración 70.
4. El patrón fue recortado de una vez antes del apilado, usando la misma forma y longitud para todas las capas. El problema resultó en que, en las últimas capas, el diámetro del tubo aumenta por las capas anteriores por lo que las últimas capas quedaron cortas y no cubrían toda la pieza. Se aprecia el error en la segunda foto arriba a la derecha de la Ilustración 70.
5. Una consecuencia del error anterior sumado al tipo de patrón realizado, es que se generan en la pieza huecos con falta de preimpregnado en ciertas capas. En caso de querer arreglar el error añadiendo un trozo de preimpregnado para tapar la falta es muy fácil que ocurra lo contrario y se superpongan patrones en una misma capa, generando un grosor desigual en ciertas zonas de la pieza.



Ilustración 70: Sucesión de errores en el primer apilado

6. Otros fallos se daban a la hora de despegar el plástico que cubre los preimpregnados. Dependiendo de cómo estuviesen las fibras orientadas había que tener mucho cuidado en

que no se despegasen unas de otras tal y como aparece en las imágenes siguientes.

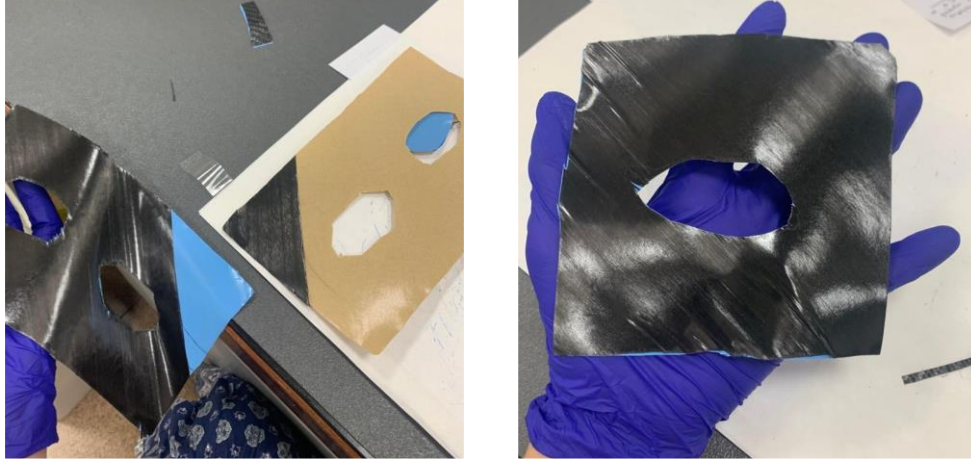


Ilustración 71: Despistes en la manipulación de los preimpregnados

7. Otros de los errores cometidos que impidió seguir con el plan de laminación establecido en un principio fue que una vez llegó el material, éste estuvo a temperatura ambiente una semana antes de meterlo en el congelador. Esto supuso que el preimpregnado woven comenzase su proceso de curado a 27°C y que, por tanto, fuese complicado aplicar las capas debido a su rigidez y falta de adhesivo por la resina ya curada.
8. El tejido al tener resina es pegajoso al tacto, es por ello por lo que se ha de mantener limpia la zona de trabajo ya que se podían quedar pegadas a la pieza en alguna capa motas de suciedad que generan imperfecciones y puntos débiles en la pieza.
9. Es importante el uso de guantes y bata durante este proceso. Las fibras son de un espesor mínimo y cualquier recorte pasado un tiempo se endurece y se convierten en astillas que se pinchan fácilmente en el cuerpo.

Una vez entendidos todos los errores se llevó a cabo una segunda prueba de la misma pieza mejorando el proceso y, por tanto, el acabado.

1. Los patrones realizados en este caso son los siguientes. En este caso fueron más pequeños y compactos. Uno de ellos cubre la parte baja del tubo central, otros dos cubren cada uno de

ellos los dos tubos salientes, en tres patrones diferentes se cubre la parte superior del tubo principal y por último se diseñaron patrones para generar el acuerdo de los radios.

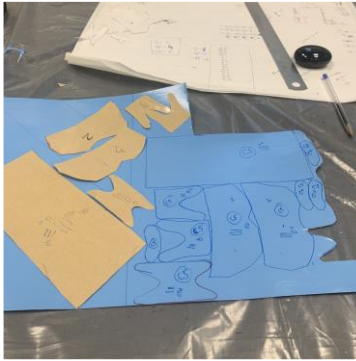


Ilustración 72: Nuevos patrones para el manillar

2. En este caso, para evitar el error de hacer todos los patrones de todas las capas iguales se fueron dibujando y recortando a medida que se iban aplicando. De esta forma se recortaba la longitud necesaria con el fin de que no faltase o sobrase material.

A continuación, se muestran imágenes del proceso de laminación del manillar.

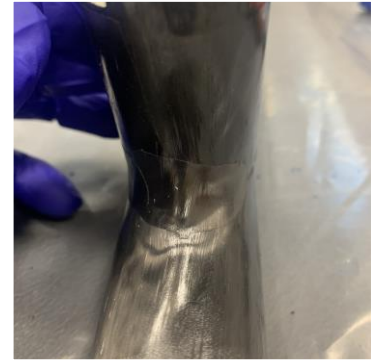
Patronaje



Orientación 45º



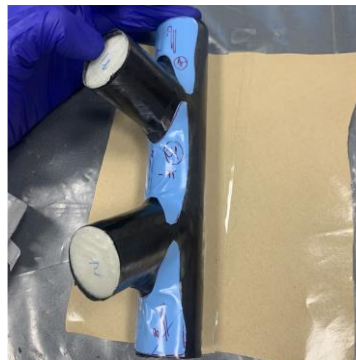
Orientación 0º



Orientación 0º



Orientación -45º



Orientación -45º



Orientación 45º



Ilustración 73: Imágenes del proceso de laminación del manillar

Todos los errores cometidos durante la primera pieza fueron enmendados en todas las piezas siguientes. Esta pieza debido a su geometría, el patronaje era bastante complicado. Se requería bastantes patrones que pudiesen cubrir todos los huecos, así como generar los radios de acuerdo entre

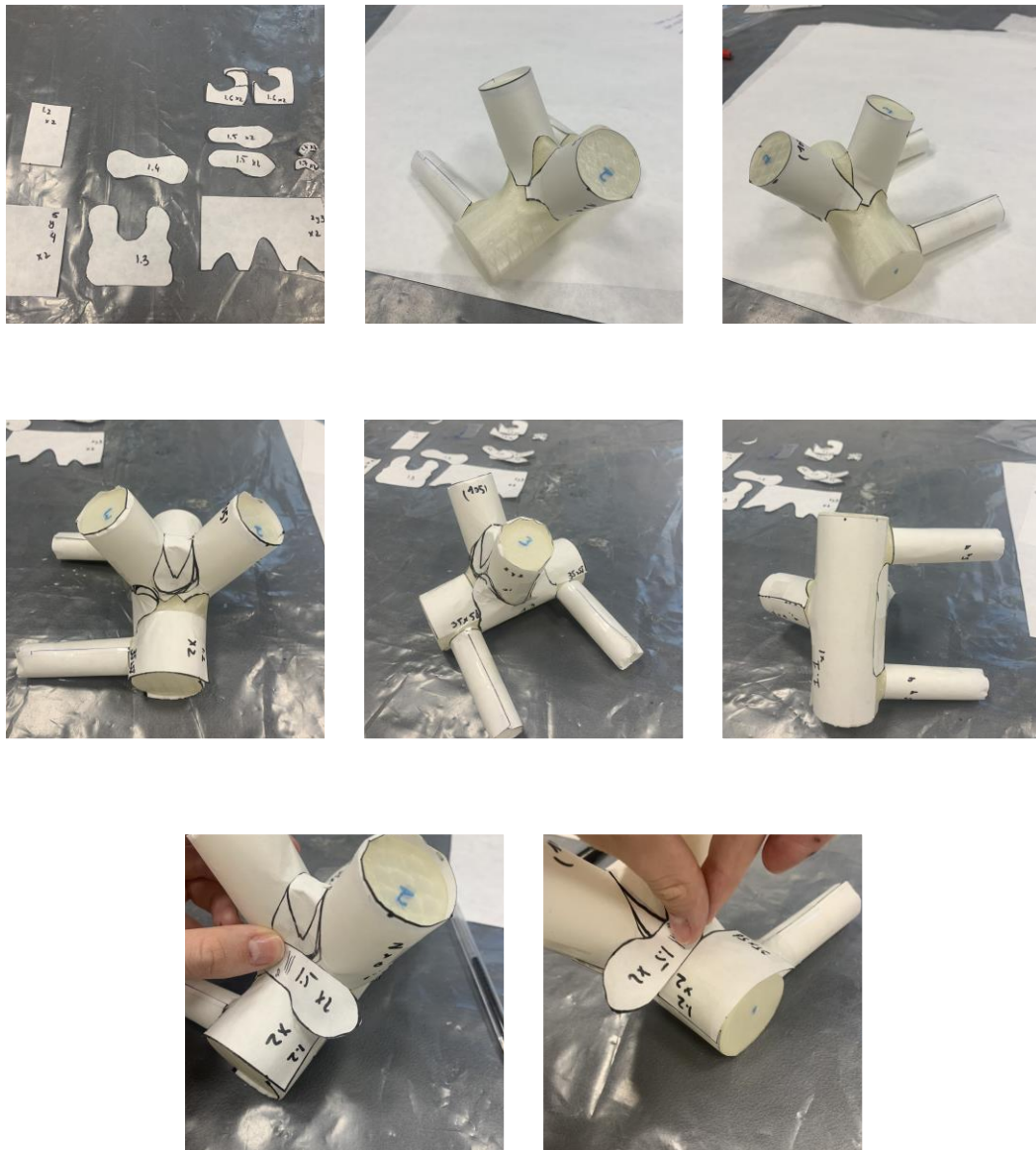
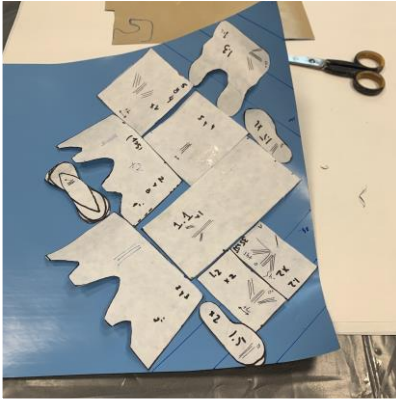


Ilustración 74: Creación de patrones para el pedalier

tubos. A continuación, se muestran imágenes del proceso de patronaje para esta pieza.

Recorte patrones



Orientación a 0º



Orientación a 0º



Orientación a -45º



Orientación a 0º



Ilustración 75: Imágenes del proceso de laminación del manillar

Se contó con 14 patrones para generar una capa de preimpregnado en toda la pieza. Los patrones se hicieron con papel del laboratorio y se fueron diseñando y probando en la pieza hasta que ésta quedara cubierta en su totalidad.

Un vez se tuvieron listos los patrones se procedió a laminar. Al igual que en el segundo intento con el manillar, los patrones se fueron recortando a medida que se avanzaba en el número de capas aplicadas.

En las siguientes imágenes se aprecia el acabado de los radios y la aplicación de los patrones.



Ilustración 76: Acabado de los radios y aplicación de patrones



Ilustración 77: Acabado de los radios y aplicación de patrones

SILLÍN

Al igual que el pedalier, el sillín presentaba una geometría complicada que dificultaba la generación de los patrones. Finalmente se necesitaron 13 patrones para completar una capa de preimpregnado.



Ilustración 78: Creación de patrones para el sillín



Ilustración 79: Proceso de aplicación de las capas

5.2.2 PROCESO DE CURADO

Una vez las piezas estuvieron laminadas se procedió a curar el material con el fin de conseguir las propiedades mecánicas óptimas y esperadas.

5.2.2.1 Aplicación de vacío

Previo al proceso de curado, se debe aplicar vacío a las piezas con el fin de asegurar que no quede aire entre las capas y que, durante el curado, la resina se homogeniza por toda la pieza y no se levanta ninguna capa durante el curado.

Para ello se llevó a cabo de la siguiente forma:

1. La bolsa de vacío se recortó a una medida apta para albergar la pieza dentro. Hay que tener en cuenta que, al ser piezas complejas y tridimensionales, la bolsa debe tocar todas las partes de la pieza por lo que ésta debe ser lo suficientemente grande para llegar a todos los huecos de la pieza.

2. Para sellar la bolsa se utilizó la masilla de cierre. Para ello, se dio media vuelta a la bolsa y se pegó por el interior toda la masilla que se fuese a usar. Una vez pegada por un lado, se dio la vuelta a la bolsa de nuevo para pegarla por el otro lado. Debido a que no se disponía de un conector que evitase que se despresurice la bolsa al quitar el tubo, se ideó una forma de evitar que esto sucediese sin el conector. Se pegó dos líneas de masilla en la bolsa, tal y como se aprecia en la imagen 2 de la Ilustración 80, la que está más al exterior cubría toda la apertura de la bolsa, sin embargo, la segunda línea cubría casi toda la apertura a excepción de una pequeña apertura en uno de los lados. Entre estos dos cierres se situó la entrada del tubo también usando masilla. De esta forma tras aplicar vacío se presiona contra la masilla la pequeña apertura cerrando el paso a la cámara donde se aplica vacío y separándola de la pieza. Así se pudo sacar el tubo sin afectar al vacío de la pieza. En la imagen 4 se está aplicando el vacío y en la última, el vacío ya se ha aplicado y la entrada ha quedado tapada con la masilla.



