

UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE ELCHE

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA



"FABRICACIÓN DE UNA CABINA DE TRABAJO  
DE MATERIALES COMPUESTOS.  
DESDE LA ETAPA DE DISEÑO, HASTA EL  
PROTOTIPO"

TRABAJO FIN DE GRADO

6 DE MARZO 2024

AUTOR: Manuel Brea Sánchez

DIRECTORA: Patricia Mazón Canales

## **Agradecimientos**

A mi familia y amigos por el apoyo constante a lo largo de todos estos años. A mi pareja por soportarme y empujarme a dar lo mejor de mí. Agradecer la confianza depositada por parte de Laurent Composite S.L y en concreto a Samuel Bugallo, mi jefe directo y compañero de trabajo. Por último a mi tutora por la paciencia y ayuda que me ha transmitido a lo largo de todo el trabajo.



## **RESUMEN**

La temática seleccionada para la elaboración de este TFG deriva del trabajo desarrollado durante mi periodo de prácticas extracurriculares y actual relación laboral con la mercantil Laurent Composite S.L.

Desde el momento inicial de mi incorporación a la referida empresa he venido ocupando el puesto de diseñador CAD (Computer-Aided Design) pudiendo de este modo adquirir experiencia y conocimiento en el campo del diseño y fabricación de materiales compuestos.

Mi función principal como diseñador CAD ha sido el modelado en ordenador de una cabina de trabajo fabricada principalmente en fibra de carbono, fibra de vidrio y fibra de lino, así como la documentación necesaria para su fabricación.

A lo largo del presente trabajo se explica cómo se ha llevado a cabo la concepción del diseño del producto y las diferentes alternativas de las que se dispone en la actualidad para implementar el uso de material compuesto. Se analizan también los tipos de materiales compuestos más comunes que se encuentran en la actualidad y se justifica su empleo detallando las ventajas que presentan frente al resto de materiales. Se explica en detalle el método de fabricación empleado en la elaboración del producto que se menciona en este proyecto, así como las consideraciones que se tienen al ser empleado este.

1	INTRODUCCIÓN.....	5
2	ANTECEDENTES.....	7
2.1	Uso histórico de los materiales compuestos.....	7
2.2	Constituyentes de los materiales compuestos.....	10
2.3	Clasificación de los materiales compuestos.....	12
2.4	Fibras más empleadas actualmente.....	14
2.5	Técnicas más comunes utilizadas para fabricar FRP.....	16
2.6	Actual diseño de las cabinas de trabajo y materiales empleados.....	21
3	OBJETIVOS.....	23
4	DESARROLLO DEL PROYECTO .....	24
4.1	FASE DE DISEÑO .....	24
4.1.1	Diseño del prototipo.....	24
4.1.2	Consideraciones de diseño al emplear material compuesto y utilizar laminación manual como método de fabricación .....	29
4.2	FASE DE FABRICACIÓN.....	30
4.2.1	Preparación previa y ajuste de las piezas.....	30
4.2.2	Laminación manual .....	32
4.2.3	Fabricación y laminado de la mesa .....	37
4.2.4	Proceso de acabado superficial.....	38
4.3	FASE DE PRUEBAS.....	40
5	TRABAJOS FUTUROS Y EN PROCESO .....	42
5.1	Planteamiento de los moldes, modelos y utillaje para fabricación en serie.....	42
6	CONCLUSIONES.....	48
7	ANEXOS.....	49
7.1	HOJAS TÉCNICAS.....	49
7.1.1	Tejidos empleados.....	49
7.1.2	Resina y gel coat.....	51
8	BIBLIOGRAFÍA .....	53
8.1	REFERENCIAS.....	53

# 1 INTRODUCCIÓN

D. David Benavente, socio fundador y actual CEO (Chief Executive Officer) de la mercantil Embention S.L, empresa puntera internacionalmente en el diseño y fabricación de autopilotos y sistemas electrónicos para UAV (Unmanned Aerial Vehicle), decide a principios del 2023 fundar Laurente Composite S.L con un primer producto claro en mente: la cabina de trabajo Shaphire.

Shaphire es una peculiar cabina de trabajo pensada para ser utilizada por un único usuario, diseñada para proporcionar privacidad y confort, fabricada fundamentalmente de material compuesto, principalmente en fibra de carbono, material cada vez más utilizado, ya no solo por sus propiedades mecánicas como venía siendo, sino también por la estética tan peculiar que tiene.

David Benavente junto con Samuel Bugallo, cofundador de SCR DRONES, empresa reconocida en la fabricación de los aviones blanco, impulsan el inicio de las actividades de la nueva empresa y es aquí cuando me incorporo como diseñador CAD.

Mi función principal ha sido realizar el diseño 3D, utilizando Autodesk Inventor, de la cabina de trabajo, además de elaborar la documentación necesaria para su fabricación y, posteriormente, dar apoyo en la fabricación del prototipo.

Durante estos meses de prácticas he podido participar en todos los procesos de fabricación del prototipo, con el apoyo de compañeros de trabajo como Samuel Bugallo, ingeniero senior y Project Manager del proyecto, con una larga carrera en el mundo de la fabricación empleando materiales compuestos.

El presente trabajo describe cómo se ha llevado a cabo la concepción del diseño teniendo en cuenta todas las consideraciones que conlleva utilizar material compuesto, detallándose las diferentes etapas de la fase de fabricación hasta conseguir el prototipo terminado. Por otro lado, incluye también los diferentes procesos que se han tenido en cuenta a la hora del desarrollo del proyecto para

poder asegurar la calidad y al mismo tiempo minimizar costes. Finalmente se indicará cómo se está planteando la fabricación en serie de este producto.



## 2 ANTECEDENTES

### 2.1 Uso histórico de los materiales compuestos

En primer lugar, es necesario saber qué se entiende como material compuesto. Un material compuesto se puede definir como la unión heterogénea de dos o más materiales, cuyo objetivo es conseguir características superiores de las que disponen los materiales que lo forman por separado. Principalmente se pueden distinguir dos constituyentes, la matriz y el refuerzo.

La idea de trabajar con materiales compuestos no es nueva, en Egipto y Mesopotamia, hace más de 3000 años empleaban barro y paja para elaborar ladrillos de adobe, más resistentes que si únicamente fuesen de barro. Con estos mismos principios, alrededor de 1200 d.C. los mongoles desarrollaron arcos de material compuesto formados de bambú, el cual dotaba de flexibilidad, y por otro lado resina, que aportaba cierta rigidez. En ese momento, las resinas que se empleaban provenían únicamente de plantas y animales.

A partir del siglo XIX, gracias a los avances en el campo de la industria química, se desarrollaron resinas poliméricas que cambiaban de estado pasando de líquido a semisólido o sólido. El proceso de endurecimiento ocurre al unirse los diferentes monómeros que forman la resina, este proceso se conoce como polimerización y puede desencadenarse aplicando calor, luz ultravioleta o agentes químicos catalizadores. Este gran avance permitió que en la actualidad se disponga de lo que se conoce como materiales compuestos reforzados de matriz polimérica.

El primer polímero totalmente sintético fue creado en 1907 por Leo Baekeland, la baquelita, un compuesto termoestable con unas propiedades aislantes y resistentes al calor que hicieron que fuese empleado ampliamente en aplicaciones tanto de consumo como industriales [1]. No obstante, los polímeros por si solos, a pesar de su favorable baja densidad, no aportan resistencia suficiente para aplicaciones estructurales, y es ahí donde nacen los polímeros reforzados con fibras (a partir de ahora PRF).

Fue en 1935 cuando Owens Corning combinó por primera vez la fibra de vidrio con un polímero, consiguiendo una estructura ligera e increíblemente resistente, surgiendo así esta gran industria, extendida y modernizada hasta la actualidad. Casi en paralelo, se desarrollaron diferentes resinas de poliéster y otros sistemas de mayor rendimiento en cuanto a cualidades de curado y resistencia, como las resinas epoxi, que fueron creadas alrededor de 1934.

Como en muchos otros campos, la industria de los PRF sufrió un gran crecimiento debido a la Segunda Guerra Mundial, cuando los materiales compuestos pasaron de los laboratorios a la práctica y producción real, debido a la necesidad de materiales alternativos al acero para aplicaciones ligeras en la aviación militar. Lo que supuso un aliciente fue que, además de su buena relación resistencia-peso, estos materiales compuestos con fibra de vidrio eran transparentes a las radiofrecuencias y buenos aislantes térmicos.

Tras la guerra se comenzó a incorporar los FRP en la industria náutica. Fue en 1946 cuando se fabricó el primer barco comercial de fibra de vidrio, además de desarrollarse procesos de producción novedosos como la pultrusión. En los años 50, el uso de los materiales compuestos creció rápidamente ya que estos se comenzaron a implementar en otras industrias y, a su vez, se desarrollaron procesos productivos como el moldeo por bolsa de vacío o el bobinado de filamentos.

En 1958, Roger Bacon, desarrolló fibras de carbono de alto rendimiento, aunque estas no fueron muy eficaces debido a que tenían únicamente un 20% de carbono en su composición. No fue hasta 1963 cuando el Ministerio de Defensa del Reino Unido, diseñó un proceso de fabricación para obtener lo que conocemos en la actualidad como fibra de carbono [2]. Esta permitió mejorar la ratio rigidez-peso, por lo que se utilizó en aplicaciones más punteras y exigentes como en la industria aeroespacial y, más adelante, en vehículos de altas prestaciones como en el sector de la Formula 1. En los años 90 esta industria siguió desarrollándose a gran velocidad y los materiales compuestos empezaron a ser una alternativa a otros más tradicionales como los metales o polímeros.



Este crecimiento fue muy notable, especialmente, en la industria de la aviación, ya que la reducción de peso en una aeronave es un gran avance en cuanto a eficiencia de combustible se refiere. A finales del año 2000 ya se contaba con que el 50% del material estructural era de material compuesto en los aviones más novedosos, los Boeing 787 (Figura 1) [3].

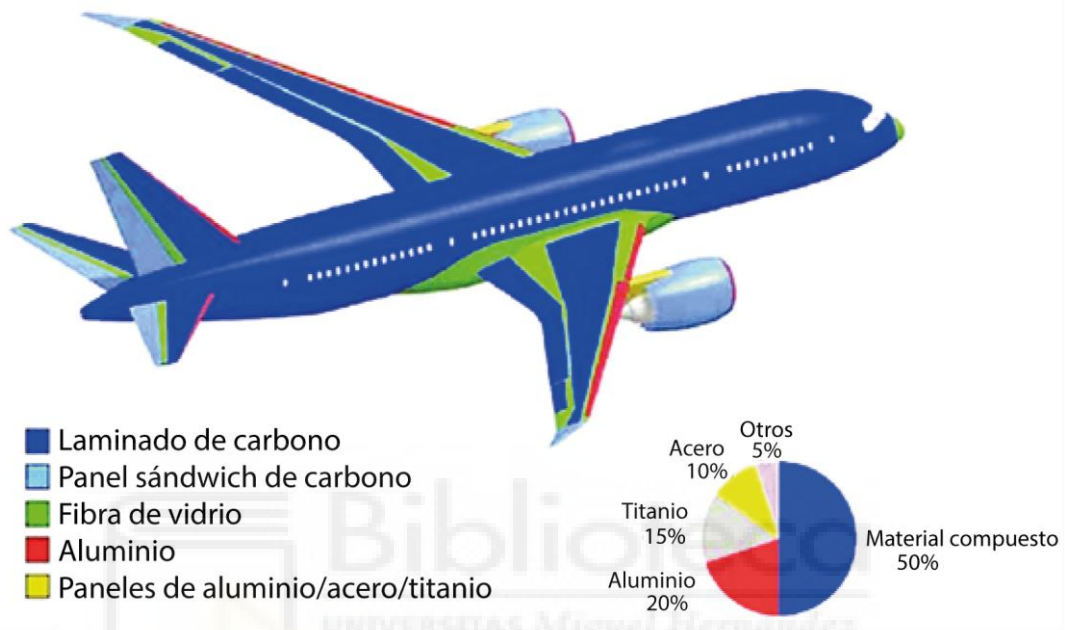


Figura 1. Materiales utilizados en el cuerpo del Boeing 787

Para la industria aeroespacial ha supuesto un reto siempre asegurar la calidad de todos los componentes a fabricar, las piezas fabricadas en material compuesto no iban a ser menos. Las primeras técnicas empleadas para testar piezas de material compuesto y así detectar fallos o riesgos fueron aquellas que implicaban técnicas destructivas. A pesar de que se siguen empleando estas, en la actualidad se investiga nuevas técnicas que implican la detección de estos fallos empleando ultrasonidos. Mas en concreto técnicas empleando láseres de ultrasonido, evitando así tener que someter las piezas de material compuesto a ensayos destructivos [4, 5].

