



**Universidad
de La Laguna**

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

Grado en Ingeniería Mecánica

**DISEÑO DE INTERSECCIÓN TIPO K EN
FIBRA DE CARBONO PARA TUBOS**

TRABAJO FIN DE GRADO

Autor:

Jehoshua González Perdomo

Tutores:

D. Carmelo Militello Militello

D. José Antonio Valido García

La Laguna, julio de 2022

Agradecimientos:

A mi pareja Kelly, por ser mi mayor apoyo durante toda la carrera y estar a mi lado en los momentos buenos, pero sobre todo en los malos. Por siempre apoyarme incondicionalmente, por haberme ayudado tantísimo con este TFG, en definitiva, gracias por todo.

Y por último, a Pilar S., por ser tan maravillosa conmigo y por haberme acompañado durante el transcurso de este proyecto, porque gracias a ti, estoy más cerca del ingeniero y de la persona que quiero ser.

ABSTRACT

The following project shows the development of intersections with K-type geometry in carbon fibre for joining tubes, which could be used in tubular frames or structures. The ultimate goal will be the analysis of the solutions developed, studying the viability of the different manufacturing processes of the intersections and culminating the study with the test of these joints (until the break), showing the conclusions obtained from the experimental procedure.

In this case, joints have been developed using 3 different types of manufacturing processes, where 3D printing has been used for making molds and water-soluble cores. Likewise, carbon fibre has been processed using wet laminates with vacuum curing.

The main objective is to conclude whether this type of joints would be suitable to be used in tubular structures with carbon fibre tubes, being able to establish a reliable alternative to the traditional structures using aluminium/steel tubes joined by welding.

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

Grado en Ingeniería Mecánica

ÍNDICE GENERAL

TRABAJO FIN DE GRADO

DISEÑO DE INTERSECCIÓN TIPO K EN FIBRA DE
CARBONO PARA TUBOS

Autor:

Jehoshua González Perdomo

Tutores:

D. Carmelo Militello Militello

D. José Antonio Valido García

ÍNDICE GENERAL

Memoria	1
Anexos.....	99
Planos.....	118

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

Grado en Ingeniería Mecánica

MEMORIA

TRABAJO FIN DE GRADO

DISEÑO DE INTERSECCIÓN TIPO K EN FIBRA DE
CARBONO PARA TUBOS

Autor:

Jehoshua González Perdomo

Tutores:

D. Carmelo Militello Militello

D. José Antonio Valido García

ÍNDICE DE MEMORIA

1. Objeto	4
2. Alcance.....	5
3. Antecedentes	6
4. Normas y referencias.....	7
4.1 Internet	7
5. Materiales compuestos	8
5.1.1 Fibras de refuerzo.....	8
5.1.2 Matriz	12
5.1.3 Laminados	13
6. Requisitos de diseño.....	15
6.1 Requisitos dimensionales	15
6.2 Métodos de fabricación	16
6.2.1 Fabricación basada en un núcleo hidrosoluble.....	16
6.2.2 Fabricación basada en moldes negativos.....	17
6.2.3 Fabricación basada en moldes y con macho hidrosoluble.....	19
6.3 Materiales seleccionados.....	20
6.3.1 Material de laminado.....	20
6.3.2 Material para moldes	22
6.4 Método de laminación empleado	23
6.5 Propiedades mecánicas del laminado.....	27
6.6 Estudios previos	28
6.6.1 Estudio de resistencia al vacío.....	29
6.6.2 Estudio de la solubilidad en resina.....	31
6.6.3 Primera impresión de la unión.....	32
7. Análisis de soluciones	34
7.1 Introducción	34
7.2 Proceso de fabricación 1	34
7.2.1 Intento de laminado mediante patrones de tejido	34
7.2.2 Laminado mediante funda de carbono	36

7.3	Proceso de fabricación 2	42
7.4	Proceso de fabricación 3	48
7.5	Acabado de las uniones	51
8.	Análisis de resultados.....	54
8.1	Preparación de las uniones previo al ensayo	54
8.1.1	Preparación de los tubos.....	54
8.1.2	Pegado de los tubos	55
8.2	Ensayo experimental de las uniones.....	58
8.2.1	Dispositivo experimental.....	58
8.2.2	Ensayo 1: Comprobación de la resistencia de la unión respecto al tubo.....	60
8.2.3	Ensayo 2: Comprobación de la resistencia del tubo	69
8.2.4	Ensayo 3: Comprobación de la resistencia de la unión	71
8.3	Resultados computacionales	78
8.3.1	Modelado mediante superficies compuestas	78
8.3.2	Modelado mediante superficies delgadas cuasi-isotrópicas	81
8.3.3	Modelado mediante elemento sólido.....	83
8.3.4	Modelado mediante ensamblaje	87
9.	Conclusiones	91
9.1	Conclusiones de los métodos de fabricación.....	91
9.2	Conclusiones de los resultados.....	92
10.	Líneas futuras de trabajo.....	94

1. Objeto

La finalidad del presente Trabajo de Fin de Grado es el desarrollo de una intersección con geometría tipo K en fibra de carbono, con el objetivo de que pueda ser empleado como método de unión de tubos de este material, tal como se representa en la *Figura 1*.



Figura 1: Idea de la unión llevada a cabo

El objetivo principal es comprobar si este tipo de uniones pueden ser una opción válida para ser empleadas en estructuras tubulares, sustituyendo los tubos de materiales comunes (como el acero o aluminio) por tubos de fibra de carbono. Al no ser posible su soldadura, la intersección diseñada serviría como un nodo rígido de unión.