Ilustración 80: Proceso de aplicación de vacío

5.2.2.2 Curado

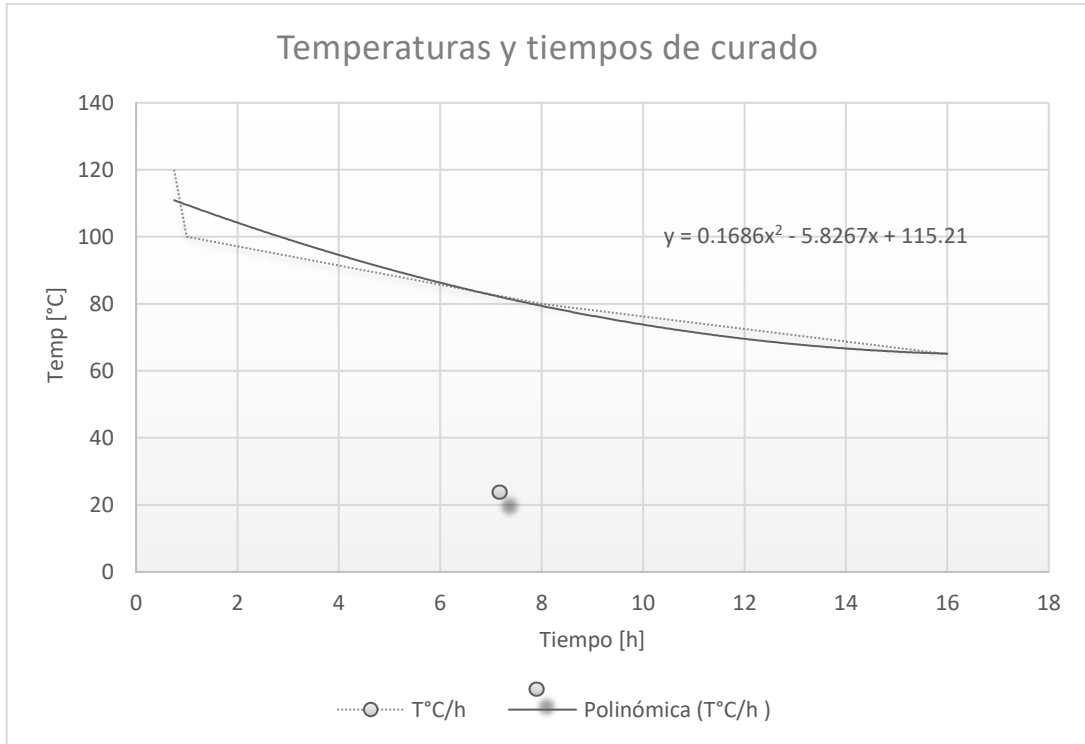
El proceso de curado que aconseja el fabricante del epoxy en los preimpregnados es el siguiente:

Tabla 26: Procesos de curado

Cure	Initial Min Cure	Tg
65°C (minimum)	16 hours	70°C
80°C	8 hours	85°C
100°C	1 hour	105°C
120°C (maximum)	45 minutes	125°C
135°C Post-cure	2 hours	140°C

Tg corresponde con la temperatura de transición vítrea, la temperatura por encima de la cual se produce una transición reversible en la que las regiones no cristalinas del polímero cambian de un estado vítreo (rígido y frágil) a un estado denominado viscoelástico, con una pérdida importante de rigidez.[13]

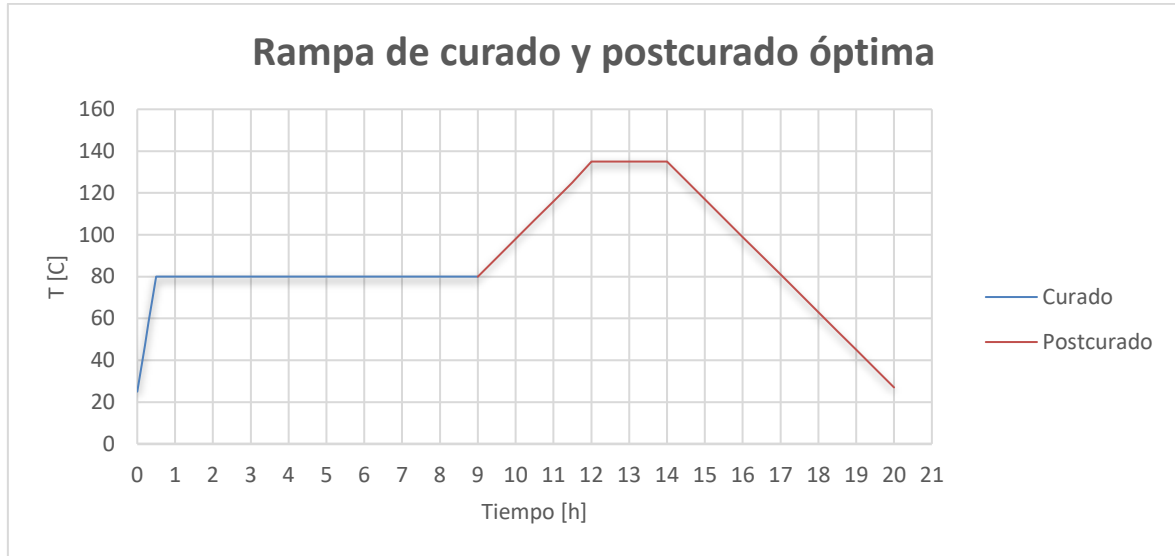
Esta misma tabla se representa en la siguiente gráfica.



Gráfica 3: Representación de los tiempos y temperaturas de curado

Debido a que el fabricante del material utilizado para los moldes indica que la temperatura de reblandecimiento es de 60 °C; para evitar cualquier cambio en la forma de la pieza debido a ese reblandecimiento, se estableció la temperatura de curado entre 65°C y 80°C. Sin embargo, se hizo una prueba con una probeta impreso de este material y se sometió a al proceso de curado de 100°C en 1 hora. El resultado fue muy bueno ya que la forma de la probeta se mantuvo intacta. Solamente al ejercer cierta presión, el material se deformaba ligeramente. Sin embargo, eso fue suficiente como para que el molde aguante un proceso de postcurado intacto a 100°C durante 1 hora.

Las velocidades de rampa no deben superar los 3°C/min durante el curado inicial y los 0,3°C/min durante el postcurado según el fabricante de la resina que se utiliza en los preimpregnados utilizados. Sin embargo, la estufa que se utilizó para el curado de las piezas no tiene control de rampas por lo que las rampas no pudieron configurarse.



Gráfica 4: Curva de calentamiento durante el curado de 1.8°C/min. Rampas de postcurado a 0.3°C/min.

Esta curva refleja el proceso de curado que debería hacerse sobre las piezas; sin embargo, aparte de requerir un horno que tuviera opción sobre el control de rampas, el tiempo requerido para realizar todo el proceso es muy largo, ya que 0,3°C/min es demasiado estricto.

Los procesos de curado y postcurado llevados a cabo para las piezas fueron los siguientes:

4. El curado del sillín se llevó a cabo a 65°C durante 16 horas. Tras ese periodo se llevó a cabo el postcurado a 135°C durante 2 horas.
5. El curado del manillar se realizó a 80°C durante 8 horas tal y como indicaba el fabricante. Tras el curado, se llevó a cabo el postcurado a 135°C durante dos horas.
6. El curado del pedalier se realizó en 1 hora a 100°C y después el postcurado a 135°C durante 2 horas.



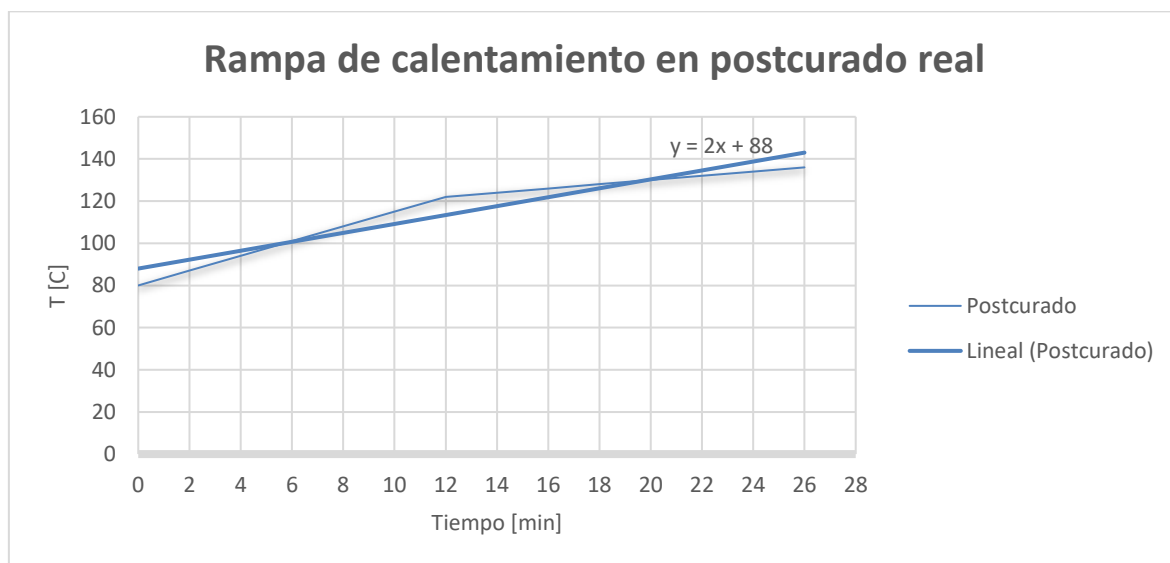
Gráfica 5: Sillín listo para curar

Se explica a continuación el proceso de postcurado llevado a cabo con la estufa que estaba disponible en el laboratorio debido al estricto requerimiento de rampas a 0,3°C/min.

5.2.2.3 Postcurado

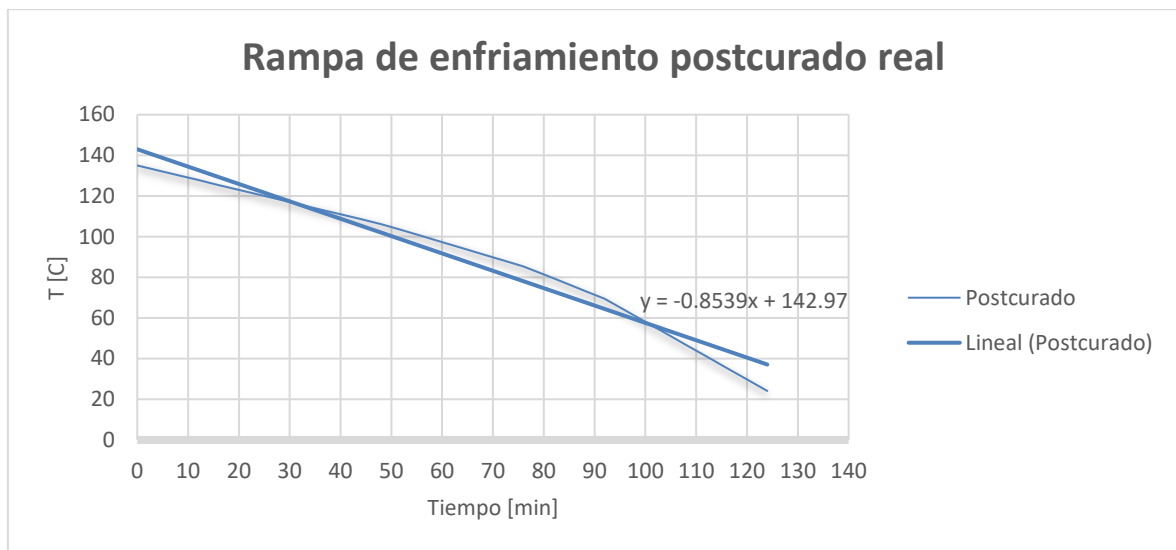
En todas las piezas el postcurado se realizó de la misma forma: una vez realizado el curado, se subió la temperatura a los 135°C y se mantuvo durante 2 horas esa temperatura para más tarde dejar enfriar la estufa hasta temperatura ambiente.

Para un curado a 80°C, el calentamiento en ese caso fue de la siguiente manera:



Gráfica 6: Rampa de calentamiento en el postcurado real

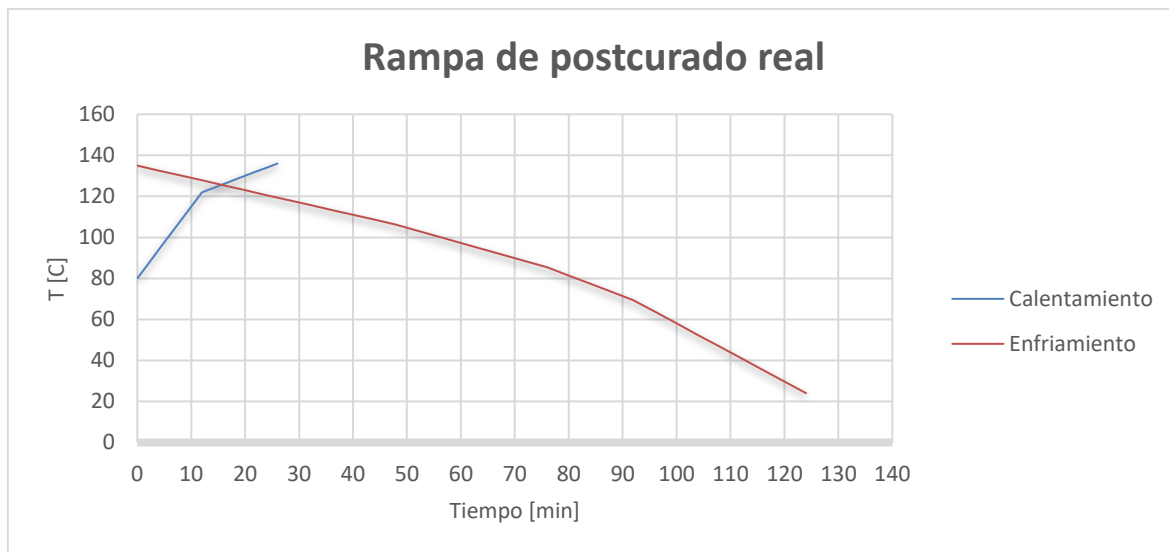
Desde los 80°C la rampa de calentamiento estaba medida en torno a 3-4°C/min hasta llegar a los 120°C que disminuyó a 1°C/min hasta los 135°C. Se mide a partir de la línea de tendencia que la media de calentamiento en el postcurado es de 2°C/min, mucho mayor que lo aconsejado por el fabricante. Sin embargo, aunque no se han realizado ningún ensayo no destructivo que verifique la calidad del laminado, no se ha visualizado ningún defecto en la pieza que se haya podido producir debido a estos calentamientos.