El aumento del uso de material compuesto en la actualidad supone un problema importante debido a que el material compuesto no puede ser reutilizado o reciclado, suponiendo una problemática medioambiental. Diversas

metodologías han sido probadas para conseguir un reciclaje del material o parte de este, sin conseguir éxito, aunque han abierto nuevas líneas de investigación para nuevos métodos de reciclaje como son el reciclado termoquímico, reciclado termomecánico o el reprocesado termomecánico por trituración y prensado en caliente [6]. Se ha ahondado en el reciclaje de la fibra de vidrio presente en aeronaves debido al gran porcentaje de este material que se encuentra en cada una de ellas y el número de aeronaves retiradas. Con el fin de la reutilización de este material que anteriormente estaba destinado a acabar en vertederos, en la actualidad se pretende reutilizar el mayor porcentaje posible de fibra de vidrio destinándola a la fabricación de pavimentos asfálticos [7].

## 2.2 Constituyentes de los materiales compuestos

El material compuesto más básico incluye un material que constituye la fase matriz y otro que constituye la fase de refuerzo, estas fases son generalmente insolubles una en otra, pero debe existir una fuerte adhesión entre ellas.

La fase matriz es un material homogéneo como puede ser un metal, un cerámico o un polímero sin rellenos. Se caracteriza por diferentes propiedades y funciones específicas a desempeñar en la estructura global del material compuesto.

- I. **Función de soporte:** como función principal, la matriz ha de proporcionar un soporte estructural a la fase de refuerzo. Ayuda a mantener la disposición y orientación adecuada del refuerzo.
- II. **Transferencia de cargas:** la matriz transfiere la carga a la fase de refuerzo, permitiendo que se distribuya de manera más uniforme por todo el material. Esto es crucial para lograr un comportamiento estructural eficiente.
- III. **Protección del refuerzo:** la matriz protege físicamente a la fase de refuerzo contra daños mecánicos, corrosión y otros factores ambientales.

Esto es especialmente importante para mantener las propiedades mecánicas y durabilidad del material compuesto a lo largo del tiempo.

- IV. **Función aislante:** la fase matriz puede tener propiedades aislantes eléctricas o térmicas, dependiendo de su naturaleza y composición.
- V. **Propiedades intrínsecas:** Las propiedades específicas de la matriz, como su resistencia, rigidez, temperatura de servicio y resistencia química, son factores críticos que afectan las propiedades finales del material compuesto y que se han de tener en cuenta de cara a la correcta elección del material que hará la función de matriz.

El material que constituye la fase de refuerzo mejora las propiedades mecánicas del material final obtenido, propiedades como la tenacidad, rigidez o resistencia, entre otras. Algunas características clave de la fase de refuerzo son las siguientes:

- I. **Alta resistencia específica:** los refuerzos suelen tener una alta resistencia específica, lo que significa que proporcionan una resistencia mecánica significativa en relación con su peso. Este atributo es crucial para aplicaciones donde se busca una combinación óptima de resistencia-peso.
- II. **Orientación específica:** la orientación de los refuerzos puede ser controlada durante la fabricación del material compuesto para optimizar las propiedades mecánicas en direcciones específicas. Esto permite controlar en cierto grado las propiedades del material según las necesidades de la aplicación. Esta característica es válida cuando no se emplea el material de refuerzo en forma de partículas o fibras cortas dispuestas al azar.

A la hora de analizar conjuntamente las dos fases, se debe tener en cuenta que entre ellas debe haber compatibilidad térmica y química para garantizar una unión fuerte y estable. Esto es crucial para evitar la delaminación o el desgaste prematuro del material compuesto.

## 2.3 Clasificación de los materiales compuestos

De las diferentes clasificaciones que pueden hacerse de los materiales compuestos, la más importante posiblemente sea la que se refiere a su matriz, pudiendo identificar tres grupos principales [8].

- a. Materiales compuestos de matriz polimérica (CMP): en estos compuestos la matriz es un polímero que puede ser termoestable como las resinas epoxi; termoplástico como el polipropileno; o elastómero como las siliconas. Durante el proceso de fabricación se emplean en estado líquido y conforme la resina comienza a polimerizar, esta se endurece. Se caracterizan por ser resistentes a la corrosión y a los agentes químicos. El empleo de este tipo de material compuesto tiene diversas ventajas si se compara con las otras opciones, estas son su ligereza, lo que es beneficioso para aplicaciones donde la reducción de peso es crítica; procesabilidad, siendo más fáciles de procesar y fabricar en comparación con los materiales compuestos de otras matrices; buena resistencia a impactos, ya que suelen tener buenas propiedades de absorción de energía, lo que los hace adecuados para aplicaciones que involucran esfuerzos puntuales. Por otro lado, presenta desventajas como las limitaciones térmicas y de resistencia, así como menor rigidez en comparación con las matrices cerámicas y metálicas.
- b. Materiales compuestos de matriz cerámica (CMC): Este tipo de material compuesto se caracteriza por su excepcional resistencia a altas temperaturas, dureza y rigidez, lo que los hace idóneos para aplicaciones en situaciones extremas, como ocurre en la industria aeroespacial y automovilística. Por otro lado, presenta desventajas como son la fragilidad, siendo más propensos a la fractura que el resto de materiales, y las complicaciones que presenta su fabricación.
- c. Materiales compuestos de matriz metálica (CMM): este tipo de material compuesto presenta ventajas en comparación con el resto de las opciones como son su alta rigidez y resistencia, haciéndolos aptos para la

construcción. Por otra parte, poseen buena conductividad térmica y eléctrica. Desventajas como el peso o la susceptibilidad a la corrosión los hacen menos empleables en comparación con el resto de los materiales compuestos.

En función del tipo de refuerzo empleado los materiales compuestos pueden clasificarse en:

- a. Material compuesto reforzado con partículas: como es el caso de la grava en matriz cerámica, conocido como hormigón. Las partículas de refuerzo se encuentran orientadas al azar dentro del material que hace función de matriz, por tanto, la resistencia y otras propiedades del material compuesto son generalmente isotrópicas. El mecanismo de refuerzo depende del tamaño de las partículas, cuando las partículas se encuentran bajo el rango microscópico (menores a  $1\ \mu\text{m}$ ), se presentan dispersas en la matriz endureciendo la matriz, reforzando la matriz en sí misma, y las partículas no comparten parte alguna de la carga. Cuando se trata de partículas dentro del rango macroscópico (mayores a  $1\ \mu\text{m}$ ) la proporción del material de refuerzo aumenta respecto a la fase matriz y el mecanismo de refuerzo cambia, siendo compartida la fuerza aplicada sobre el material entre la fase matriz y la fase de refuerzo.
- b. Material compuesto reforzado con fibras: las fibras son filamentos de material de refuerzo, generalmente de sección transversal circular que se encuentran embebidas en la fase continua proporcionando resistencia y rigidez al material, mientras que la matriz actúa como un aglutinante que mantiene las fibras en su lugar y transfiere las cargas entre ellas. Las fibras pueden encontrarse orientadas al azar o con una dirección predeterminada. Según la longitud de fibra empleada, pueden clasificarse como reforzados con fibras discontinuas o continuas.
- c. Material compuesto estructural: pueden clasificarse en laminares o de tipo sándwich. Los laminares son formados por capas de materiales siguiendo

una secuencia de apilamiento, hasta obtener un espesor y unas características determinadas. Las propiedades resultantes pueden ser controladas en cierta medida teniendo en cuenta las direcciones preferentes de las diferentes capas de material apilado, consiguiendo un material más o menos anisótropo. Por otro lado, los paneles sándwich consisten en dos o más láminas exteriores de elevada dureza y resistencia, separadas por un material menos denso y resistente, pudiendo ser este, entre otros materiales, un polímero espumoso o madera de balsa, realizando este la función de núcleo del panel sándwich.

## 2.4 Fibras más empleadas actualmente

Los tipos de fibras más empleados actualmente en la industria son:

- **Fibra de vidrio.**

Se trata de una fibra sintética ampliamente utilizada en la industria debido a su bajo costo en comparación con otros materiales, alta resistencia mecánica y una muy buena resistencia a la corrosión. Compuesta principalmente por sílice, es ligera, con cierta flexibilidad y con muy buenas propiedades dieléctricas. Por lo general se utiliza en aplicaciones donde se requiere buena resistencia a tracción, rigidez y aislamiento eléctrico, como en la fabricación de tuberías, tanques y componentes para electrónica como placas de circuito impreso.

- **Fibra de carbono**

Se caracteriza por su alta resistencia, rigidez, bajo peso y una buena conductividad eléctrica. Es una fibra sintética compuesta por carbono en forma de filamentos delgados y largos.

Propiedades únicas como su alta resistencia específica o el bajo coeficiente de expansión térmica la hacen increíblemente útil para ciertas aplicaciones como en la industria aeroespacial, automotriz o incluso hoy en día en la

industria de la construcción. El inconveniente que presenta es el elevado coste que supone este material.

- **Fibra de poliaramida**

Este tipo de fibra sintética es una fibra polimérica, más conocida por su nombre comercial, Kevlar. Se caracteriza principalmente por su elevada resistencia a tracción, la cual es 10 veces mayor que la del acero. Característica importante a tener en cuenta es que es un material higroscópico, por lo que es importante almacenarlo en un ambiente seco, evitando así un deterioro de este. Debido a su resistencia a tracción es ampliamente utilizada en la industria armamentística y militar, fabricándose chalecos antibalas y diferentes tipos de blindajes

- **Fibras naturales**

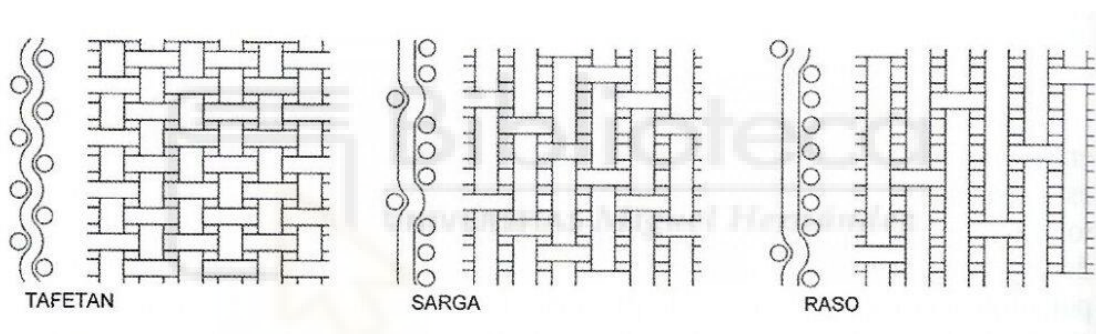
Este tipo de fibras se han empleado desde hace años. En la actualidad se están incorporando en piezas y elementos donde no se requieren altas prestaciones, con el objetivo de reducir el impacto ambiental en la industria. Lo que supone un aliciente añadido es que este tipo de fibras se encuentran en abundancia en la naturaleza y su uso no supone un coste elevado. La fibra de lino y el algodón se encuentran dentro de esta tipología de fibras.