Gráfica 7: Rampa de enfriamiento en el postcurado real

Sin embargo, en cuanto al enfriamiento, el proceso es mucho más lento ya que la estufa se mantiene cerrada y el calor se disipa solo por conducción hacia el exterior. No obstante, a partir de los 65°C se abrió un poco la puerta de la estufa con el fin de acelerar el proceso. Se observa que la tendencia del enfriamiento era menor de 1°C/min, por lo que la diferencia con lo recomendado no era tan alta.

En la gráfica de abajo se aprecia la diferencia en las rampas de tiempos entre el calentamiento y el enfriamiento en el proceso de postcurado.



Gráfica 8: Curvas de enfriamiento y calentamiento en el postcurado

5.2.3 PROCESO DE ELIMINACIÓN DEL MOLDE

Una vez curada la pieza se debe eliminar el molde inicial impreso en PVOH. Se eligió este material debido a su capacidad de diluirse con agua.

Debido a la disponibilidad en el laboratorio de un limpiador ultrasónico, se utilizó éste como cuba para eliminar el molde del interior de las piezas.



Ilustración 81: Limpiador ultrasónico usado para eliminar los moldes

Esta máquina permitía hacer limpiezas a 37kHz para aplicaciones estándar y a 80kHz para procesos de limpieza más exhaustivos. Además de los ultrasonidos, se puede controlar la temperatura y la duración del proceso. Por tanto, para eliminar el molde se optó por usar una frecuencia de 37kHz, al 70-100% de potencia, una temperatura de 40°C y durante un periodo de 40 min. Si bien es cierto que el tiempo depende mucho del tipo de pieza y su complejidad, requiriendo más tiempo para piezas como el pedalier, por ejemplo.



Ilustración 82: Parámetros de limpieza en la cuba ultrasónica

Una vez finalizado el tiempo, el estado de las piezas era el siguiente:



Ilustración 83: Estado de las piezas tras la eliminación del molde

Aunque el molde se eliminó prácticamente en su totalidad, fue necesario un proceso de limpieza posterior para suprimir los remanentes. Ciertas zonas quedaron bien adheridas al molde y fue necesario rascar con espátulas para sacar los últimos restos.

Una vez eliminado el molde el resultado de las piezas fue el siguiente:



Ilustración 84: Estado de las piezas tras la limpieza

5.2.4 PROCESO DE LIJADO

Según se aprecia en las imágenes, se observan ciertas manchas en el acabado. Estas son debido a que, al aplicar vacío, debido a la compleja geometría, se generaban arrugas en la bolsa y, por tanto, no toda la superficie de la pieza se encontraba en contacto con la bolsa. En la Ilustración 84, la primera foto arriba a la izquierda se puede observar cierta mejora en el acabado respecto a la pieza correspondiente con las imágenes de arriba a la derecha. Al ver el resultado de las arrugas de la bolsa, se optó por disminuir este efecto recortando trozos de bolsa de vacío y colocándolos alrededor de diferentes partes de la pieza intentando maximizar el área de contacto. Así, aunque se generasen arrugas en la bolsa al aplicar vacío, al estar forrado previamente, esta textura en el acabado se minimizaba.

Por otro lado, los bordes de las piezas eran desiguales y con el número de capas no homogéneo; es decir, al ser el borde de la pieza, ciertas capas se apilaban más hacia un lado o hacia otro haciendo

que los bordes no fuesen homogéneos. En las siguientes imágenes se puede apreciar este efecto en algunas de las piezas.



Ilustración 85: Bordes de las piezas desiguales

Por último, en la última capa, algunos bordes de ciertos patrones se levantaron teniendo varias fibras sin adherir. Por esto y los motivos anteriores, era necesario un proceso de lijado de la pieza para homogenizar la superficie y los bordes y mejorar el aspecto de la pieza.

Para ello, se utilizó para la superficie lijas de tamaño de grano de 240 y 120 para la eliminación de las fibras despegadas y de 320 para la última pasada. Para los bordes se utilizó la máquina eléctrica de lijar con una lija de grano muy grueso.

El resultado final de este proceso de laminado y curado fue el siguiente:



Ilustración 86: Resultado final tras el proceso completo de laminado y curado

5.2.5 COMPROBACIÓN DE LAS MEDIDAS

Una vez terminadas las piezas, se llevó a cabo la medición del diámetro de los tubos con el objetivo de analizar las desviaciones con respecto a las medidas tomadas en los moldes.

Tabla 27: Medidas de la pieza final del sillín

Sillín (mm)	Medida CAD	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Medida 5
1	32.15	32.25	32.15	32.18	32.05	32.20
2	32.1	32.30	32.36	32.39	32.53	32.32
3	32.1	32.04	31.88	32.35	32,23	32.05
4	20.15	20.14	20.35	20.39	20.35	20.22
5	20.15	20.46	20.27	20.38	20.31	20.33

Tabla 28: Medidas de la pieza final del manillar

Manillar (mm)	Medida CAD	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Medida 5
1	34.2	34.38	34.19	34.28	34.39	34.22
2	32.2	32.33	32.45	32.45	32.53	32.13
3	32.2	32.04	32.16	32.55	32.23	32.6
4	34.2	34.16	34.28	34.31	34.24	34.29

Tabla 29: Medidas de la pieza final del pedalier

Pedalier (mm)	Medida CAD	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Medida 5
1	41.1	41.19	41.81	41.30	41.79	41.66
2	32.15	32.20	32.52	32.16	32.18	32.22
3	32.15	32.63	32.21	32.23	32.25	32.04
4	20.2	21.22	20.85	20.32	20.27	20.52
5	20.2	20.30	20.39	20.48	20.42	20.23

Tabla 30: Comparación de medidas entre los moldes y las piezas finales

Sillín	Medida CAD	Moldes	Piezas terminadas	Diferencia
		MEDIA	MEDIA	
1	32.15	32.17	32.24	-0.08
2	32.1	32.38	32.05	0.33
3	32.1	32.11	32.09	0.02
4	20.15	20.29	20.22	0.07
5	20.15	20.35	20.20	0.15

Manillar	Medida CAD	MEDIA	MEDIA	Diferencia
1	34.2	34.25	34.292	0.04
2	32.2	32.06	32.378	0.32

	3	32.2	32.262	32.316	0.05
	4	34.2	34.258	34.256	-0.002
	Pedallier	Medida CAD	MEDIA	MEDIA	Diferencia
	1	41.1	41.55	41.05	0.50
	2	32.15	32.26	32.23	0.02
	3	32.15	32.27	32.25	0.02
	4	20.2	20.64	20.28	0.36
	5	20.2	20.36	20.29	0.07

Se puede comprobar que, a excepción de la primera medida del sillín, las piezas finales tienen unas medidas algo superiores al molde. Para próximos diseños, se deberá tener en cuenta que esa diferencia está en torno a 0.15 mm de media.

5.3 PROCESO ENSAMBLAJE

Se procedió entonces al ensamblaje de todas las piezas para formar el cuadro. Antes de comenzar con el pegado debe cortarse los tubos y lijar la superficie.

5.3.1 CORTE Y LIJADO

El corte de los tubos se realizó en una sierra mecánica vertical con una sierra especial con punta de diamante que pudiera cortar la fibra de carbono sin problema. Para ello fue necesario el uso de equipación especial como gafas y mascarilla además de guantes y bata, ya que la viruta de la fibra de carbono es tóxica si se inhala. Además, se usó durante el corte un aspirador para absorber el polvo generado.

Las medidas dispuestas para cortar los tubos se establecieron para asegurar que la longitud de la superficie de pegado era mínimo de 30mm en todos los tubos. La longitud de los tubos finalmente es:

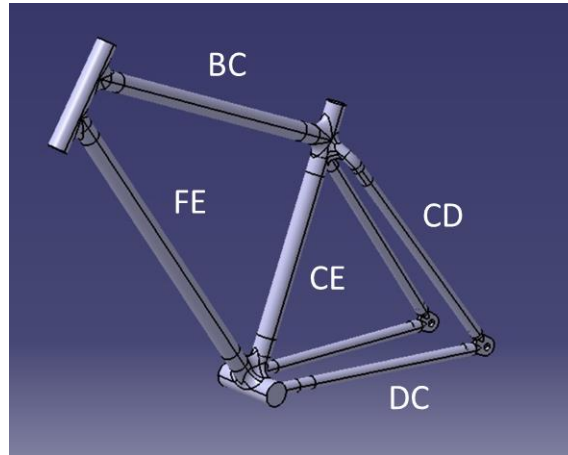


Ilustración 87: Nombre de los tubos

Tabla 31: Medidas de los tubos

Tubo	Longitud
BC	500
FE	610
CE	356
CD	410
DE	355



Sobranete



Ilustración 88: Tubos cortados

Una vez cortado, para aumentar la capacidad de pegado entre dos superficies fue necesario:

1. Lijar ambas superficies
2. Limpiar bien las superficies

Para lo primero se usó en el interior de las piezas moldeadas papel de lija de tamaño de grano de 120 y 240. Para el caso de los tubos, se usó la chorreadora de arena de aluminio.

Para la limpieza de las superficies se usó papel de laboratorio e isopropanol. En el siguiente conjunto de imágenes se adjunta la chorreadora utilizada para lijar los tubos, el isopropanol para

limpiar las superficies y abajo los resultados tras lijar y limpiar los tubos y el interior de las piezas.



Ilustración 89: Equipos usados para lijar y limpiar las piezas y acabado final

5.3.2 PEGADO

Para el pegado de los tubos a las piezas moldeadas, se utilizó un epoxy para uso en aplicaciones donde se requiere dureza y alta resistencia y en la construcción de ensamblajes de material compuesto. Se trata del 3M Scotch-Weld EPX Adhesive DP490 con las siguientes características principales.

Tabla 32: Características principales del Epoxy

EPX Adhesive DP490	Base	Acelerador
Proporción de mezcla	1	0.5
Color	Negro	Blanco
Tiempo de trabajo	1.5 horas mínimo a 23°C	
Tiempo para conseguir resistencia	4-6 horas a 23°C	
Tiempo para resistencia completa	7 días	
Ciclo de curado 1	7 días a 23°C	
Ciclo de curado 2	24 horas a 23°C y 1 hora a 80°C	
Adhesion to Carbon fiber reinforced epoxy.	36.1 (Cohesive)	
Shear strength (N/mm2)		

Una parte importante del pegado es el espacio que hay entre las dos superficies a pegar. Para calcular esa distancia, se basó en los estudios y la técnica utilizada en el ensamblaje de los tubos de la suspensión del vehículo de Formula Student del equipo del ISC de la Universidad Pontificia de Comillas. En ese caso, se llevó a cabo el pegado de las barras de suspensión con un epoxy parecido al utilizado en este proyecto. En el informe se explica la técnica utilizada para el pegado y el gap necesario para obtener unos resultados óptimos.[12]

Para poder aplicar el adhesivo fue necesario el uso de una pistola y boquilla especiales que permitiera hacer la mezcla correctamente de la base y el acelerador. También se necesitaron paletas de madera para extender y quitar el remanente de epoxy al aplicarlo.



Ilustración 90: Pistola de aplicación y boquilla para el Epoxy

Para que el pegado se efectuase de manera correcta el método de aplicación fue el siguiente. Una vez abierto el epoxy y colocado en la pistola, se presionó y se desechó parte hasta que la mezcla se hubiera completado. Entonces se aplicó una buena cantidad dentro de la pieza donde se insertaba el tubo, extendiéndolo luego con la paleta de madera asegurándose de que toda la superficie estuviera bañada de adhesivo. Después se hizo lo mismo en toda la zona de pegado del tubo por fuera. Una vez ambas piezas tenían aplicado el epoxy, se insertó el tubo en la pieza girando ligeramente hacia ambos lados a la vez que se introducía para garantizar que se aplicase bien entre las dos superficies. Una vez introducido se trató de homogenizar el remanente que se había quedado sin quitarlo del todo ya que eso refuerza la unión.



Ilustración 91: Resultado tras la aplicación del adhesivo

Como según especifica la hoja técnica del adhesivo, el tiempo mínimo para asegurar el pegado y poder manipular la estructura es de 4 a 6 horas, se decidió realizar el proceso en dos días con dos días de espera entre el primero y el segundo.