En la actualidad, independientemente del material que forma la fibra, se puede encontrar dispuesta de diferentes maneras:

- **Mat:** lámina uniforme de hilos que pueden ser continuos o hilos cortados, entrelazados que no siguen ningún orden determinado, todos ellos prensados y ligados por un ensimaje. Habitualmente este formato suele emplearse utilizando fibra de vidrio.
- **Hilos o roving:** agrupación de fibras de forma continua, reuniéndolas en una sola hebra o hilo. Principalmente se emplean como refuerzo en áreas

específicas, enrollando la fibra, tejiendo o sencillamente disponiéndola en la zona que requiera un refuerzo.

- **Tejidos:** en este formato las fibras presentan una estructura bidimensional de fibras entrelazadas, formados por fibras continuas. La orientación de las fibras condicionará las propiedades resultantes del laminado final, así como su grado de isotropía. Pueden encontrarse tejidos biaxiales y triaxiales. Los tejidos pueden adaptarse a formas complejas. Al grado de adaptabilidad de los tejidos se le define como drapabilidad. En función del entramado de las fibras podrá adaptarse mejor a diferentes formas complejas. Se puede encontrar en función del entramado que presenten las fibras, tejido tafetán, sarga y satén o raso (Figura 2).



*Figura 2. Tipos de tejido según el entramado*

## 2.5 Técnicas más comunes utilizadas para fabricar FRP

Hay diferentes factores que se han de tener en cuenta en función de la técnica de trabajo que se vaya a emplear, así como el tipo de fibra que se va a utilizar. Se puede emplear la fibra en estado seco y añadir posteriormente la resina que hará función de matriz o bien, emplear lo que se denomina prepreg, una combinación preliminar de fibra y matriz. Un prepreg suele presentarse en forma de tiras o bandas con un ancho y espesor específico determinado, formadas por fibras continuas y unidireccionales, donde la fibra tiene la resina impregnada, pero sin llegar a polimerizar. Esta combinación preliminar permite que se pueda





A la hora de fabricar un producto se emplean diferentes técnicas de trabajo que se eligen en función de la calidad y prestaciones que deba tener la pieza. Las técnicas más empleadas en la actualidad son [8]:

- **Laminación manual:** esta técnica consiste en la aplicación manual de resina y de sucesivas capas de refuerzo de fibra, si se emplea fibra en estado seco, o en apilar capas de prepreg, hasta conseguir el espesor deseado, sobre un molde abierto o un sustrato, empleando rodillos para la compactación (Figura 4). El proceso consta de 5 etapas: preparación de la superficie, colocación del material de refuerzo, vertido de la resina, curado y acabado superficial. Esta técnica será la empleada en la fabricación del prototipo que aparece en este trabajo, como se verá más adelante.

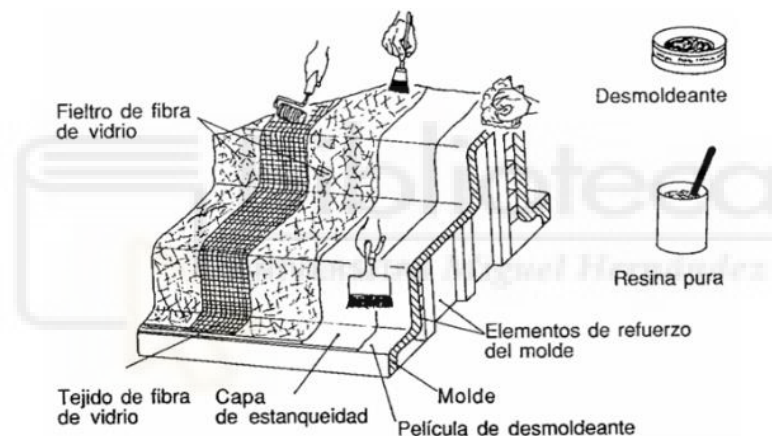


Figura 4. Esquema con los diferentes elementos empleados en laminación manual

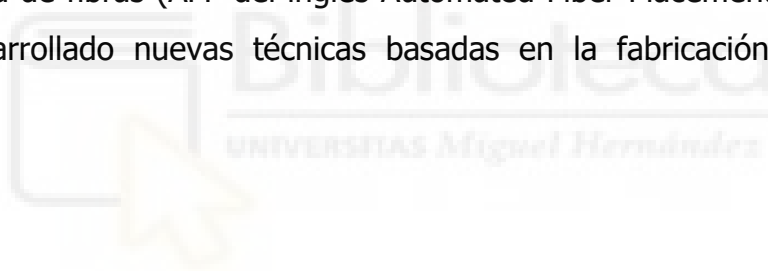
- **Moldeo por transferencia de resina:** comúnmente conocido como RTM (Resin Transfer Molding), las fibras de refuerzo en forma de preforma, son colocadas en un molde cerrado y se introduce resina líquida mediante un sistema de inyección a través de 1 o más puntos. La resina se distribuye uniformemente en el molde y posteriormente se cura para formar la pieza final.
- **Moldeo por infusión al vacío:** esta técnica aparece como una adaptación del RTM. En un molde abierto se apilan las capas de tejido y se aplica vacío utilizando lo que se denomina "bolsa de vacío". Este elemento cubre todo

el laminado y se sella herméticamente sobre el molde. Empleando una bomba de vacío se extrae el aire a través de uno o varios canales mientras que al mismo tiempo se introduce la resina mediante 1 o varios puntos de inyección previamente conectados al interior de la bolsa, impregnando los tejidos por completo. Empleando este método se consiguen piezas de buena calidad, apenas sin burbujas de aire, obteniendo un buen acabado superficial en la cara de la pieza que se encuentra en contacto con el molde.

- **Moldeo por bolsa de vacío:** sobre un molde abierto o un sustrato se coloca el material de refuerzo y es impregnado por completo con resina. Una vez impregnado se cubre empleando bolsa de vacío y se sella herméticamente. Utilizando una bomba de vacío se genera una depresión en el interior de la bolsa, provocando que esta presione el tejido y se retire el exceso de resina que pueda tener. También puede aplicarse presión positiva sobre la bolsa para compactar así las capas de tejido y adoptar la forma deseada. La pieza se cura manteniendo la presión provocada por la bomba.
- **Moldeo por compresión:** en esta técnica de fabricación con molde cerrado, se colocan sucesivas capas de material de refuerzo en un molde preformado y se aplica resina. El molde se cierra y se somete a presión y calor para consolidar el material, generando una rebaba en el perímetro de la pieza, retirando así el exceso de resina de la pieza y consiguiendo la pieza final.
- **Bobinado de filamentos:** esta técnica es utilizada para piezas con simetría axial. La manera más habitual de proceder consiste en enrollar filamentos continuos de fibra de refuerzo impregnados con resina sobre un mandril giratorio, controlando el patrón de orientación en cada capa. El proceso se repite en capas hasta alcanzar el espesor y las propiedades deseadas. Posteriormente se cura la resina para obtener una estructura sólida.

- **Pultrusión:** esta técnica consiste en suministrar el material de refuerzo en forma de fibra continua, desde unas bobinas, pasando a través de un baño de impregnación lleno de resina. El compuesto de fibra se hace pasar posteriormente a través de una herramienta de moldeo calentada previamente, que tiene la forma negativa del perfil generado. La pieza se deja curar controlando la temperatura y manteniendo la fibra estirada. Esta técnica es especialmente utilizada para la fabricación de perfiles largos y de sección transversal constante, como varillas, tubos y perfiles estructurales.

Las técnicas mencionadas son las de mayor antigüedad y amplia difusión en la fabricación mediante el uso de materiales compuestos. No obstante pueden encontrarse técnicas diseñadas en la última década y que tienen la finalidad de obtener mayor automatización del proceso, entre ellas se encuentran: colocación automatizada de cintas (ATL del inglés Automated Tape Layup) y colocación automatizada de fibras (AFP del inglés Automated Fiber Placement). Así mismo se han desarrollado nuevas técnicas basadas en la fabricación aditiva [9].



## 2.6 Actual diseño de las cabinas de trabajo y materiales empleados

En los diferentes diseños de empresas punteras en la fabricación de cabinas de trabajo, se observa una línea clara de diseño, en la cual predominan líneas rectas. Son cabinas rectangulares en las que se busca la confortabilidad, con un interior claro y fabricado con tejidos de colores neutros (Figura 5). Estas cabinas están fabricadas principalmente con madera y chapa metálica. Para proporcionar modernidad al diseño se emplean luces LED y se incorporan pantallas táctiles con las que poder regular la temperatura e intensidad de la luz.



*Figura 5. Diseños ya existentes de cabinas de trabajo*

Como se dijo al inicio de este trabajo el objetivo de Laurent Composite es destacar con el diseño y las prestaciones técnicas por encima del resto, empleando materiales y formas novedosas. Es aquí cuando entra en juego la fibra de carbono y el diseño facetado de la cabina.

Se busca diferenciar el diseño en comparación con el resto, empleando un facetado de triángulos. Observando las últimas tendencias de diseño se está viendo un destacado uso de este concepto. Empleando la fibra de carbono como material estético se busca llegar a un comprador exigente, que busca diferenciarse, empleando materiales de altas prestaciones relacionados con el lujo y la deportividad. Combinando el acabado tan destacable de la fibra de carbono y el diseño facetado, se busca una semejanza con una joya.

Respecto al interior de la cabina se pretende seguir la línea de ser respetuoso con el medio ambiente, pero combinándolo con últimas tecnologías y tendencias. Así pues, se decide utilizar fibra de lino, un material ecológico que cada vez aparece más en el mundo deportivo, marcas como Porsche o BMW ya incluyen este material en componentes de sus productos [10]. Por ello la superficie interior de la cabina será fabricada empleando este material y dejándolo a la vista por completo.



### 3 OBJETIVOS

Con la realización de este trabajo se pretende cumplimentar una serie de objetivos, los cuales son:

1. Diseño de un prototipo de cabina individual empleando Autodesk Inventor.
2. Fabricación de un prototipo de cabina individual empleando material compuesto y evaluando la elección del empleo de materiales novedosos como la fibra de carbono y respetuosos con el medio ambiente como la fibra de lino.
3. Fase de pruebas con la consiguiente evaluación de la elección del método empleado en la fabricación del prototipo de la cabina de trabajo y los resultados obtenidos, mediante el análisis de las incidencias observadas en su empleo y posibles alternativas.
4. Planteamiento de la fabricación en serie en base al análisis obtenido de la fase de pruebas.



## 4 DESARROLLO DEL PROYECTO

### 4.1 FASE DE DISEÑO

#### 4.1.1 Diseño del prototipo

Previo al inicio de la etapa de diseño se estudiaron diferentes estándares dimensionales como los de las medidas de las puertas de acceso a locales y oficinas (ya que la cabina sería un único bloque), normativa reguladora del nivel óptimo de iluminación de un puesto de trabajo y la ventilación (NORMAS NTP 211: Iluminación de los centros de trabajo, Real Decreto 1027/2007 de 20 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios). Basándose en los estándares de puertas se determinó ajustar la cabina a unas medidas de altura de 2'15 m, profundidad 1'10 m y anchura 1'20 m.

Una vez establecidas las bases conceptuales, se plantea el diseño de la cabina empleando el software de diseño 3D Autodesk Inventor, siguiendo el esquema que refleja la Figura 6.

Primeramente fue modelada la superficie externa y posteriormente el interior. Para proceder con esta parte del diseño, el cuerpo de la cabina (Figura 6, elemento 1) se "partió" en 4 aros y posteriormente estos aros se dividieron en cuartos. Con este proceso se consigue que, trabajando únicamente sobre cuatro elementos se haga el trabajo de casi el exterior completo, utilizando herramientas como la simetría y patrones.





*Figura 6. Renderizado de la cabina en Autodesk Inventor*



*Figura 7. Imagen de detalle silicona protectora con LED en interior*

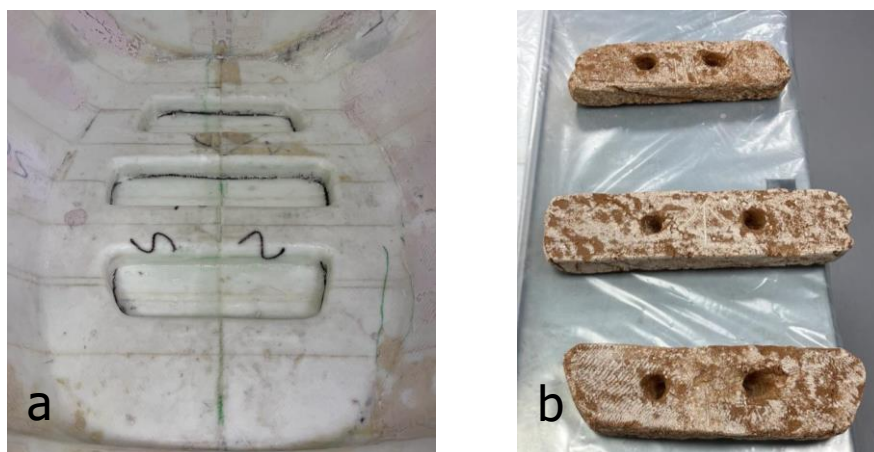
A continuación, se modeló el marco de la puerta (Figura 6, elemento 2) y el fondo de la cabina (Figura 6, elemento 3). Estos dos elementos parten del modelado de la misma pieza, por lo que se modeló una de ellas y se hizo simetría. En el diseño del marco de la entrada a la cabina, fue implementado un cajeadado alrededor del contorno para poder incorporar una tira LED (Light Emitting Diode) con silicona protectora (Figura 7, elemento 7). La elección de este elemento se basa en dos factores, por un lado estético y por otro, hacer la función de amortiguación del cierre junto con el cristal. Esto permitirá que la puerta se cierre sobre un elemento que permite una deformación plástica, suavizando el impacto del cierre y favoreciendo la insonorización. A su vez, al marco se le dio una

inclinación con un ángulo determinado para permitir salir la luz del LED, lo que permitirá también una correcta laminación, como se explicará más adelante.

El modelado de la estructura de la cabina, el cuerpo completo, será el archivo 3D empleado para mecanizar en PS expandido (Poliestireno expandido), el núcleo del laminado que forma la cabina. El prototipo será fabricado laminando sobre este núcleo, formando así una estructura sándwich.

En lo que respecta al suelo de la cabina (Figura 6, elemento 4), se elige una loseta de mármol Negro Markina. Esta elección tiene dos justificaciones, por un lado, seguir la línea de diseño de lujo pretendida, y por otra mejorar la estabilidad de la cabina, ya que en relación tamaño-peso, el mármol supone una buena carga. Al encontrarse en la parte más baja de la cabina, el mármol trabajando como lastre consigue bajar el centro de gravedad, ayudando a prevenir accidentes de vuelco.

Por otra parte, para asegurar más este aspecto, se realizaron 3 cajeados que se encuentran por debajo del mármol, estos cajeados se rellenan de una mezcla de arena y resina epoxi, funcionando como lastre, ayudando así a asegurar la prevención de cualquier accidente, (Figura 8).



*Figura 8. (a) Cajeados para los lastres. (b) Lastres de arena y resina epoxi.*

En cuanto al diseño del cristal de la puerta, se tiene en consideración que será pesado por lo que la elección de unas correctas bisagras y puntos de sujeción es fundamental. Se adopta la decisión de diseñar la parte del cristal que irá fijo a la

cabina con 4 puntos de sujeción, uno en la parte superior del cristal, dos a la altura de la mesa y un último punto en la zona inferior (Figura 9).

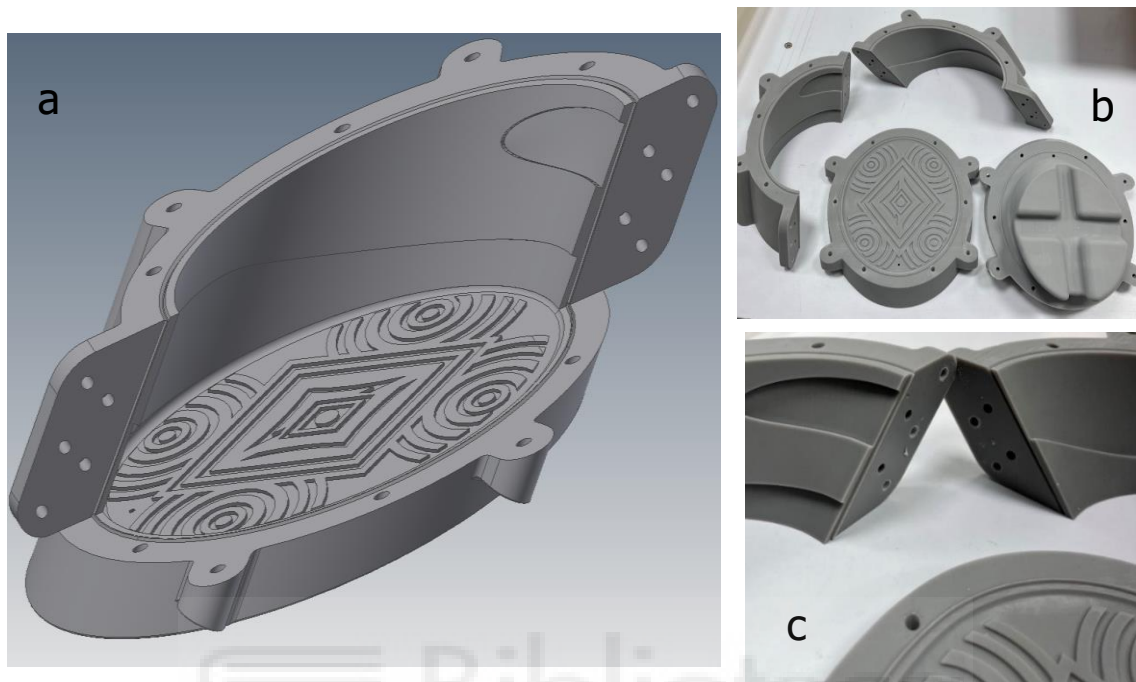


*Figura 9. Detalle de los puntos de sujeción.*

A nivel funcional y técnico, para el diseño de los elementos de soporte de la cabina (Figura 6, elemento 5) se elige tubos de acero cromados de 120 mm de diámetro y una pared de 2 mm de espesor. Esta elección está condicionada por el peso final que tendrá el producto una vez terminado. Teniendo en cuenta estos factores y que la cabina está siendo diseñada con 4 puntos de apoyo, se valoró poner espesor de 3 mm, pero realizando un análisis de elementos finitos con el módulo de análisis de Autodesk Inventor se comprobó que, para la carga máxima que podían llegar a soportar estos elementos, un espesor de 2 mm sería suficiente.

Para asegurar el apoyo correcto de las patas se colocan gomas antideslizantes al final de estas (Figura 6, elemento 6), para procurar un correcto agarre evitando un posible deslizamiento entre cabina y suelo. Las gomas para los prototipos han sido fabricadas utilizando moldes de impresión 3D (Figura 10). Estos moldes han sido diseñados utilizando conceptos básicos de utillaje, ángulos de desmoldeo y

pasadores de alineación. El material empleado para la fabricación de las gomas ha sido resina de poliuretano y se ha seguido el método de colada.



*Figura 10. (a) Diseño 3D del molde en Inventor. (b) Imagen general del despiece del molde impreso. (c) Detalle de agujeros para pasadores de alineación.*

En paralelo a la etapa de diseño se procedió a la elección de los herrajes y elementos necesarios para la sujeción del cristal, la sujeción de las patas, así como las rejillas de ventilación y elementos eléctricos. Para la sujeción del cristal se eligieron herrajes de acero inoxidable y a su vez, bisagras hidráulicas cromadas. La elección de los materiales fue tomada de cara a la durabilidad e higiene, pues el acero inoxidable y el cromado dificulta la proliferación de gérmenes. Con los mismos principios se seleccionaron las rejillas de ventilación.

#### **4.1.2 Consideraciones de diseño al emplear material compuesto y utilizar laminación manual como método de fabricación**

La cabina de trabajo se fabricará principalmente empleando fibra de carbono, fibra de vidrio y fibra de lino, con el objetivo de conseguir un compuesto sándwich con núcleo de PS expandido. La técnica escogida para la fabricación es el laminado manual, basándose en la relación calidad-costes-dificultad. Con este método se obtendrá una calidad superficial y estética aceptable teniendo en cuenta el gasto de fabricación que conlleva y el tiempo empleado en finalizar su fabricación.

Tomando en consideración este método, en el diseño se tiene en cuenta que no será posible replicar una arista viva, ya que no se aplicará suficiente presión sobre el modelo y no podrá adoptar la forma. En el caso de no tener este aspecto en cuenta y el modelo mantener estas aristas, podrían aparecer diversos fallos durante la fabricación, como la acumulación de resina en la arista, lo que conlleva una falta de material de refuerzo o delaminaciones, debidas a la mala interfase de unión entre las diferentes capas de refuerzo. Muchos de estos errores no son visibles a simple vista, lo que supone un alto riesgo. Elementos del diseño con ángulos cercanos a  $90^\circ$  se rematan con empalmes que generan un pequeño radio para poder aplicar de forma correcta el material de refuerzo.

La correcta adaptación del tejido a la forma del núcleo se tiene en cuenta para la elección del tipo de tejido. Por tanto, se controla tanto la disposición de las fibras como la densidad que tendrá de fibra por metro cuadrado.

Por otra parte, se debe tener en cuenta que los FRP no trabajan bien ante esfuerzos puntuales por lo que para emplear herrajes como los que sostienen la puerta, se tendrá que utilizar refuerzos, que en este caso serán tabloncillos de madera multicapa (Figura 11.a).

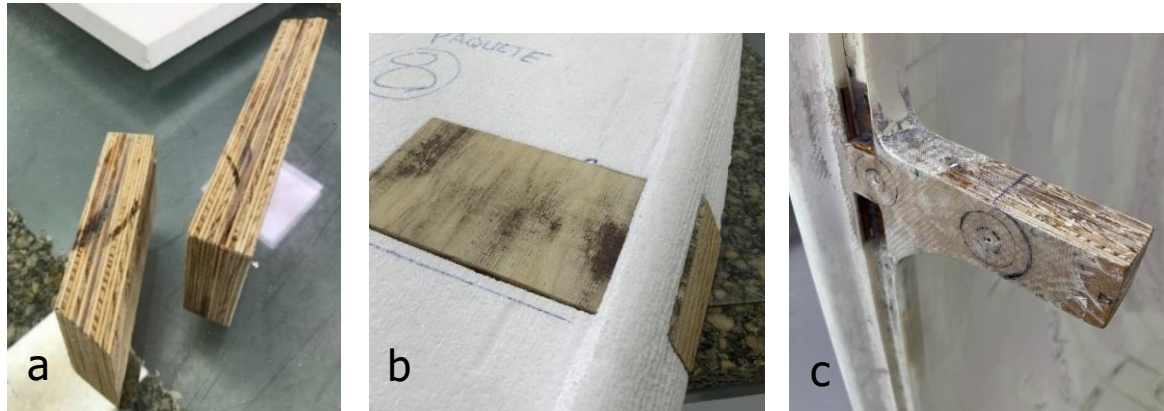


Figura 11. (a) Refuerzos para soportar esfuerzos puntuales. (b) Colocación del refuerzo para los herrajes de la mesa. (c) Refuerzo integrado entre las capas de fibra de vidrio.