El primer día se decidió pegar todos los tubos que irían al pedalier y todos los tubos que irían pegados al sillín, pegando el tubo de unión entre ellos al pedalier. Para manipular la pieza con tubos ya insertados, se esperó un mínimo de 4 horas para asegurar que la mínima manipulación de la pieza no afectara a los tubos ya pegados. A continuación, se muestra el proceso de pegado llevado a cabo el primer día.

Vainas inferiores al pedalier



Vainas superiores al sillín



Tubo central al pedalier



Tubo inferior al pedalier



Tubo inferior al pedalier



Tubo superior al sillín



Ilustración 92: Proceso de pegado y ensamblaje

En la imagen se muestra cómo quedaron las piezas hasta dos días después para continuar con el ensamblaje entre ambos.



Ilustración 93: Resultado del pegado tras el primer día

El segundo día de pegado se llevó a cabo el pegado entre el sillín y el pedalier a la vez que el tubo inferior y superior al manillar.

Posicionamiento de las piezas



Pegado del manillar y el sillín a la vez



Resultado final



Ilustración 94: Proceso de pegado el segundo día

Una vez pegados todos los componentes y pasado un tiempo de curado de 4 días, el resultado fue el siguiente:



Ilustración 95: Resultado final tras la curado del adhesivo

5.3.3 PROCESO DE ACABADO

El proceso de acabado se compuso de los siguientes pasos:

1. Lijar los excedentes de adhesivo.

Se utilizó la lija eléctrica para quitar los pegotes más grandes y papel de lija 120 para terminar.

2. Tapar las uniones con “trapos” de preimpregnado con el fin de embellecer las uniones. Con sobrantes de preimpregnado unidireccional se rodearon las uniones cubriendo el adhesivo.
3. Barnizar el cuadro con barniz de materiales compuestos.

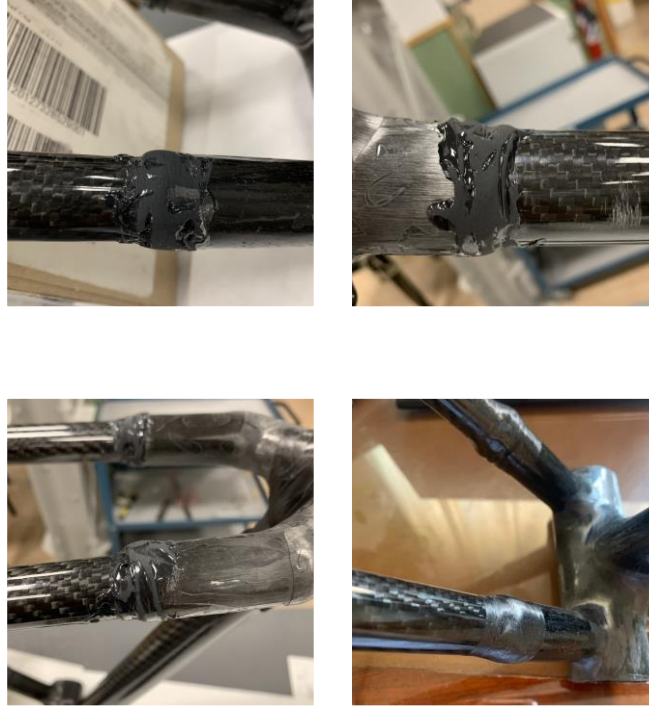


Ilustración 96: Lijado de excedente de adhesivo y uso de preimpregnado

Una vez terminado el cuadro se lleva a pesar, dando un valor de 1,13 kg.

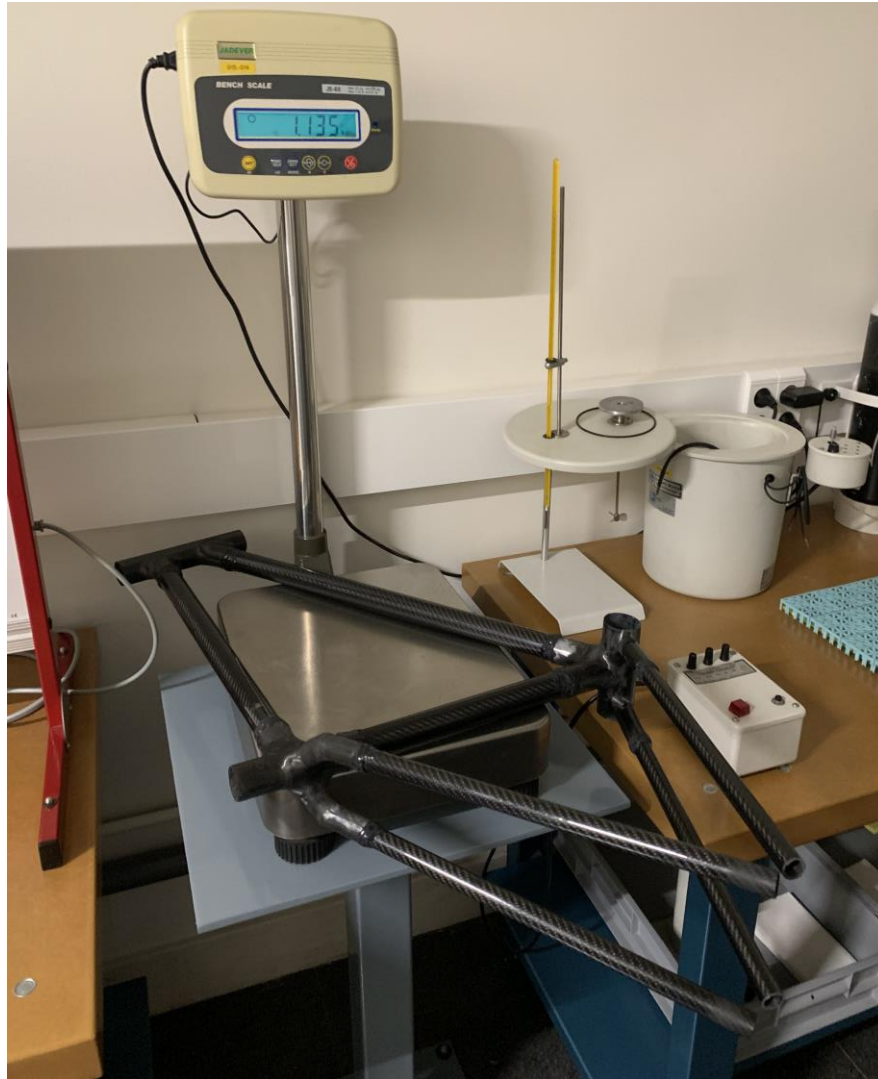


Ilustración 97: Peso del cuadro

5.4 ANCLAJES TRASEROS

Los anclajes traseros debido a su tamaño y forma, se decidió mejor que estas dos piezas fuesen fabricadas en aluminio en lugar de en material compuesto. Para ello, el proceso se basaba en su fabricación por fundición, ya que se trata de una pieza pequeña, con una geometría sencilla con la necesidad del uso de un solo macho.

Por otro lado, el pegado de piezas de aluminio con materiales compuestos no es problema, ya que, si bien el epoxy utilizado es válido para esta aplicación, el mismo método está siendo utilizado para el

montaje de los tubos de la suspensión del Formula Student del equipo de la universidad ISC Formula Student.

5.5 LECCIONES APRENDIDAS

Durante el proceso sucedieron una serie de deslices que llevaron a cambiar algunos pasos del proceso.

1. El primero y más importante de todos fue la gestión de la llegada de los materiales para la fabricación.

Como se ha explicado anteriormente, el preimpregnado es un material que contiene las fibras y la resina en un estado de semicurado. Para que esta se mantenga en ese estado la conservación debe ser a una temperatura en torno a los -16°C . En caso contrario, el máximo periodo de tiempo a una temperatura de 20°C es de 21 días según el fabricante. Sin embargo, cuando llegó el paquete con el material, se mantuvo éste durante un periodo de casi 10 días a una temperatura aproximada de 26°C . La consecuencia de este hecho supuso el inicio del curado del preimpregnado woven lo cual hizo que la lámina se rigidizara y disminuyese considerablemente la capacidad de pegado. Por tanto, se hizo casi imposible la aplicación de este tipo de lámina durante el moldeado. Se intentó, sin embargo, aplicarlo en la primera pieza moldeada, obteniendo el siguiente resultado.

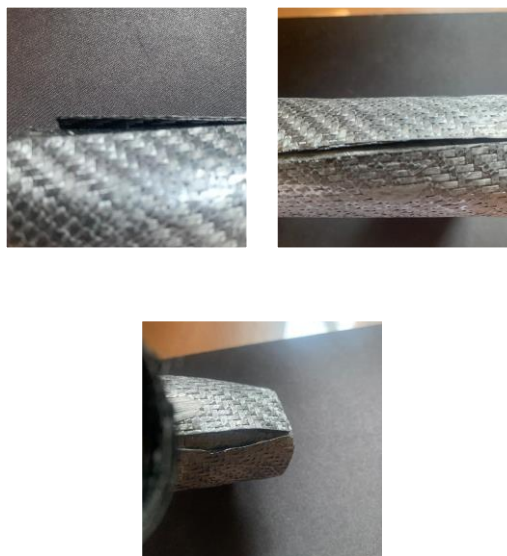


Ilustración 98: Resultado tras el curado en las últimas capas de tejido woven

Se puede observar que, tras la curado de la pieza, las capas de tejido woven se levantaron debido a la falta de adhesión de la resina. Así mismo, durante el apilado en otras de las piezas se tuvo que decidir retirarla del molde debido a la imposibilidad de poder mantener la adherencia.

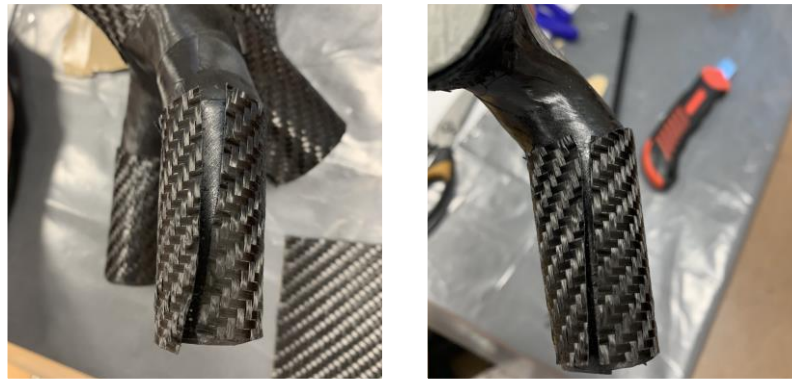


Ilustración 99: Estado del tejido woven durante el apilado

Debido a esto, se cambió el apilado suprimiendo las capas de este tejido (woven) y usando en su lugar las de tejido UD, en las siguientes direcciones.

Tabla 33: Apilado final del sillín

SILLÍN				
Capa	Tipo	Grosor	Ángulo	Total espesor (mm)
1	WOVEN	0.3	0	2.6
2	WOVEN	0.3	0	
3	UD	0.2	45	
4	UD	0.2	0	
5	UD	0.2	-45	
6	UD	0.2	0	
7	UD	0.2	0	
8	UD	0.2	-45	
9	UD	0.2	0	
10	UD	0.2	45	
11	UD	0.2	0	
12	UD	0.2	0	

Tabla 34: Apilado final del pedalier

PEDALIER				
Capa	Tipo	Grosor	Ángulo	Total espesor (mm)
1	UD	0.2	0	2.4
2	UD	0.2	45	
3	UD	0.2	0	
4	UD	0.2	-45	
5	UD	0.2	45	
6	UD	0.2	0	
7	UD	0.2	0	
8	UD	0.2	45	
9	UD	0.2	-45	
10	UD	0.2	0	
11	UD	0.2	45	
12	UD	0.2	0	

Tabla 35: Apilado final del manillar

MANILLAR

Capa	Tipo	Grosor	Ángulo	Total espesor (mm)
1	UD	0.2	0	2.4
2	UD	0.2	45	
3	UD	0.2	0	
4	UD	0.2	-45	
5	UD	0.2	45	
6	UD	0.2	0	
7	UD	0.2	0	
8	UD	0.2	45	
9	UD	0.2	-45	
10	UD	0.2	0	
11	UD	0.2	45	
12	UD	0.2	0	

Se han adjuntado las tablas en orden de ejecución del laminado. Es por ello por lo que el sillín en un principio se aplicó las dos primeras capas de tejido woven. Aunque el laminado debe ser simétrico, debido a la imposibilidad de continuar usando este tejido, se cambió las capas woven por las unidireccionales.

Por ese motivo también, el acabado de las piezas no es el mismo que el de los tubos, los cuales están fabricados con un tejido de tipo woven.

2. El segundo desacuerdo fue el cálculo y la provisión del material compuesto.

Si bien es cierto que se calculó la cantidad de preimpregnado necesitado en base a la superficie a laminar, el número de capas y un desperdicio del 20%, en la realidad la cantidad necesitada fue mucho mayor.

Debido a que en el caso del preimpregnado unidireccional es importante la dirección de las fibras, la generación de los patrones presenta en el material mucho más desperdicio que el que se tuvo en cuenta.

A este hecho se suma, el inconveniente habido con los preimpregnados de tipo woven y, por tanto, su sustitución por el unidireccional, lo que hacía que el uso necesitado fuese mayor que el pedido.

Finalmente, tuvo que hacerse un pedido durante la laminación para poder continuar con el moldeado de la última pieza.

3. El tercer desliz del proyecto surge en el momento de ensamblar las piezas y pegar los tubos.

Tal y como se ha explicado en el apartado 6.3.2 Pegado, el pegado se realizó por partes en días diferentes.