Para el correcto funcionamiento de estos refuerzos se procura obtener un adecuado pegado y con la mayor superficie de contacto posible, de ahí que se hicieran los cajeados intentando conseguir 4 superficies de pegado. Una vez adheridos al PS, se consiguió que formasen una única pieza con este (Figura 11.c).

El siguiente paso será laminar la pieza consiguiendo que la resina penetre en los refuerzos, que al ser de madera son porosos y permiten una buena adhesión.

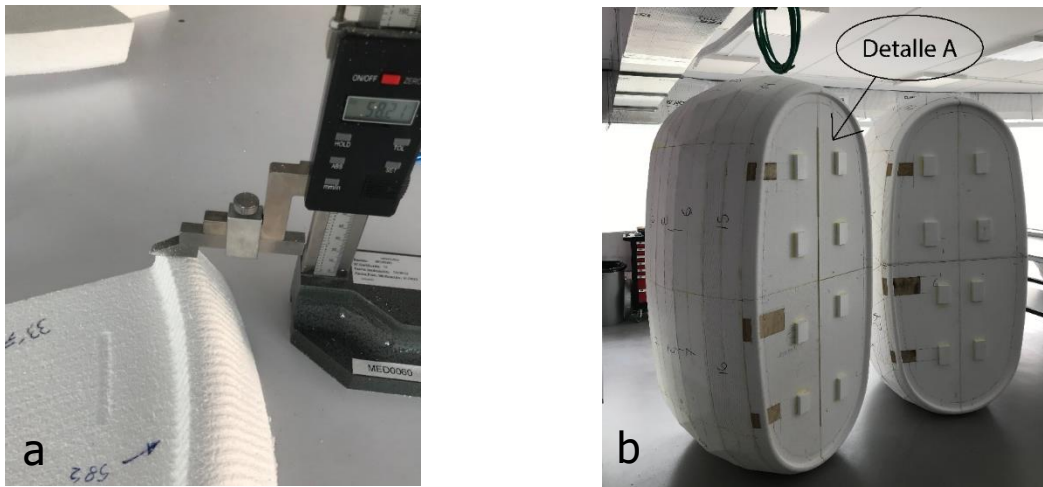
## 4.2 FASE DE FABRICACIÓN

### 4.2.1 Preparación previa y ajuste de las piezas.

Los bloques de PS expandido llegaron a las instalaciones con errores de medida (Figura 12.a), por lo que sufrieron un ajuste añadiendo material donde se requería y lijando hasta llevar las piezas a las cotas necesarias. Una vez las piezas fueron ajustadas y pegadas, se obtuvo la estructura del cuerpo completo con el fondo y el marco que formaría la puerta (Figura 12.b). El siguiente paso fue lijar todo el exterior para obtener de manera más afinada los triángulos del exterior. Una vez obtenido un exterior más uniforme, se procedió a eliminar el



exceso de material que tenía la zona que sería la futura puerta (Detalle A, Figura 12) para proceder a lijar el interior de la cabina y conseguir un interior uniforme.



*Figura 12. (a) Error de cota encontrado en la revisión de las piezas de PS expandido.*

*(b) Estructura de PS expandido pegada por completo*

Una vez que toda la superficie exterior e interior fue lijada, se procedió a realizar el cajeadado necesario para el canal donde se colocaría el LED, los cajeados necesarios para la ventilación y los necesarios para instalar canales por donde serían pasados los cables de la instalación eléctrica (Figura 13.a), así como el necesario para el enchufe.

En esta fase son introducidos insertos roscados y tuercas remachables en el PS expandido. Para procurar que estos elementos funcionen de forma correcta son introducidos con el tornillo en su interior (Figura 13.b), consiguiendo que al fijarse con la fibra y la resina, mantengan la alineación necesaria. Este proceso es muy empleado en el mundo de la fabricación en materiales compuestos debido a su sencillez. Para procurar que los insertos trabajen de forma correcta, una vez han sido introducidos en el alojamiento, se recubren con resina epoxi mezclada con microbalones de vidrio. Mediante este proceso se consigue más resistencia de pegado entre el inserto y el PS expandido. Los microbalones de vidrio también son conocidos como microesferas de vidrio. Son partículas que se emplean para dar volumen a la resina, otorgándole también mayor dureza y menor contracción

a la pieza. Por otro lado, combinándolos con el epoxi se consigue un relleno muy ligero y fuerte.



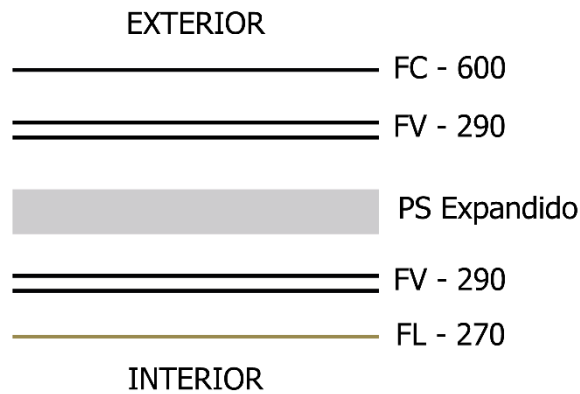
Figura 13. (a) Canal para el cableado. (b) Insertos roscados introducidos en el núcleo.

#### 4.2.2 Laminación manual

Este método consiste en la colocación secuencial de las diferentes capas de tejido sobre un sustrato o sobre un molde. En el caso del prototipo se ha llevado a cabo sobre un sustrato, PS expandido, material que desarrollará la función de núcleo. Laminando sobre la superficie exterior e interior del PS expandido se consigue una estructura de tipo sándwich, siguiendo una secuencia de apilamiento con tres capas de tejido, fibra de vidrio (FV), fibra de carbono (FC) y fibra de lino (FL), a cada lado del PS expandido.

El número de capas a disponer sobre el núcleo, como se observa en el esquema de la secuencia de laminación (Figura 14), es de 3 capas de tejido para el laminado exterior (desde el núcleo hacia el exterior: FV-290, FV-290 y FC-600) y de otras 3 capas de tejido para el laminado interior (desde el núcleo hacia el interior: FV-290, FV-290 y FL-270). El número que sigue a las siglas FV/FC/FL hace referencia al gramaje del tejido medido en  $\text{g/m}^2$ .





*Figura 14. Esquema del laminado general de la cabina*

Los materiales empleados en la fabricación fueron elegidos teniendo en cuenta diferentes factores así como las limitaciones que se deben al método utilizado para laminar.

- Material empleado para el núcleo del laminado.

El PS expandido es el material empleado para hacer la función de núcleo del laminado. Por un lado, este material fue elegido por conceptos económicos, permite elaborar grandes piezas a un precio razonable y, por otro lado, es muy mecanizable y maleable, por lo que para procesos de ajuste de medidas y acabado sería perfecto. Para la técnica de laminación era una buena elección ya que la resina penetra entre los poros superficiales y permite una correcta unión entre la resina y el poliestireno, previniendo en cierto grado la delaminación.

- Tejidos empleados:

Tejido de fibra carbono sarga de 600 g/m<sup>2</sup>

Tejido de fibra de vidrio sarga 290 g/m<sup>2</sup>

Tejido fibra de lino sarga 270 g/m<sup>2</sup>

Todos los tejidos empleados son de tipo sarga, esto es debido a que el núcleo, al cual deberán adaptarse los tejidos, presenta formas complejas. Un tejido de este tipo, comparado con el resto de las tipologías, puede adaptarse a formas más complejas, debido a la drapabilidad del tejido. Este concepto hace referencia a la capacidad del tejido para adaptarse y conformarse a formas o superficies

curvas de manera suave y natural. El gramaje del tejido de fibra de vidrio es debido a la posibilidad del tejido de adaptarse a la forma, un tejido de mayor gramaje empleando el método de laminación manual resultaría de mayor dificultad. Por otro lado el gramaje de la fibra de carbono fue elegido porque al ser dispuesto como la última capa del laminado, se encontrarían por debajo capas suficientes de fibra de vidrio que suavizarían todas las aristas, permitiendo al tejido de fibra de carbono ser de mayor gramaje y adaptarse sin presentar dificultades. Un aliciente también es que debido a ese gramaje la fibra de carbono era visible a una distancia media y a su vez era económica debido a que es comúnmente empleada en esas medidas. En lo referente a la fibra de lino era escasa la variedad a elegir al no ser muy comercializada para estos fines, a nivel económico resultaba viable en el gramaje escogido.

- Resina empleada:

Resina epoxi

Se trata de un polímero termoestable que se endurece cuando es mezclado con un catalizador o endurecedor, generando una estructura reticulada.

Para llevar a cabo la fabricación, primeramente se corta y coloca una capa de tejido sobre el núcleo. En paralelo se realiza la mezcla de la resina epoxi teniendo en cuenta su tiempo de vida útil (este parámetro es indicado en las hojas técnicas del producto). Cuando el tejido es colocado, se procede a impregnar empleando rodillos y brochas (Figura 15).

Es necesario aplicar presión a la hora de impregnar el tejido para conseguir que copie la forma del núcleo y eliminar posibles burbujas de aire. Este paso tiene gran importancia cuando se emplea esta técnica, pues si no se realiza de forma correcta se quedarán porciones del tejido sin resina y puntos en los que podrán quedar burbujas de aire, obteniendo una pieza con fallos locales donde podrían aparecer delaminaciones y roturas.



*Figura 15. Impregnación de la capa de fibra de carbono*

Una vez el tejido ha sido impregnado por completo, se procede a dejar curar a temperatura ambiente, obteniéndose la primera capa del laminado. Como paso previo a la colocación de la siguiente capa se procede a lijar la superficie con el fin de procurar una correcta adhesión entre las capas. Las siguientes capas se colocarán e impregnarán siguiendo el mismo procedimiento que con la primera.

Teniendo en cuenta que, los materiales compuestos no soportan de forma correcta esfuerzos puntuales, los tubos de acero que realizan la función de soporte de la cabina deberán tener un refuerzo extra para evitar la fractura en las zonas de contacto entre el tubo y la cabina. Estos refuerzos fueron fabricados utilizando 3 capas de fibra de vidrio y empleando los mismos tubos como modelos y moldes.

Debido a que la geometría lo permite, estos refuerzos son obtenidos mediante el método de laminación por método húmedo y bolsa de vacío (Figura 16.a). El proceso a seguir es el siguiente:

- Preparación de la superficie: El tubo es limpiado con disolvente para retirar cualquier contaminante de la superficie y se le aplica cera como desmoldeante.
- Preparación de las piezas de tejido, colocación e impregnación con resina: Se cortan las piezas necesarias de fibra de vidrio, en el caso presente, 3 capas. Dichas piezas son colocadas sobre el modelo/molde, y se impregnan de resina empleando brochas.
- Colocación de *Peel Ply*: Una vez han sido colocadas e impregnadas las capas de tejido, se lamina sobre la última capa una extra de tejido conocido como *Peel ply*. Este material se caracteriza por no quedar unido con el resto de materiales cuando la pieza cura, por lo que una vez la pieza este impregnada de resina y curada, se retirará. Esto se realiza con el fin de conseguir una superficie rugosa que mejorará la calidad de pegado para posteriores procesos.
- Colocación de bolsa de vacío: Una vez colocados todos los materiales se procede a cubrir todo el laminado con bolsa de vacío. Empleando *tacky tape* (Figura 16.b) se sella cualquier orificio por donde pueda entrar aire. Si la bolsa no queda sellada por completo de forma correcta, podría suponer defectos en la pieza. Antes de sellar por completo la bolsa, se coloca un tubo o cánula por donde se realizará el vacío empleando una bomba de vacío.

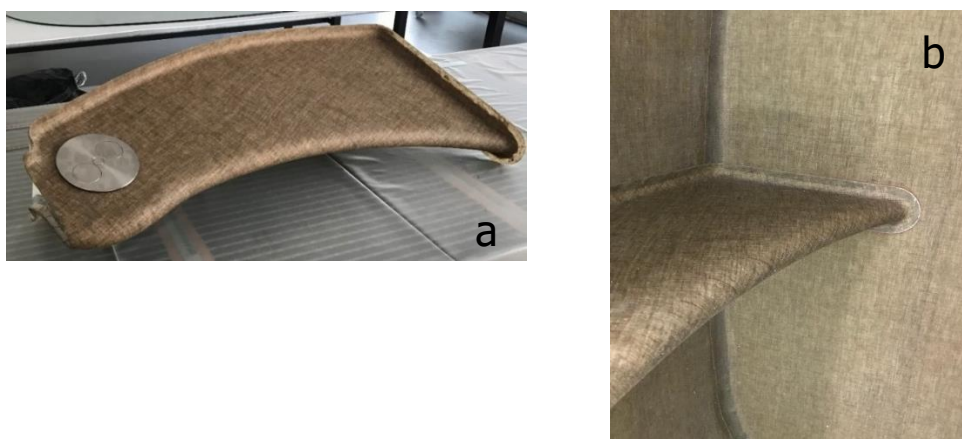


Figura 16. (a) Fabricación de refuerzos empleando bolsa de vacío. (b) Tacky tape

Siguiendo el esquema de laminación previamente explicado y utilizando el método de laminado húmedo, el proceso fue llevado a cabo laminando primeramente la superficie del exterior y dejándola curar. A posteriori, con el exterior curado, fue laminada la superficie interna de la cabina. El proceso se separó en estas dos etapas debido al tiempo que llevaba laminar cada superficie. El tiempo de curado de la resina limitaba el tiempo de trabajo, por lo que se procedió a trabajar de esta manera. También así la cabina podría ser manipulada sin complicaciones, con la superficie externa curada por completo se evitaba causar cualquier tipo de desperfecto sobre ella.

### 4.2.3 Fabricación y laminado de la mesa

Para llevar a cabo la fabricación de la mesa en este prototipo, cabe destacar que, debido a la complejidad de forma que presenta el diseño de la mesa, fue laminada por separado del cuerpo general, siguiendo el mismo esquema de apilamiento que la superficie interior. Es decir, en este elemento el laminado exterior de la pieza es con la fibra de lino como última capa (Figura 17.a). Posteriormente la mesa fue pegada empleando resina epoxi con carga de microbalones de vidrio y fijada a la cabina (Figura 17.b).



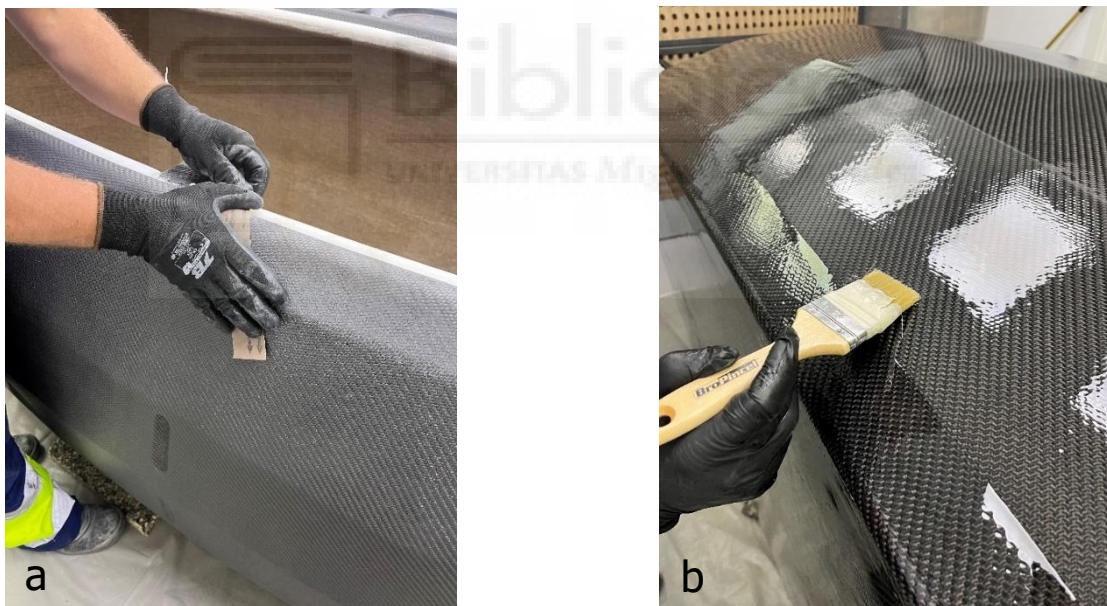
*Figura 17. (a) Mesa laminada por separado. (b) Interior de la cabina cubierta de lino*



#### 4.2.4 Proceso de acabado superficial.

En lo que respecta al acabado superficial del laminado exterior, primeramente se lija por completo (Figura 18.a) y posteriormente se lleva a cabo la aplicación de una capa de lo que se conoce como *gel coat* sobre este (Figura 18.b). El *gel coat* es un material que es empleado para proporcionar un acabado de calidad a la superficie y proteger el producto contra los rayos UV y la corrosión.

En el caso en concreto del presente trabajo, este paso es llevado a cabo manualmente, lo que produce imperfecciones. Para corregir estos defectos la pieza es lijada hasta conseguir superficies de mayor calidad. Por último, con la finalidad de conseguir el acabado deseado, una última capa de barniz se aplica en el exterior empleando una pistola. Al dejar curar esta última capa, la pieza es pulida y limpiada para así dejarla terminada.



*Figura 18. (a) Proceso de lijado de capa exterior de fibra de carbono. (b) Aplicación de gel coat.*

Respecto al acabo superficial del interior no se busca lo mismo que en el acabado exterior, sino que se busca conseguir un acabo texturizado que recuerde a un tejido tapizado. El acabado con rugosidades e imperfecciones de la fibra de lino en el interior, obtenido al aplicar la resina empleando rodillos, no es el deseado, por lo que se lleva a cabo un proceso de terminación. Se lija y se vuelve

a impregnar de resina pero esta vez siguiendo un procedimiento que consiste en impregnar la resina con muñequilla. Aplicándola de esta manera, se busca repartir uniformemente la resina al emplear una herramienta que consiste en una bola de algodón con una tela alrededor (Figura 19).



*Figura 19. Herramienta conocida como muñequilla*



### 4.3 FASE DE PRUEBAS

Tras la finalización de la fabricación del prototipo se obtiene una estructura completa que se ha de testar con el fin de comprobar los resultados obtenidos (Figura 20).



*Figura 20. Prototipo de cabina terminado*

El prototipo se ha testado dentro de la empresa siendo usado por el equipo de ventas. En este caso los comerciales son los que aportan los puntos positivos y negativos del producto después de utilizarlo en la jornada laboral. Gracias a esto se llevan a cabo cambios necesarios que en la primera etapa de diseño no se tuvieron en cuenta, como la ampliación del tamaño de la mesa ya que se requiere más área para trabajar de forma correcta con un ordenador. Otro cambio por realizar son los ventiladores, con la finalidad de aumentar el flujo de aire dentro de la cabina y así conseguir una temperatura de trabajo más agradable.

En el periodo de prueba tras montar la cabina terminada, se observa que la instalación del suelo es compleja, por lo al producto final se le añadirá un cajead



para la colocación del suelo y que así la pieza de mármol sea de fabricación más sencilla y cómoda de instalar.

También se obtiene como resultado de las pruebas que la estructura puede soportar el peso de dos personas sin dificultades, los lastres y las patas dan una estabilidad suficiente. Esta estabilidad también se mantiene con la puerta abierta, este aspecto presentaba incertidumbre en un primer momento debido al peso de la puerta.

Los cambios en el diseño se tienen en cuenta de cara a la futura fabricación en serie del producto.



## 5 TRABAJOS FUTUROS Y EN PROCESO

### 5.1 Planteamiento de los moldes, modelos y utillaje para fabricación en serie

Debido a que la cabina será fabricada empleando un compuesto sándwich de material compuesto, fabricar los moldes empleando este mismo material es una opción óptima. Fabricando los moldes del mismo material que la pieza a fabricar se consigue menor grado de deformación debido a las tensiones generadas por los gradientes de temperatura al curar la pieza, ya que molde y pieza se deformarán y contraerán en el mismo grado.

Por otro lado, conociendo el volumen de fabricación planteado de cara a la producción en serie, supone un gasto asumible el diseño y fabricación de dichos moldes. El volumen de fabricación previsto es de un mínimo de 30 unidades anuales.

El diseño se está llevando a cabo teniendo en cuenta que el método que se empleará para la fabricación del producto será laminación manual con bolsa de vacío. El cambio en el método de fabricación respecto del empleado en el prototipo es debido a que empleando este método se conseguirán las piezas acabadas en un menor periodo de tiempo y con mejor acabado. Esto supondrá una gran reducción del coste en cuanto a material y tiempo se refiere

Se ha planteado el diseño del utillaje dividiendo la cabina por la mitad en dirección del plano vertical de simetría (Figura 21). Se fabricará siguiendo un proceso que consistirá en fabricar el laminado exterior en dos mitades y el laminado interior en 2 mitades. Una vez se tengan los 4 laminados, 2 interiores y otros 2 exteriores, se procederá a alinear, encajándolos y rellenándolos con espuma de poliuretano que hará la función de núcleo del panel sándwich. En el producto final se empleará este material para hacer la función de núcleo debido a que se puede emplear en estado líquido y al poco tiempo se expande,

rellenando así todos los espacios que quedan entre los dos laminados exteriores del panel sándwich.

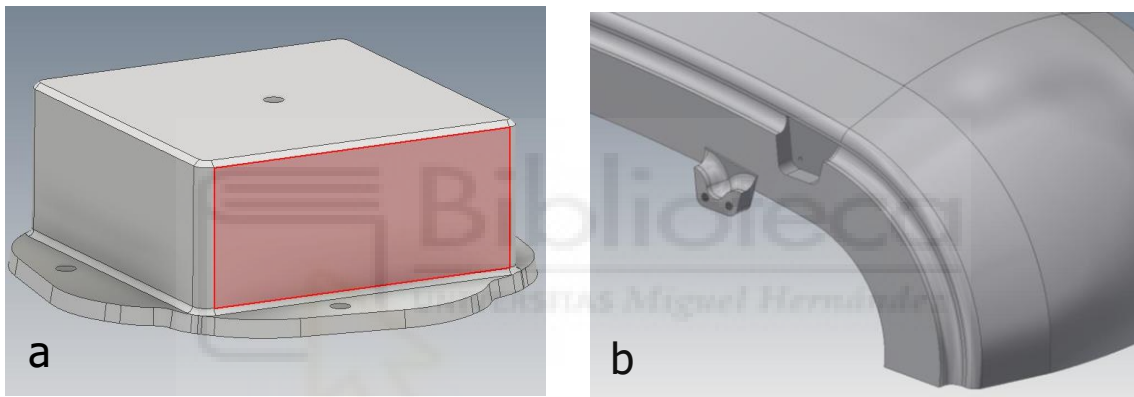


*Figura 21. División de la cabina por el plano vertical*

A la hora de fabricar los moldes necesarios para la fabricación en serie se partirá de modelos que serán fabricados empleando placas mecanizables de material epoxi, en concreto el modelo LAB 975 New del fabricante Sika. Estas placas serán apiladas y pegadas hasta conseguir el tamaño necesario. Una vez se tengan todas las placas necesarias apiladas, con la ayuda de una fresadora de 5 ejes, se tallará el modelo.