Debido a que el proceso de laminación no es exacto, las tolerancias, como se puede comprobar en el apartado 6.2.5 Comprobación de las medidas, son de un orden algo alto y el pegado tampoco es del todo preciso, se generaron desviaciones que hicieron que la última pieza encajase justa y forzando algo la estructura, lo que generó tensiones residuales en el cuadro una vez curado.

De forma más precisa, las piezas se diseñaron para cumplir un gap de entre 0.15-0.25mm con la finalidad de dejar este espacio para el adhesivo. Como esta tolerancia no es constante en toda la pieza y la longitud del pegado de los tubos es de 30mm, una pequeña desviación en el pegado, supone en el otro lado del tubo una desviación del orden de mm. Es por ello por lo que el manillar, que fue la última pieza en adherirse, costase ensamblarla en el resto del cuadro. Esta figura ayuda a la comprensión de la explicación.

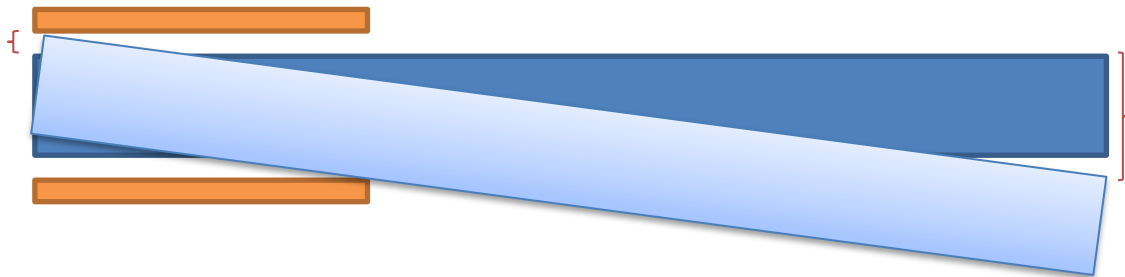


Figura 7: Demostración de la desviación durante el pegado

Se adjuntan imágenes del desvío en las siguientes imágenes.



Ilustración 100: Demostración de la desviación de los últimos componentes a ensamblar

4. El último inconveniente, es el generado por la desviación durante el pegado de los tubos. Debido a este hecho, los anclajes diseñados con anterioridad basado en las medidas del CAD, ya no encajan en el cuadro. Es por ello por lo que se tiene que proceder al rediseño de estas piezas.

Capítulo 6. COMPROBACIÓN DEL DISEÑO

Tras haber tenido que modificar el apilado de capas de preimpregnado, se ha hecho un análisis de los resultados lanzando las mismas simulaciones que se lanzaron durante el análisis y obtención del apilado óptimo en el Trabajo Fin de Máster - *Diseño y análisis de un cuadro de bicicleta en fibra de carbono*.

6.1.1.1 Resultado ensayos

Ensayo 1- Ensayo de choque (caída de masa)

A continuación, se presentan los resultados de la simulación del ensayo que supone la caída de un percutor de 22,5kg en la horquilla de la manera que se muestra. Se adjuntan resultados de deformación total tanto en el cuadro como en la horquilla, y la deformación en dirección del eje 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 de no superar una deformación permanente máxima de 10mm de la distancia entre ejes.

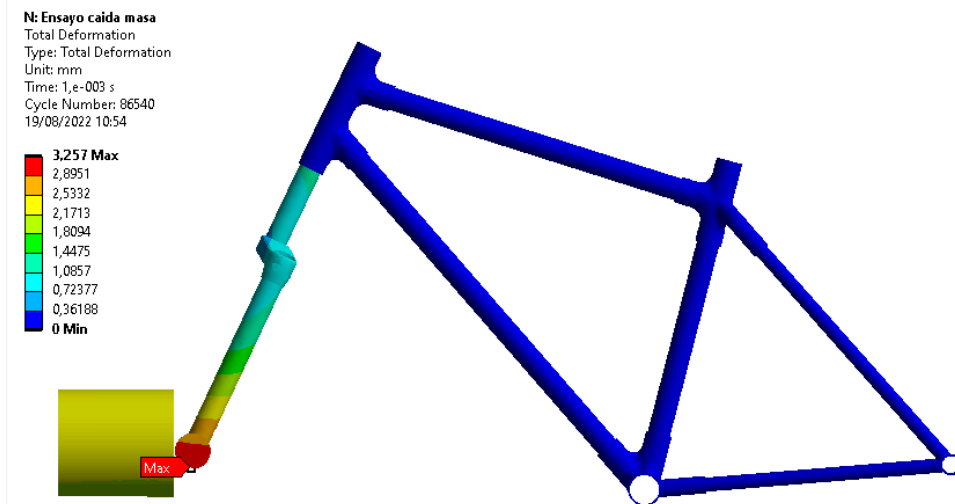


Ilustración 101: Resultado de deformación total - Ensayo caída masa

N: Ensayo caída masa
 Total Deformation 2
 Type: Total Deformation
 Unit: mm
 Time: 1,e-003 s
 Cycle Number: 86540
 19/08/2022 10:53

0,39484 Max
 0,35097
 0,3071
 0,26323
 0,21936
 0,17549
 0,13161
 0,087743
 0,043871
 0 Min

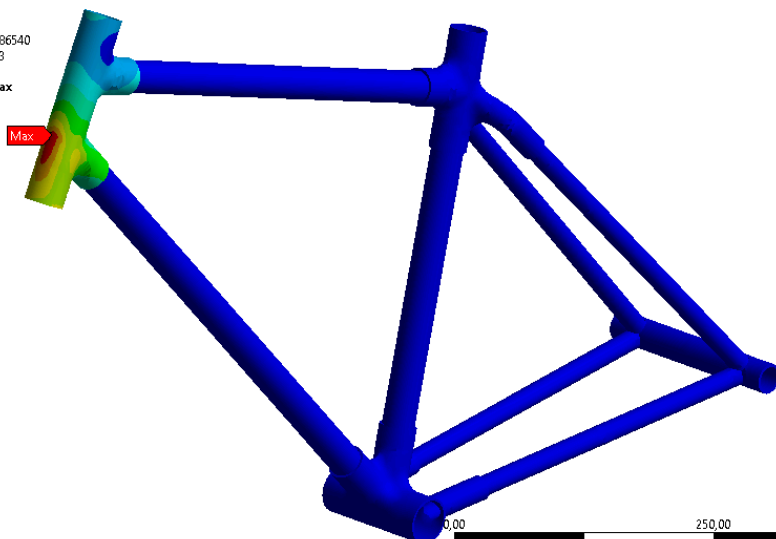


Ilustración 102: Resultado de deformación total en el cuadro - Ensayo caída masa

Este es el resultado de la deformación que supone en el cuadro debido al choque con la horquilla. La deformación es bastante pequeña como para que suponga una fractura o fisura en el cuadro.

N: Ensayo caída masa
 Directional Deformation
 Type: Directional Deformation(X Axis)
 Unit: mm
 Global Coordinate System
 Time: 1,e-003 s
 Cycle Number: 86540
 19/08/2022 10:51

3,232 Max
 2,7817
 2,3313
 1,8809
 1,4305
 0,98014
 0,52975
 0,079372
 -0,37101
 -0,82139 Min

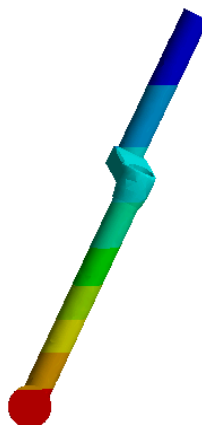


Ilustración 103: Resultado de deformación en dirección X en la horquilla- Ensayo caída masa

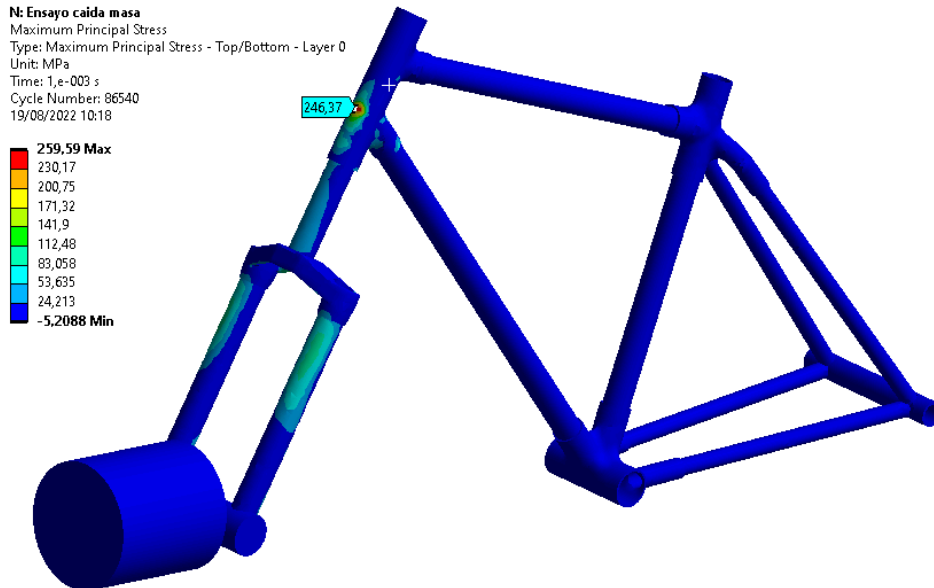


Ilustración 104: Resultado de máxima tensión principal general- Ensayo caída masa

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.

En cuanto a la deformación producida en el ensayo, en la norma se especifica 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 del eje X, por lo que la distancia entre ejes sería inferior a los 10 mm límite establecidos como deformación permanente.

Cumplimiento de requisitos:

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

Asimismo, acudiendo a los ensayos previos, se puede observar que los cambios provocados en la laminación apenas provoca grandes diferencias con los resultados obtenidos previamente.

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

El segundo ensayo simula la caída del cuadro sobre el suelo desde una altura de 360mm de altura estando fijado el eje trasero aun permitiendo su giro. Estos son los resultados.

Z: Copy of Ensayo de caída cuadro 3

Total Deformation
Type: Total Deformation
Unit: mm
Time: 2,5e-003 s
Cycle Number: 226281
19/08/2022 10:20

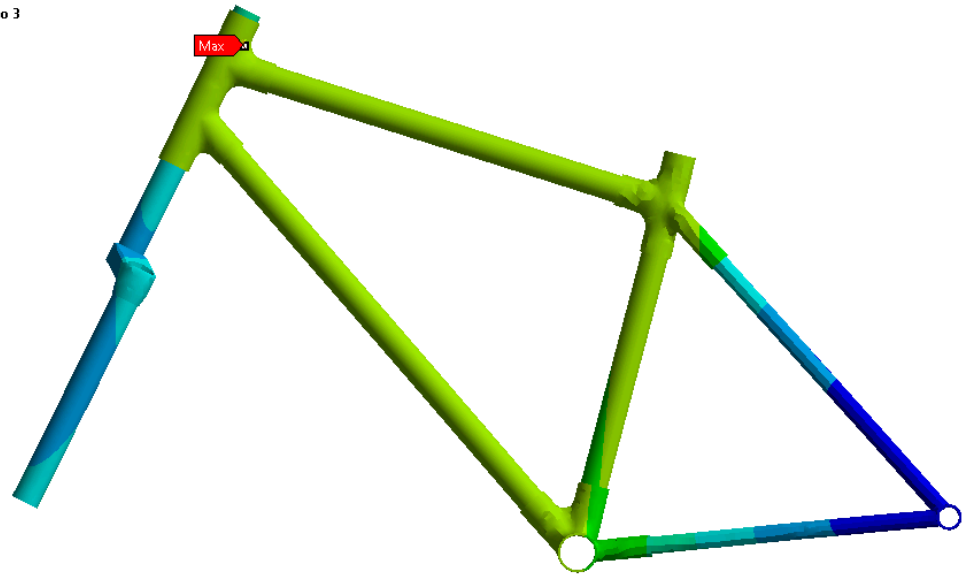
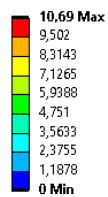


Ilustración 105: Resultado de deformación total - Ensayo caída del cuadro

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: 226281
19/08/2022 10:21

85,407 Max
75,451
65,496
55,54
45,584
35,628
25,672
15,717
5,7609
-4,1949 Min

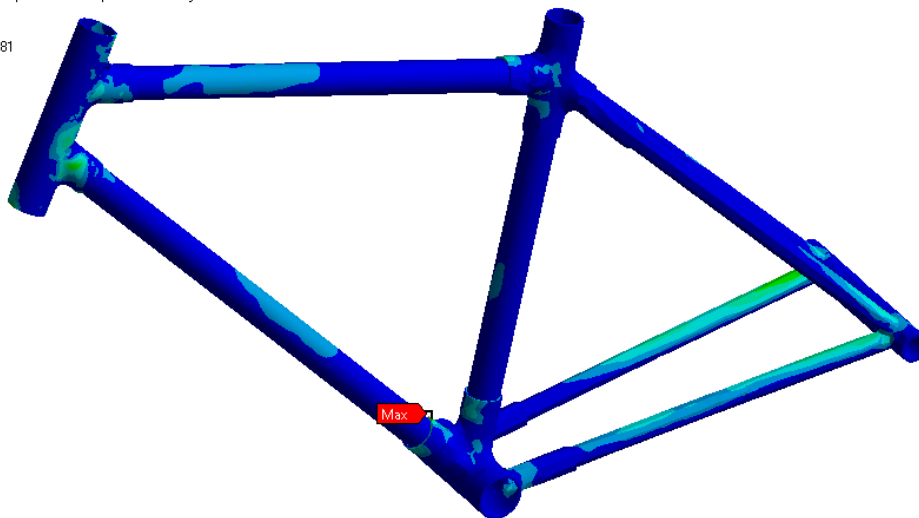


Ilustración 106: Resultado de máxima tensión principal general- Ensayo caída del cuadro