Para la fabricación mediante moldes será necesario fabricar modelos auxiliares así como diferentes postizos ya que los moldes a fabricar son complejos. Será necesario poder separar el modelo en piezas para conseguir un correcto desmoldeo sin causar daño alguno sobre los moldes. Los postizos son piezas que pueden ser colocadas sobre el molde para generar una forma determinada en la pieza final sin tener que variar el molde, un claro ejemplo es el de utilizar un postizo para generar el cajeadado que será empleado para introducir los ventiladores de la cabina, sin tener que hacer mecanizados sobre la pieza

después de haber sido fabricada (Figura 22.a). Este postizo en concreto también llevara la forma de la rejilla de ventilación para que cuando esta se coloque en la pieza final, quede al mismo nivel que la superficie que la rodea. También se emplearán postizos con el objetivo de poder fabricar cabinas con la apertura de la puerta desde el lado izquierdo o desde el lado derecho (Figura 22.b). Si no se emplearan postizos en este caso sería necesario más moldes, encareciendo la fabricación. Para detalles sin demasiada importancia, como las rejillas exteriores de ventilación es común emplear cinta de doble cara de diferentes espesores, que se colocaría sobre el molde y al fabricar la pieza y desmoldear, la pieza saldría con un rehundido del espesor que se desea.



*Figura 22. (a) Postizo para el cajado de ventiladores. (b) Postizo para conseguir moldes de puertas reversibles.*

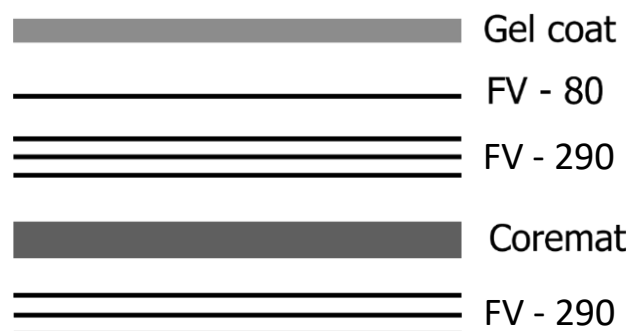
Para la fabricación de los moldes se empleará dos modelos para los laminados exteriores y dos modelos para el laminado interior. Los modelos están siendo diseñados a partir del diseño del prototipo del producto, el cual ha sufrido cambios como los ángulos entre superficies que eran paralelas. Para la correcta fabricación de los moldes ha sido necesario que dichas superficies formasen ángulos obtusos, es decir que existiese ángulo de desmoldeo.

Una vez se tienen los modelos que se emplearán para la elaboración de los moldes, se añade al diseño taladros que serán empleados para la correcta alineación de los diferentes modelos, moldes y piezas. Utilizando estos taladros

y pasadores de alineación se disminuirá el riesgo de errores a la hora de ensamblar las piezas en su lugar.

Los moldes serán fabricados mediante infusión a vacío, esta técnica será empleada debido a que se obtendrán moldes de elevada calidad superficial y copiará por completo la forma del modelo. También empleando esta técnica se conseguirán laminados con muy escasa porosidad, permitiendo así la posibilidad de fabricar piezas en futuro empleando vacío. Serán fabricados empleando 1 capa de *gel coat*, 1 capa de FV – 80, 6 capas de FV –290 y coremat, material que hará función de núcleo del laminado sándwich. El coremat es el material elegido para hacer la función de núcleo debido a que es un material ligero y que proporciona rigidez, además de ser económico.

El esquema de la construcción será el que se muestra en la Figura 23. El *gel coat* será el encargado de copiar el acabado superficial de los modelos y posteriormente dar el mismo acabado superficial a las piezas finales. Siguiendo este esquema se conseguirá un molde ligero pero resistente y con un correcto acabado superficial. La finalidad de emplear una capa de FV-80 es que tras varios procesos de fabricación la capa de *gel coat* se puede afinar y deteriorar, quedando a vista la textura de la fibra que se encuentra por debajo. Empleando un tejido de baja densidad se reduce la posibilidad de que la textura de este se quede reflejado en la pieza fabricada.



*Figura 23. Esquema del laminado de los moldes*

Una posibilidad que se contempla y que se emplea a menudo en la fabricación de moldes empleando materiales compuestos, consiste en complementar los

moldes hechos en estructura de panel sándwich con arena o áridos de diferente granulometría para conseguir una estructura maciza. Esto se debe a que se pretende conseguir que el molde tenga mayor vida útil manteniendo la precisión sin tener que llevar a cabo numerosas tareas de mantenimiento. La arena permite conseguir un molde más robusto y que presenta mayor dificultad a deformarse.

Una vez se tengan todos los moldes necesarios, se podrá comenzar con la fabricación de las piezas que formarán el producto final. Estas piezas, al igual que en el prototipo, estarán formadas por un laminado de 3 capas de diferentes tejidos y se empleará resina epoxi para hacer la función de matriz. Las piezas que formarán el laminado externo e interno estarán formadas siguiendo la misma secuencia que en el prototipo, 2 capas de FV – 290 y 1 capa de FC – 600 para el externo y 2 capas de FV – 290 y 1 capa de FL – 270 para el interno. Estos laminados serán fabricados siguiendo el proceso de método húmedo con bolsa de vacío.

Este método de fabricación proporciona piezas curadas y terminadas, es decir, no requieren de procesos posteriores de lijado y pulido. Realizando una comparación con el método empleado para la fabricación del prototipo es un gran avance en cuanto a tiempo y recursos se refiere, algo a tener en cuenta a la hora de fabricar cualquier producto.

El proceso que sigue a la fabricación de los laminados es su colocación alineada, colocando la pieza que forma el laminado interno en el interior de la pieza que forma el laminado externo. Estas piezas al ser colocadas de manera alineada mantendrán una separación entre ellas de 50 mm. Esta separación será rellenada con espuma de poliuretano. Este proceso será el que se seguirá para la elaboración de las dos mitades que formaran el producto final.

Por último, se procederá con el pegado de las dos mitades, uniéndolas por el plano vertical de simetría y consiguiendo la estructura final que forma el cuerpo de la cabina.

Una vez se ha fabricado el cuerpo de la cabina, las patas serán introducidas en su lugar y ajustadas. Las rejillas de ventilación serán atornilladas en los insertos roscados que se encuentran en el laminado. Se procederá a hacer la instalación eléctrica, colocando la luz central que se encuentra en el interior y conectando el LED de la puerta. Una vez conectado el LED, se colocará la junta de goma y por último la puerta será atornillada en los insertos que se encontrarán de la misma manera que los de las rejillas, en el interior del laminado.

Cabe mencionar que la explicación dada puede variar debido a que el proyecto se encuentra en desarrollo en la actualidad, por otro lado, las ideas explicadas son decisiones tomadas de la experiencia.



## 6 CONCLUSIONES

Las conclusiones que se extraen de la fabricación del prototipo de la cabina de trabajo empleando material compuesto y laminación manual son múltiples.

En base a los resultados obtenidos se puede observar que la técnica empleada en la fabricación es óptima para ello, como demuestra haber culminado la fabricación en los tiempos establecidos y utilizando los recursos necesarios. A pesar de haber terminado el prototipo en los plazos que se planteó, para un producto en serie no son realistas esos plazos por lo que la técnica a emplear deberá ser diferente. En concreto la técnica empleada para la fabricación del prototipo conlleva un largo proceso para obtener un acabado superficial óptimo, La alternativa planteada, laminación manual empleando moldes y bolsa de vacío, permitirá optimizar los tiempos de fabricación y reducir la cantidad de material a emplear.

Tras la fase de pruebas que experimenta el prototipo de la cabina de trabajo se detecta que el diseño ha de experimentar diversos cambios que mejorarán el producto de cara a su fabricación en serie. Estos cambios abarcan desde la funcionalidad y la comodidad para el usuario, como son la ventilación y el aumento del tamaño de la mesa, hasta la mejora en su fabricabilidad como son los ángulos entre superficies para posibilitar el desmoldeo. A su vez se corrobora que el laminado sándwich que forma la estructura es altamente resistente y suficiente para aguantar los esfuerzos a los que es sometida.

Al proyectar la mirada hacia el futuro, invito al posible lector de este trabajo a considerar posibles vías para la investigación en este gran campo de la ingeniería. Que obtenga sus propias conclusiones tras leer el trabajo y así poder comprender la oportunidad que brinda la fabricación empleando materiales compuestos. En la actualidad tenemos muchos puntos y vías de investigación donde, desde mi opinión, queda mucho por desarrollar como son: la optimización de las técnicas actuales de fabricación empleando material compuesto, desarrollo de resinas sostenibles así como la investigación en el reciclaje de material compuesto, e investigación de nuevas aplicaciones para implementar este material.



## 7 ANEXOS

### 7.1 HOJAS TÉCNICAS

#### 7.1.1 Tejidos empleados

- Fibra de carbono

##### Technical Data Sheet

25.10.2019

##### Carbon fabric 600 g/m<sup>2</sup> (twill weave 2/2)

Item no. 190245

Technical Data Fibre in warp and weft	Standard	Unit	Specified fibre	+/-	Tolerance %
Density	ISO 10119	g/cm <sup>3</sup>	1.79	+/-	1
Linear Density (lot mean value)	ISO 1889	tex	800	+/-	3
Filament diameter	DIN 53811	µm	7	+/-	0.5
Sizing (specified during qualification)	ISO 10548	%	1.3	+/-	7
Tensile strength (lot mean value)	ISO 10618	MPa	4700 min.		-
Tensile modulus (lot mean value)	ISO 10618	GPa	240	+/-	2

Technical Data Fabric	Standard	Unit	Target	+/-	Tolerance %
Weight	Ts En 12127	g/m <sup>2</sup>	600	+/-	5
Setting Warp	Ts 250 En 1049-2	thr./cm	3.65	+/-	5
Setting Weft	Ts 250 En 1049-2	thr./cm	3.65	+/-	5
Thickness (loomstate fabric) <sup>1</sup>	Ts 3426 ISO 4603	mm	0.6	+/-	10
Width	Ts 3427 ISO 5025	mm	as ordered	+/-	2.5

<sup>1</sup> approximate value, not for release

DNV·GL

Certificate No:  
**TAK00001SW**  
Revision No:  
**1**



EN ISO 9001  
20100193005157  
EN ISO 14001  
20104193005567  
ISO 45001  
20116193005568

DNV·GL

Certificate No:  
**TAK00001SV**  
Revision No:  
**1**

Figura 25. Hoja de técnica de tejido tipo sarga Fibra de carbono 600g/m<sup>2</sup>

- Fibra de vidrio



### Textile Reinforcement for High Performance Composite

HexForce® reinforcements are available in a range of weave styles – from woven fabrics to multiaxials and specialties that offers a range of globally certified aerospace / industrial products in carbon, glass and aramid and specialty fibers that we sell under the HexForce® trademark.