Z: Copy of Ensayo de caída cuadro 3
Directional Deformation 4
Type: Directional Deformation(X Axis)
Unit: mm
Global Coordinate System
Time: 2,5e-003 s
Cycle Number: 226281
19/08/2022 10:23

2,3742 Max
1,6625
0,95089
0,23925
-0,47238
-1,184
-1,8957
-2,6073
-3,3189
-4,0306 Min

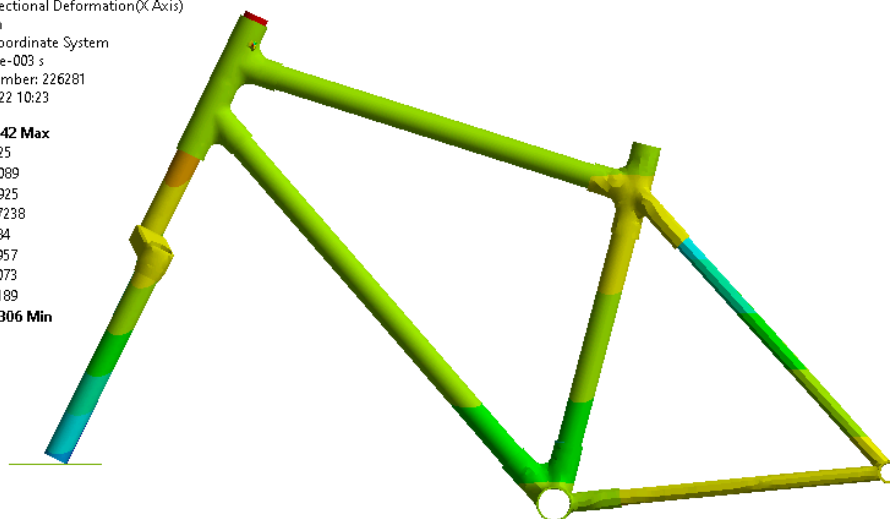


Ilustración 107: Resultado de deformación en dirección X - Ensayo caída del cuadro

Cumplimiento de requisitos

Se puede observar en las imágenes que los efectos de este ensayo sobre el cuadro no son graves; las tensiones sufridas en la zona del manillar son bajas, así como las deformaciones sufridas en el cuadro.

Con esto, se puede asegurar que no hubiera ninguna fisura o rotura en el cuadro tras el ensayo a la vez que la deformación permanente máxima entre centros será mucho menor que los 60 mm que especifica la norma para este ensayo.

Ensayo 3- Ensayo de fatiga por fuerzas horizontales

A continuación, se muestran los resultados de la simulación del ensayo con fuerzas horizontales. Este ensayo consiste en la aplicación de una fuerza horizontal en la horquilla de 1200N en sentido contrario a la horquilla.

Se adjuntan tanto la deformación del cuadro y horquilla como las tensiones principales máximas sufridas en el cuadro.

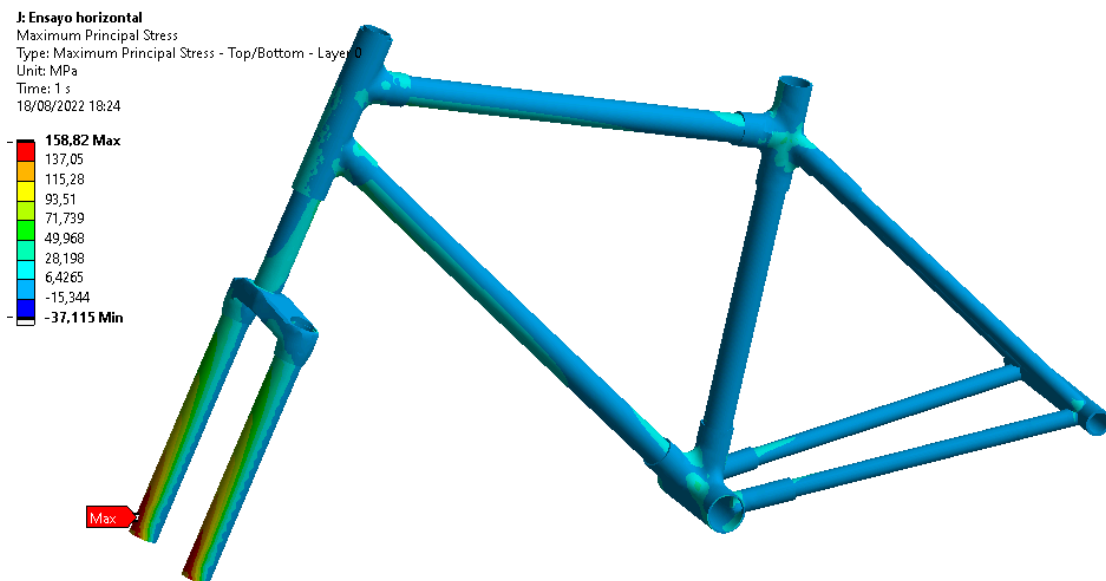


Ilustración 108: Resultado de máxima tensión principal general- Ensayo 3 Fuerzas horizontales

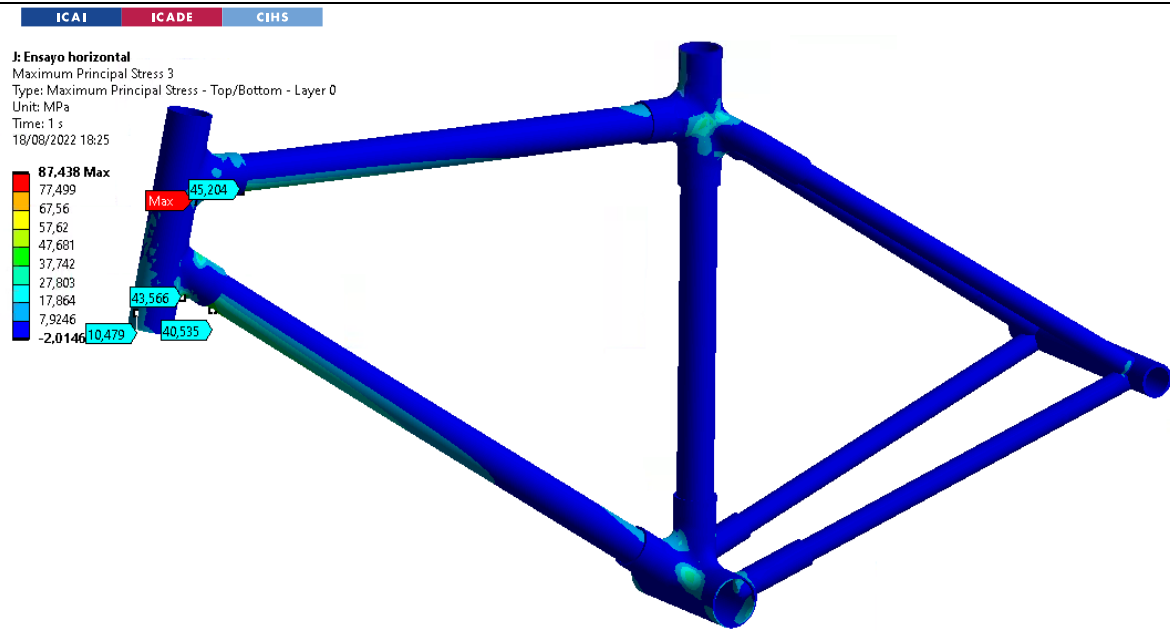


Ilustración 109: Resultado de máxima tensión principal en el cuadro - Ensayo 3 Fuerzas horizontales

Se adjuntan asimismo los resultados de los criterios de fallo de Maximum Stress, Tsai-Hill y Tsai-Wu. Específicamente se muestra los resultados del factor de seguridad (FS) donde los valores son más bajos.

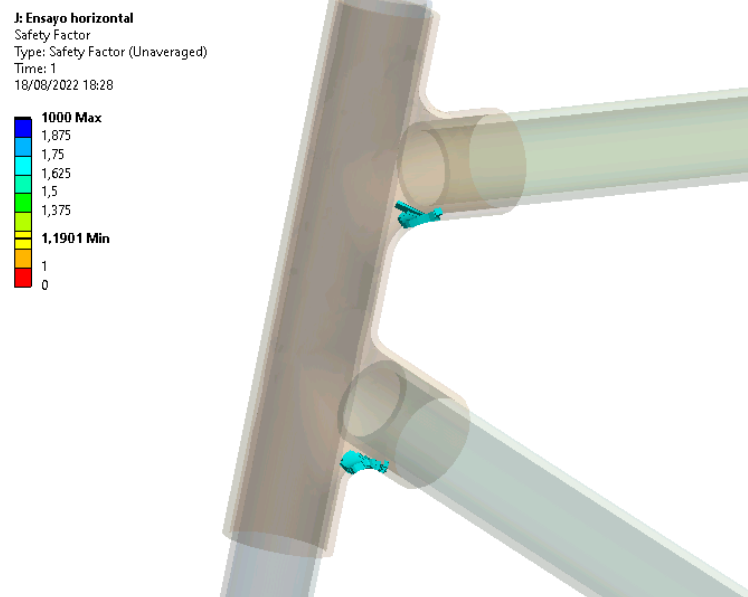


Ilustración 110: Maximum stress criterion con $FS < 2$

J: Ensayo horizontal
Safety Factor
Type: Safety Factor (Unaveraged)
Time: 1
18/08/2022 18:29

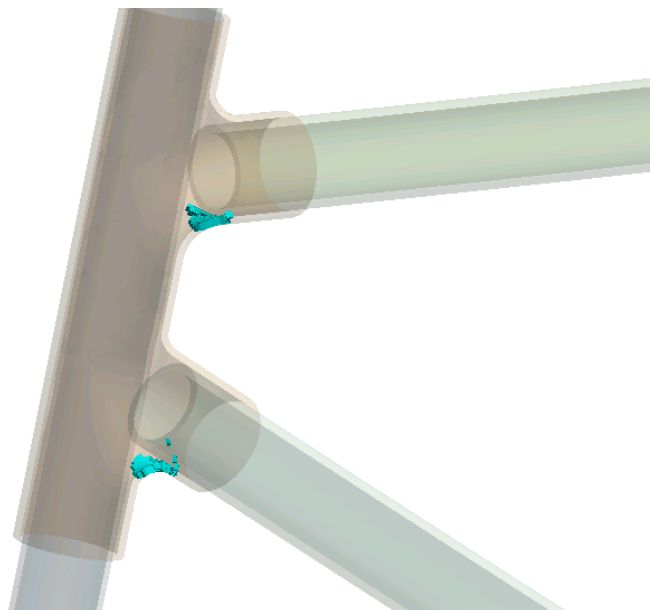
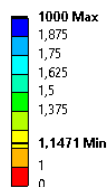


Ilustración 111: Tsai-Wu criterion con $FS < 2$

J: Ensayo horizontal
Safety Factor
Type: Safety Factor (Unaveraged)
Time: 1
18/08/2022 18:29

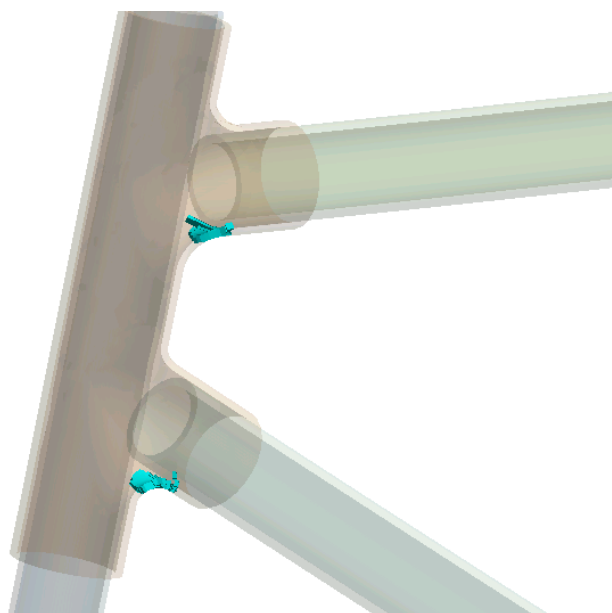
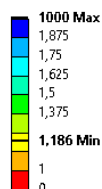


Ilustración 112: Tsai-Hill criterion con $FS < 2$

Tomando como base que el requisito mínimo para asegurar ningún fallo en el material compuesto es superar un factor de seguridad de 1.8, se muestran las zonas donde el factor de seguridad es menor que 2 pero mayor que 1.5. Viendo los resultados se aprecia que, en las zonas más comprometidas, como lo son los radios de acuerdo justo en la zona del manillar, el riesgo de fallo en el material es mayor, aun así, solo aparece en zonas puntuales y cumpliendo con el requisito necesario para dar por bueno los resultados obtenidos.