DESCRIPTION	March / 2016	
Type of yarns	Warp : [EC9 68] X 3 Weft : EC9 204	
Nominal weight	290 g/m <sup>2</sup>	8.55 oz/sqy <sup>2</sup>
Weave style	twill 2x2	
Width	1000 mm	39.4 in
Finish type	TF970	
Finish description	Silane	

### CHARACTERISTICS

Nominal construction	Warp : 7 yarn/cm Weft : 7.2 picks/cm	17.9 yarn/in 18.4 picks/in
Weight distribution	Warp : 50 % Weft : 50 %	
Thickness (*)	0.23 mm	0.009 in

\*NB : The above average values are obtained with epoxy laminate at 55% of fibres in volume.

### IMPORTANT

All information is believed to be accurate but is given without acceptance of liability. Users should make their own assessment of the suitability of any product for the purpose required. All sales are made subject to our standard terms of sales which include limitations on liability and other important terms.

© Copyright Hexcel



For European sales office telephone numbers and a full address list, please go to : <http://www.hexcel.com/contact/salesoffices>

*Figura 25. Hoja de técnica de tejido tipo sarga Fibra de vidrio 290g/m<sup>2</sup>*

## 7.1.2 Resina y gel coat

- Resina epoxy



### Key Features

- Easy to use
- Medium Viscosity Resin
- Outstanding Wetting Abilities
- Good Mechanical Properties
- Choice of Hardener Speed

### Product Description

EL2 is a high performance general purpose epoxy laminating resin for use in wet-lay or vacuum bagging carbon fibre, aramid or glass lamination.

This medium viscosity epoxy exhibits excellent wetting characteristics especially when used with carbon fibre and aramid fibre (such as Kevlar™) reinforcement making airbubbles in the laminate less likely than with some alternative epoxy systems.

The resin also exhibits excellent cured mechanical properties far in excess of many more traditional epoxy resin brands (as can be seen from the technical data sheets). Improved mechanical properties mean stronger, lighter, higher performance parts.

### Recommended Uses

Use as a general purpose laminating epoxy, wet-laying or vacuum bagging composites such as glass fibre, carbon fibre and aramid fibre (Kevlar).

When cured the epoxy exhibits good flexural strength making it well suited to the lamination of structural parts. The resin also exhibits very good clarity making it also suitable for use when laminating unpainted carbon fibre composites.

### Properties

The table below shows the typical uncured properties:

Property	Units	Resin	Hardener	Combined
Material	-	Epoxy Resin	Formulated Amine	Epoxy
Appearance	-	Clear Liquid	Amber Liquid	Clear Liquid
Viscosity @20 °C	mPa.s.	1200 – 1800	5 - 80	1000 – 1400
Density @20 °C	g/cm <sup>3</sup>	1.13 – 1.17	0.90 – 1.06	1.05 – 1.15

### How to Use

EL2 is a chemical product for professional use. It is essential to read and understand the safety and technical information before use.

Follow the guidelines for safe use outlined in the SDS which include the use of appropriate hand and eye protection during mixing and use.

### Mix Ratio

Mix Ratio 100:30 by Weight

EL2 Epoxy Laminating Resin should be mixed with AT30 FAST or AT30 SLOW

Hardener at a ratio of 100 parts of resin to 30 part of hardener, by weight. FAST and SLOW hardeners can be blended to achieve pot-life and demould times anywhere between those stated. However, you must still maintain the correct overall ratio of resin to hardener to ensure a proper cure.

When working with any epoxy resin, it is essential to mix the resin and hardener exactly at the correct mix ratio. Failure to do so will result in a poor or only partial cure of the resin, greatly reduced mechanical properties and possibly other adverse effects. Under no circumstances add 'extra hardener' in an attempt to speed up the cure time; epoxies do not work in this way.

### Mixing Instructions

EL2 is a highly reactive (fast curing) resin system. Only weigh out and mix as much resin as you can use within the pot life.

Weigh or measure the exact correct ratio of resin and hardener into a straight sided container. Using a suitable mixing stick begin to mix the resin and hardener together to combine them completely.

Spend at least one minute mixing the resin and hardener together, paying particular attention to the sides and base of the container. Remember: Any resin that has not been thoroughly combined with hardener will not cure.

Once you have finished mixing in one container, it is good practice to transfer the mixed resin into a second container and undertake further mixing of the resin using a new mixing stick. Doing so will eliminate the risk of accidentally using unmixed resin from the bottom or sides of the container.

### Pot-Life / Working Time / Cure Time

EL2 is a highly reactive resin system and once the resin has been mixed with the hardener, the reaction will start to give off heat (exotherm) which will further accelerate the cure of the resin, especially when the resin is in the mixing pot.

Transfer the resin from the mixing pot onto the part as soon as possible to extend the working time and avoid the risk of uncontrollable rapid cure in the mixing pot.

As with all epoxies, the pot-life/working time will vary significantly depending on the ambient temperature, the starting temperature of the resin and hardener and the amount of resin mixed.

EL2 can be used in ambient temperatures between 15°C (59°F) and 30°C (86°F). For best results, an ambient temperature of at least 20°C (68°F) is recommended. Ensure that both resin and hardener containers are within this temperature range before use.

The table below gives an indication of pot-life and cure properties:

	Pot-Life @ 25 °C	Gelation @ 25 °C	Demould Time @ 25 °C
AT30 SLOW*	95 - 115mins	8.5 - 10.5hrs	20 - 30hrs
AT30 FAST*	12 - 17mins	2 - 3hrs	4 - 6hrs

\*Fast and slow hardeners can be blended to achieve pot-life and demould times anywhere between those stated above.

Figura 26. Hoja técnica resina epoxy

- Gel coat



## Key Features

- Very clear and UV resistant
- Expels trapped air
- Fast curing
- Tough and hard wearing
- Excellent mechanical properties

## Product Description

XCR™ is an extreme performance, high clarity epoxy developed for demanding visual applications including carbon fibre skinning, board manufacture and wood finishing. XCR™ is intended for use where laminates will remain unpainted, showcasing reinforcements like carbon fibre or natural fibres, inlaid graphics or beautiful wood grains.

To ensure the perfect finish, XCR™ uses special technology to enhance fibre wet-out and expel trapped air. Its fast cure allows multiple layers to be built-up in minimum time, significantly speeding up 'skinning' processes requiring multiple coats.

XCR™ will cure to a hard, durable, UV resistant finish which can be flatted and polished to a high gloss or over-painted with a suitable clear coat/lacquer. The resin offers excellent cured mechanical properties making it suitable for use laminating or finishing sports/recreational equipment like skis, boards or boat decking.

XCR™'s distinctive 'purple' colour is due to the advanced UV protection agents used in the resin. Once mixed with its hardener this colour diminishes and when used as directed as a thin coating, the tint is barely detectable and in fact enhances the appearance of fibres (such as carbon fibre) and inlaid graphics. Once cured, XCR™ needs to be flatted using abrasive paper and then polished using a cutting/polishing compound to achieve a high gloss finish.

XCR™ is NOT intended as a coating resin for artwork. For particularly colour-sensitive projects requiring a self-levelling 'pour and leave' finish like this, specialist ArtResin® should be used.

## Recommended Uses

- Carbon fibre 'skinning'
- Wood coating / deck finishing
- Surfboard/sailcraft building
- R/C aircraft wing skinning
- Ski/snowboard finishing

## Process Specific Information

### Carbon Fibre Skinning

Overlaying carbon fibre or decorative reinforcements over existing parts like interior trim or even exterior vehicle panels is a skilled but much in-demand process. XCR™ addresses the long-standing challenges of air entrapment, clarity, UV stability and cure time between stages head-on with a unique combination of properties designed to deliver stunning, reliable results in the shortest possible time.

### Overlaminating with Other Materials

In the same way that XCR can be used to apply a glossy, hard wearing 'skin' of carbon fibre to any part, it can also be used to apply a durable, glossy layer of almost any fabric or material to a wide range of objects including furniture, interior trim or even music instruments. Materials including natural fibres (coconut mat, coffee sacks, flax), fabrics (denim, printed fabrics) and technical materials can all be used to create stunning, unique surfaces to a wide range of objects.

### Board Building and General Laminating

Not only does XCR™ provide a clear, vibrant finish to a range of reinforcements and substrates, it also has excellent mechanical properties comparable to most structural laminating epoxies and so can be used as a clear, UV stable laminating resin in conjunction with reinforcements like carbon fibre, glass fibre and natural reinforcements like flax and jute.

Its hard-wearing, fast curing properties make XCR™ ideal for a range of 'hot-coating' processes such as laminating EPS cores for surfboard manufacture. XCR™ is entirely solvent and styrene free and will not attack or affect EPS foam. Once fully cured, XCR™'s advanced mechanical properties offer excellent strength and damage tolerance.

The clarity and UV stability of the resin further enhance inlaid graphics or the natural appearance of the reinforcements used. When used in conjunction with appropriate grades of glass reinforcement, XCR™ can produce a laminate of excellent clarity.

### Coating Wood

XCR™ has outstanding properties when used to preserve, protect, strengthen and enhance wooden surfaces. When applied to wood surfaces such as boat decking, traditional skis and boards or furniture, XCR™ can be used to create a hard-wearing protective layer which can be flatted and polished to a deep, glossy finish.

### Hardener Crystallisation

The Hardener is sensitive to low temperatures and if the hardener gets cold (either in storage or transport), it can crystallise; this does not damage the hardener at all and can be reversed by warming the hardener in its container with the lid securely in place. The longer it has been crystallised, the longer it will take to reverse. This can be achieved by sitting it directly onto a radiator, putting it into an oven on a low setting or standing the container in hot water. We recommend mixing the resin at around 20C to prevent it crystallising while being mixed or used.

Figura 27. Hoja técnica gel coat

## 8 BIBLIOGRAFÍA

### 8.1 REFERENCIAS

1. <https://iberiacompositech.com/historia-y-evoluci%C3%B3n-de-los-materiales-compuestos>
2. <https://graffit-eyewear.com/una-breve-historia-sobre-la-fibra-de-carbono/>
3. Harik, R., y Wuest, T. Introduction to advanced manufacturing. SAE International. **2019**.
4. Yang, H., Yang, L., Yang, Z., Shan, Y., Gu, H., et al. Ultrasonic detection methods for mechanical characterization and damage diagnosis of advanced composite materials: A review. *Composite Structures*, *324*, 117554. **2023**.
5. Zarei, A., Pilla, S. Laser ultrasonics for nondestructive testing of composite materials and structures: A review. *Ultrasonics*, *136*, 107163. **2024**.
6. Campo, M., Lorero, I., Jiménez-Suárez, A., y Prolongo, S. Study of the recycling and reprocessing of composite materials and their subsequent use in the manufacture of sustainable composite materials. *Materiales Compuestos*, *08* (Núm. 1 - Caracterización - Sostenibilidad y Reciclaje), 22. **2023**.
7. Aguado Pesquera, A., Verdugo, F. Recovery of glass fiber present in wind turbine blades through mechanical recycling. *European Projects*, *6*, 37-45. **2022**.
8. Groover, M. P. Fundamentos de Manufactura Moderna. Materiales, procesos y sistemas. Prentice Hall. **2019**.
9. Frketic, J., Dickens, T., Ramakrishnan, S. Automated manufacturing and processing of fiber-reinforced polymer (FRP) composites: An additive review of contemporary and modern techniques for advanced materials manufacturing. *Additive Manufacturing*, *14*, 69-86. **2017**.
10. <https://www.bcomp.ch/solutions/motorsports-bodywork/>