El segundo requisito que se indica en la norma para este ensayo especifica que la flecha que se indica en la siguiente figura, no debe ser superior al 20% de la inicial. 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 113: Indicación de la deformación analizada en el ensayo

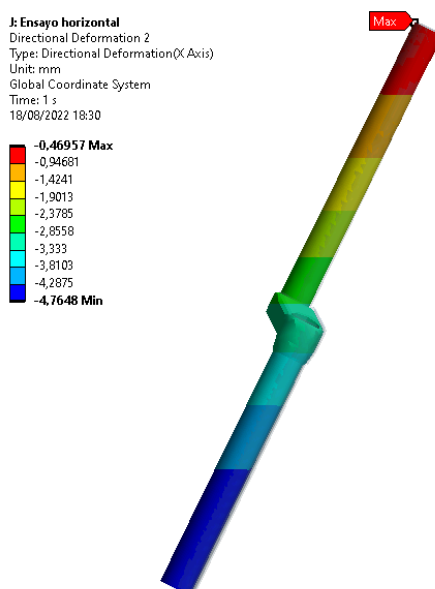


Ilustración 114: Resultado de deformación en dirección X en la horquilla- Ensayo fuerzas horizontales

Aunque se tenga en cuenta que la simulación solo comprende cierto tiempo del suceso, se puede observar que la deformación es mucho menor de lo requerido aparte de hablar la norma de una deformación permanente.

J: Ensayo horizontal
Directional Deformation
Type: Directional Deformation(X Axis)
Unit: mm
Global Coordinate System
Time: 1 s
18/08/2022 18:31

0,061293 Max
-0,15294
-0,36718
-0,58142
-0,79565
-1,0099
-1,2241
-1,4384
-1,6526
-1,8668 Min

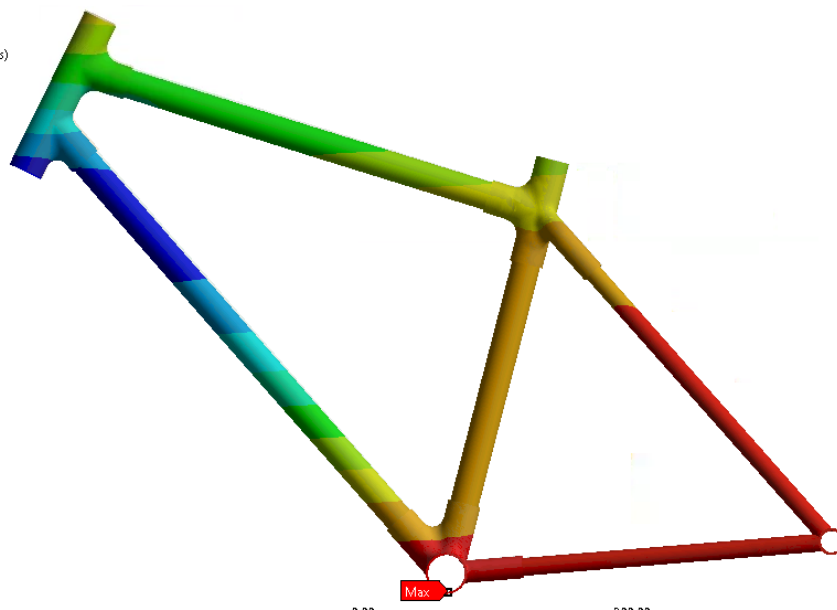


Ilustración 115: Resultado de deformación en dirección X en el cuadro- Ensayo fuerzas horizontales

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 generales 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 de fatiga con una fuerza vertical

En este ensayo se ejercen fuerzas verticales en el sillín.



Ilustración 116: Indicación de la flecha

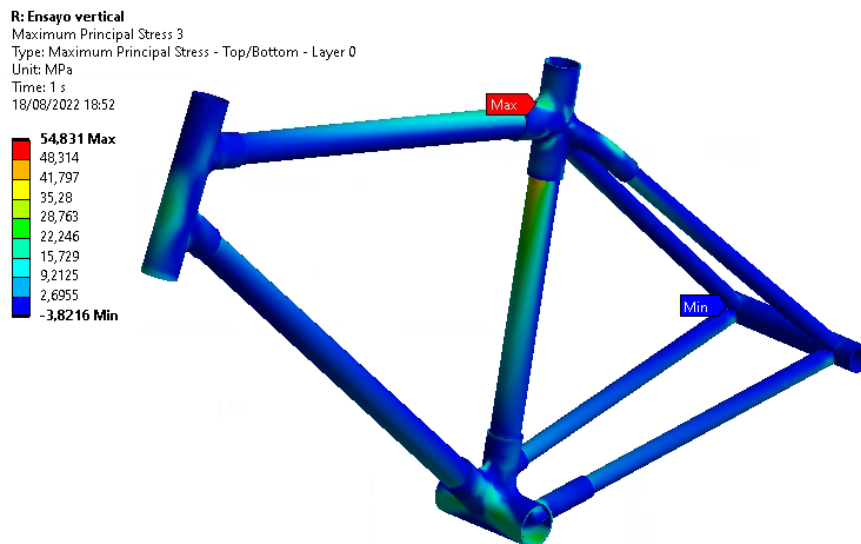


Ilustración 117: Resultado de máxima tensión principal en el cuadro- Ensayo fuerzas verticales

R: Ensayo vertical

Directional Deformation 3
 Type: Directional Deformation(X Axis)
 Unit: mm
 Global Coordinate System
 Time: 1 s
 18/08/2022 18:52

0,31134 Max
 0,21587
 0,12041
 0,024939
 -0,070528
 -0,166
 -0,26146
 -0,35693
 -0,4524
 -0,54786 Min

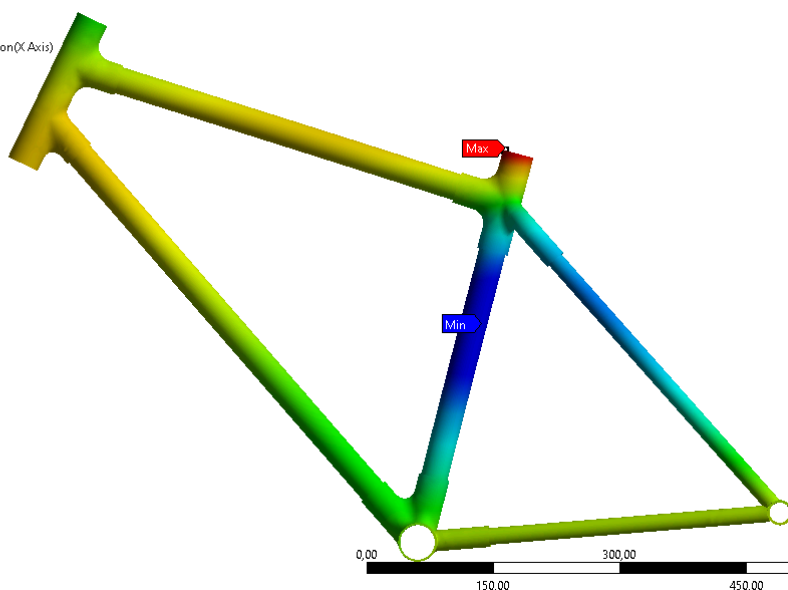


Ilustración 118: Resultado de deformación en dirección X en el cuadro- Ensayo fuerzas verticales

R: Ensayo vertical

Directional Deformation 2
 Type: Directional Deformation(X Axis)
 Unit: mm
 Global Coordinate System
 Time: 1 s
 18/08/2022 18:53

2,4297 Max
 2,1229
 1,8161
 1,5093
 1,2024
 0,89564
 0,58884
 0,28203
 -0,02477
 -0,33157 Min

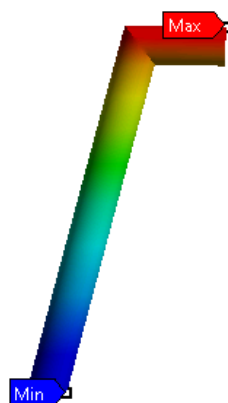


Ilustración 119: Resultado de deformación en dirección X en la tija- Ensayo fuerzas verticales

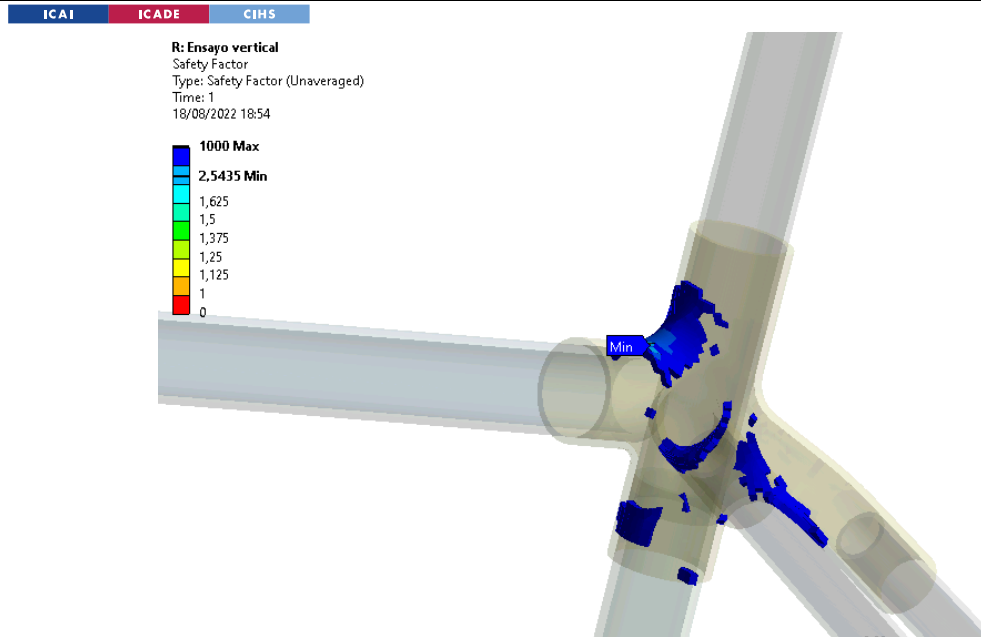


Ilustración 120: Max stress criterion con $FS < 10$

Como se ha comentado en otro ensayo, el límite de aceptación del factor de seguridad en el diseño es de 1.8. Según el criterio de fallo de Maximum Stress, los valores más bajos son los mostrados y aun así son mucho mayores de los requeridos. No se muestran imágenes, pero según los criterios de fallo de Tsai-Hill y Tsai-Wu, los resultados son muy equivalentes al de Maximum Stress.

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 el cual es no superar el valor del 20% de la flecha inicial.

Ensayo 5- Ensayo pedaleo en pendiente

Este ensayo trata de simular las cargas a las que está sometido el cuadro durante el pedaleo de un ciclista bajo las circunstancias de subida de una pendiente.

D: Pendiente sitting right peddaling

Total Deformation
Type: Total Deformation
Unit: mm
Time: 1 s
18/08/2022 18:09

2,3558 Max
2,094
1,8323
1,5705
1,3088
1,047
0,78529
0,52354
0,26179
4,5343e-5 Min

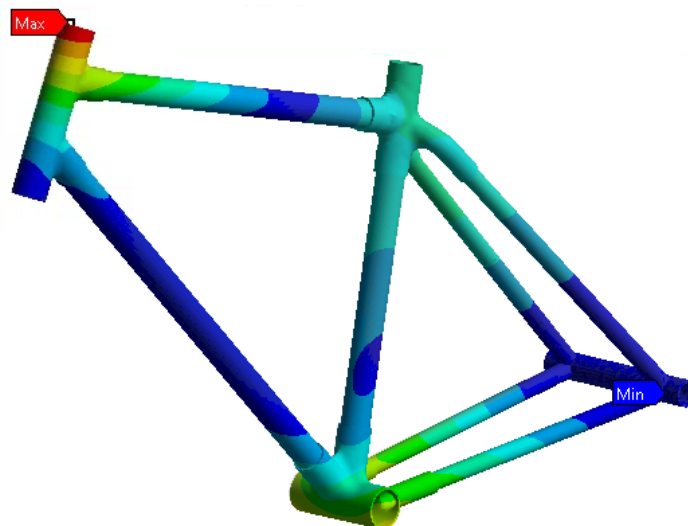


Ilustración 121: Resultado de deformación total - Ensayo pedaleo en pendiente

D: Pendiente sitting right peddaling

Maximum Principal Stress
Type: Maximum Principal Stress - Top/Bottom - Layer 0
Unit: MPa
Time: 1 s
18/08/2022 18:10

363,72 Max
241,86
120
80
50
40
30
20
0
-2,5674 Min

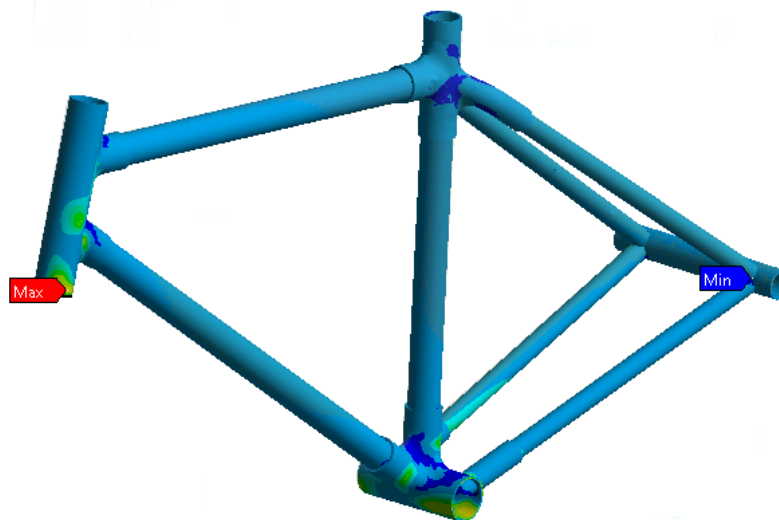


Ilustración 122: Resultado de máxima tensión principal - Ensayo pedaleo en pendiente

Si bien es cierto que los resultados tensionales máximos son altos, estos se dan en puntos críticos como, por ejemplo, en el manillar, donde está establecida la condición de contorno de solo permitir el desplazamiento en X (dirección longitudinal). En el resto de zonas las tensiones máximas no llegan a los 100 MPa. Para demostrarlo, se adjunta a continuación, los resultados filtrando por tensiones mayores de 60 MPa.

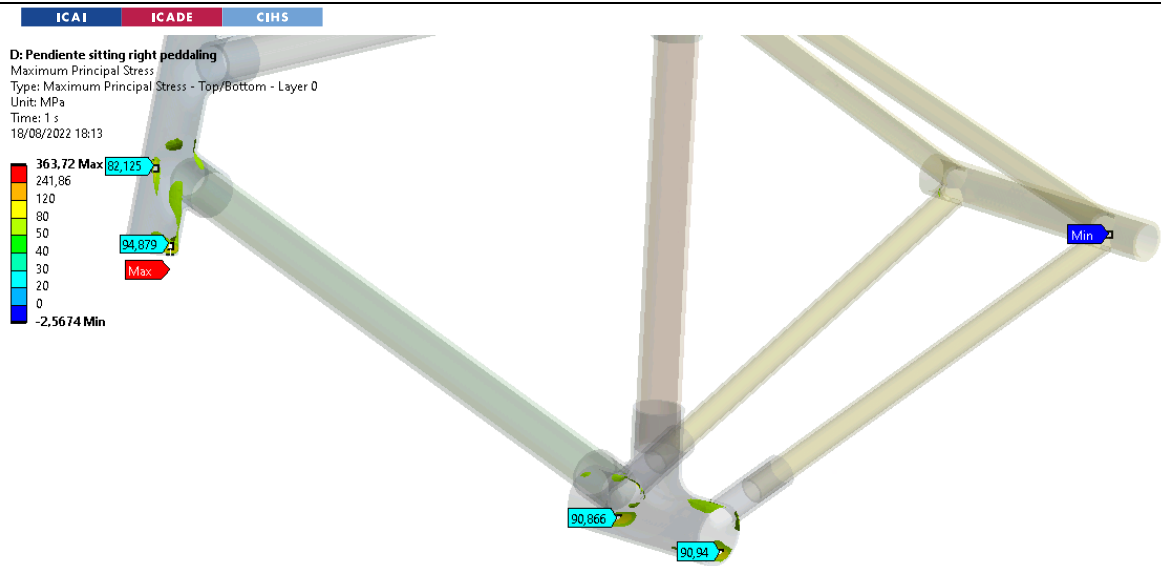


Ilustración 123: Resultados con tensiones >60 MPa

Con el fin de comprobar la integridad de cuadro tras el ensayo se adjuntan abajo los resultados de los criterios de fallo y el tipo de fallo que se da en algunas zonas donde el factor de seguridad es bajo.

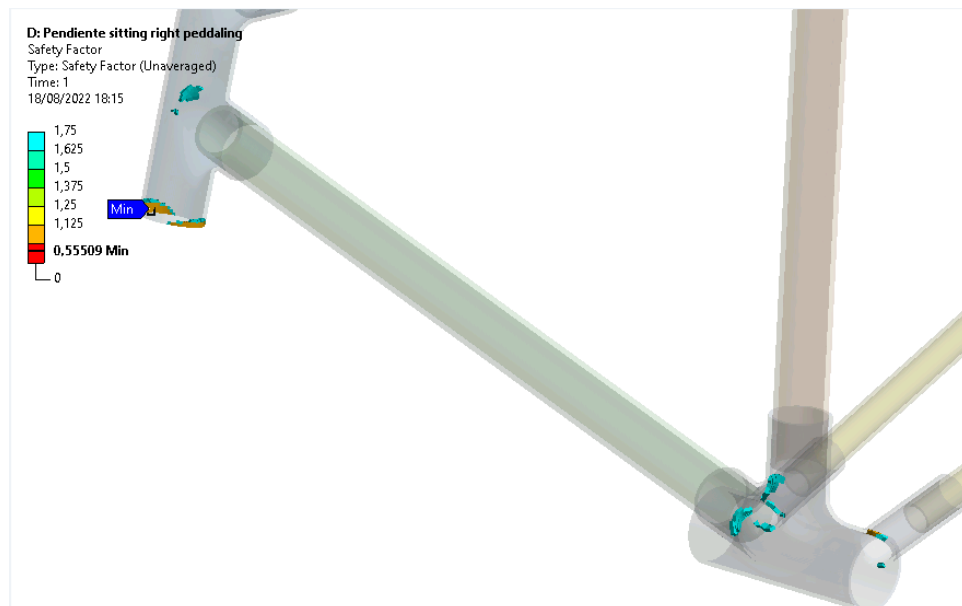


Ilustración 124: Max stress Criterion con FS<2

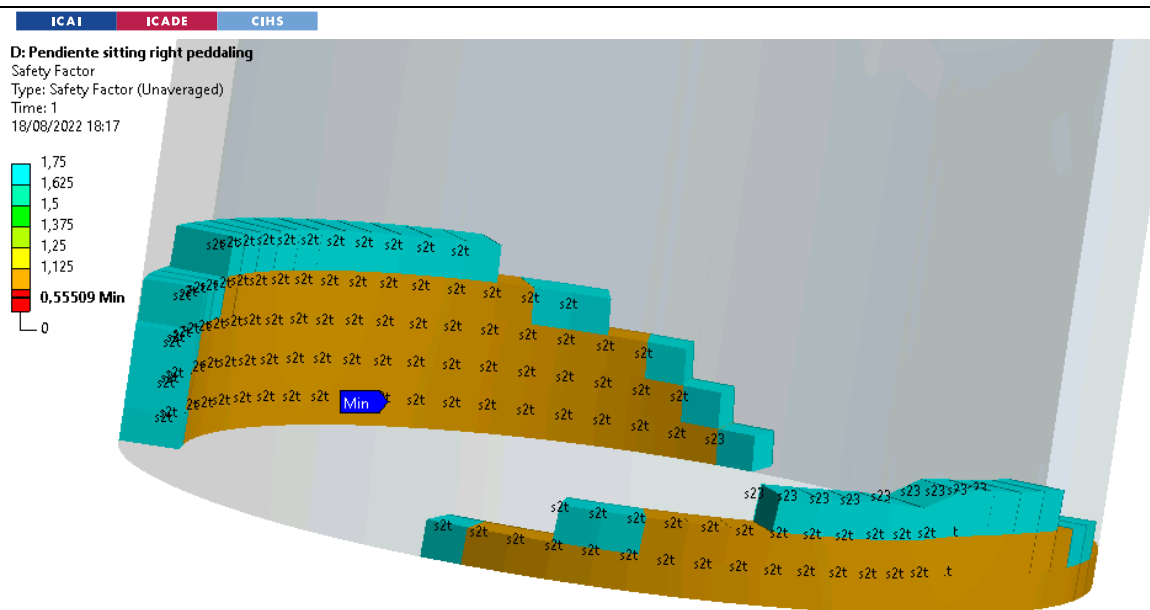


Ilustración 125: Detalle tipo de fallo para resultados de $FS < 2$

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
☒	Fiber Failure (s1)	1
☒	Matrix Failure (s2)	1
☒	In-Plane Shear Failure (s12)	1
☒	Out-of-Plane Shear Failure (s13)	1
☒	Out-of-Plane Shear Failure (s23)	1
☒	Delamination (s3)	1

Ilustración 126: Fallos según el criterio de fallo Maximum Stress



Ilustración 127: Tsai-Hill criterion con $FS < 2$



Ilustración 128: Tsai-Wu criterion

Los resultados muestran pequeñas zonas donde los valores de factor de seguridad son cercanos a 2 y alguna otra zona donde éstos se acercan más a 1. Sin embargo, como se ha comentado con los resultados tensionales, la zona que peores resultados alberga corresponde con el punto de aplicación de las condiciones de contorno. El resto de zonas señaladas en azul muestran resultados entorno a valores de 1.8 de factor de seguridad.

Cumplimiento de requisitos

Finalmente, con este último ensayo se confirma que, aunque el apilado no ha podido ser el diseñado en un primer momento, el realizado no supondrá ningún fallo en el cuadro ni estará trabajando a un nivel límite.

Aunque este apilado funcione y cumpla con los requisitos, los fabricantes que utilizan materiales compuestos siempre introducen en el apilado al menos un 20% de este tipo de preimpregnado. Es por ello por lo que se diseñó contando con él, además de que mejora visualmente el acabado de la pieza.

Capítulo 7. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Al llegar al final de esta memoria se concluye la viabilidad técnica de la construcción de un cuadro para bicicleta en fibra de carbono siguiendo el método descrito anteriormente.

A lo largo del proceso se han encontrado dificultades y riesgos que han sido solucionados y superados permitiendo la terminación del proyecto exitosamente.

Deterioro y falta de materiales, desviaciones en el diseño y en la fabricación, difícil manipulación de algunos materiales, falta de herramientas, etc. son algunos de los problemas e impedimentos que han ido surgiendo a lo largo del proceso. Todos ellos han sido superados uno a uno a través de tomas de decisión rápidas y concretas, métodos alternativos, así como, su aplicación en el momento justo.

Respecto a las expectativas del desarrollo y evolución del proyecto, la etapa de fabricación de los moldes ha supuesto una tarea complicada y extensa, necesitando más tiempo del ideado debido a la dificultad de trato con el material.

La fase de laminación ha supuesto en un principio un trabajo sencillo, pero cuyos resultados de hacerlo mal son desastrosos. Una vez entendido bien el proceso y la forma correcta de ejecución, el resultado obtenido es mejor del esperado a cambio de un trabajo metódico, extenso y constante.

Sin embargo, una vez concluido, se presentan posibles cambios de mejora respecto a lo realizado con el fin de mejorar el resultado final. Estos cambios surgen de errores cometidos, por lo que de no haber surgido no se hubieran podido documentar y, por tanto, mejorar. Todos esos descuidos y deslices han sido descritos minuciosamente durante la memoria para tener constancia de ellos.

Volviendo al inicio del proyecto, se presentaron una serie de objetivos a conseguir con la ejecución de este proyecto. Una vez concluido se hace una revisión de dichos propósitos con el objetivo de valorar su cumplimiento.

5. El primer objetivo pretendía conseguir materializar exitosamente el diseño que se realizó previamente en base a cálculos y simulaciones que lo justificaban. Viendo los resultados y las conclusiones se puede mostrar que el principal objetivo del proyecto se ha cumplido validando técnicamente este proceso de fabricación.

6. Una vez acontecido las fases de apilado, curado y ensamblaje se puede afirmar que se ha comprendido las complejidades que presentan los materiales compuestos en su utilización y manejo.
7. Como se ha comentado anteriormente, este trabajo ha tenido sus inconvenientes y complicaciones que han sido solventados a lo largo del proyecto generando un registro de lecciones aprendidas necesario que permite la mejora continua del proceso.
8. Por último, tratándose de un componente clave para el montaje de una bicicleta; con una serie de modificaciones y operaciones en el acabado este cuadro puede formar parte de una bicicleta la cual podría ser utilizada y montada en un futuro.

Esta último punto sirve de introducción para presentar las tareas futuras que deja el proyecto para su culminación.

Entre esas tareas se encuentra en primer lugar terminar de fabricar los anclajes traseros de la bicicleta, los cuales no han sido terminados con anterioridad debido a las desviaciones generadas en el cuadro durante el ensamblaje y, por tanto, la necesidad de realizar cambios en su diseño. Además, se trata de una pieza que debido a su tamaño y geometría puede ser más apta para su fabricación en aluminio que en fibra de carbono mediante la fundición.

En segundo lugar, adaptar todas las uniones para el montaje del resto de componentes que forman una bicicleta, como es, por ejemplo, los rodamientos, casquillos, ejes... que ya fueron tenidos en cuenta durante el diseño previo y que, por tanto, no habría problema en instalar en el cuadro.

En tercer lugar, este proceso puede volver a realizarse teniendo en cuenta todos los errores cometidos resultando en una versión mejorada tanto integral como visual.

Capítulo 8. 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] Colnago, empresa fabricante de bicicletas de carrera. <https://www.colnago.com/>
- [4] Look Cycle, fabricante de bicicletas de carbono para el ciclismo de carretera.
<https://www.lookcycle.com/fr-en/>
- [5] Filamento CARBON X CF-PC. Filament2print.
- [6] Gee Milner. “DREAM BUILD MTB - Hope HB130”, Youtube
- [7] David Aldric. “Building a 3D Printed Carbon Fiber Bicycle.”, Youtube
- [8] Premature Yeet. “Carbon Fibre Bike Frame Build”, Youtube
- [9] Transparencias asignatura Fabricación Aditiva. Máster en Ingeniería para la Movilidad y Seguridad.
- [10] Proveedor de tubos de carbono. Clipcarbono. <https://www.clipcarbono.com/>
- [11] Proveedor de material. Castrocomposites <https://www.castrocomposites.com/>
- [12] Suspension adhesive protocol. ISC Formula Student, Universidad Pontificia de Comillas.
- [13] Trabajo de final de grado Grado en Ingeniería Química- *Estudio experimental de la transición vítrea y de la dinámica macromolecular en dispersiones sólidas amorfas del antibiótico cloranfenicol en ácido poliláctico*