Así mismo, se pretende que el método de unir los tubos sea lo más sencillo posible, sin necesidad de hacer un preparado previo en los tubos, al contrario de lo que sucede cuando se hacen estructuras tubulares soldadas.

2. Alcance

El presente trabajo de basa en el diseño, desarrollo y ensayo de las uniones en fibra de carbono, abarcando las siguientes tareas:

- Diseñar la geometría de la unión, estableciendo las dimensiones geométricas finales esperadas según el tipo de tubo empleado.
- Estudiar los distintos métodos de fabricación posibles para la unión y su viabilidad.
- Diseñar los tipos de laminados de fibra de carbono para la construcción de la unión.
- Construir las uniones empleando los distintos métodos de fabricación seleccionados.
- Mecanizar y realizar tratamiento superficial de las uniones fabricadas.
- Ensayar las uniones a rotura para estudiar su resistencia y comparar los diferentes métodos de fabricación empleados.
- Simular computacionalmente las uniones mediante el software SolidWorks.

3. Antecedentes

Hoy en día existen diversas alternativas con el objetivo de unir tubos de fibra de carbono, independientemente del uso al que vaya a ir destinada la estructura, existiendo opciones comerciales tanto de uniones rígidas como articuladas.

En primer lugar, se encuentran uniones, en su mayoría metálicas (normalmente de aluminio), por lo que se trata de un nudo donde la interacción entre este y el tubo es distinta a la que pretende estudiar en este proyecto. Aun así, a día de hoy, son la opción de mayor fiabilidad y mayor uso para dicho propósito (véase *Figura 2*).

Cabe destacar que tienen un costo económico muy grande tanto su adquisición directa como su fabricación ya que es necesario el empleo de maquinaria muy específica como pueden ser soldadoras TIG para aluminio o máquinas de control numérico para el mecanizado de este.



Figura 2: Unión de aluminio 6061-T6
(Fuente: Rockwest Composites)

Por otro lado, aunque en menor medida, hay disponibles opciones comerciales de nudos hechos completamente en fibra de carbono, aunque con geometrías limitadas y sin opción a personalización, en su mayoría formando ángulos rectos, por lo que sus usos se ven limitados a determinadas estructuras donde no se precisen de ángulos específicos (*Figura 3* y *Figura 4*). Por ejemplo, en algunos chasis tubulares hay nudos donde convergen 4 o más tubos con ángulos dispares, por lo que, si se quiere emplear nudos de carbono, es necesaria una personalización acorde a la necesidad.



Figura 3: Nudo carbono 3 vías
(Fuente: Clip Carbono)



Figura 4: Nudo carbono 5 vías
(Fuente: Rockwest Composites)

4. Normas y referencias

- [1] Alemán Brito, A. (2020). *Diseño de sistema estructural y suspensión trasera de una motocicleta de competición*. La Laguna: Universidad de La Laguna.
- [2] Gay, D., Hoa, S. V., & Tsai, S. W. (2003). *Composite Materials: Design and Applications*. Florida: CRC Press LLC.
- [3] Gibson, R. F. (1994). *Principles of Composite Material Mechanics*. Detroit, Michigan: McGraw-Hill.
- [4] Mott, R. L. (2006). *Diseño de elementos de máquinas*. México: Pearson Educación.

4.1 Internet

Heddels (7 Weave Patterns to Know). [Fecha de consulta: 15 de junio de 2022]

Disponible en internet: <https://www.heddels.com/>

Fibermax. [Fecha de consulta: 15 de junio de 2022]

Disponible en internet: <https://www.fibermaxcomposites.com/>

Castro Composites. [Fecha de consulta: 15 de junio de 2022]

Disponible en internet: <https://www.castrocompositesshop.com/>

ClipCarbono. [Fecha de consulta: 15 de junio de 2022]

Disponible en internet: <https://www.clipcarbono.com/>

Easy Composites. [Fecha de consulta: 23 de junio de 2022]

Disponible en internet: <https://www.easycomposites.eu/>

Rockwest Composites. [Fecha de consulta: 23 de junio de 2022]

Disponible en internet: <http://rockwestcomposites.com/>

Entropy Resins. [Fecha de consulta: 9 de julio de 2022]

Disponible en internet: <https://entropyresins.com/>

Formlabs. [Fecha de consulta: 13 de julio de 2022]

Disponible en internet: <https://formlabs.com/>

Smart Materials 3D. [Fecha de consulta: 13 de julio de 2022]

Disponible en internet: <https://www.smartmaterials3d.com/>

5. Materiales compuestos

Generalmente, se habla de *composites* cuando se quiere hacer referencia a materiales compuestos. Los *composites* son materiales heterogéneos, formados por 2 o más constituyentes, por tanto, se podría incluir en este grupo de materiales el hormigón, el asfalto o la madera. Sin embargo, en el sector de la ingeniería se suele hacer referencia a los *composites avanzados*, los cuales son composites reforzados mediante fibras embebidas en una matriz solidificada.

A su vez, este tipo de materiales presentan anisotropía, es decir, las propiedades mecánicas del material serán distintas en función de la dirección del material que se esté estudiando. No obstante, suelen haber presentes ciertas simetrías en el material que provocan otro tipo de distribución de las propiedades mecánicas en el mismo.

Los *composites* suelen estar formados por una fibra de refuerzo, pudiendo ser continua o discontinua entre otros (véase Figura 5), rodeada de una matriz, mecánicamente más débil que la fibra y que hará la función de aglomerante ayudando a transmitir las cargas a los refuerzos. En cualquier caso, las propiedades de los constituyentes por separado son peores que las del *composite* final.

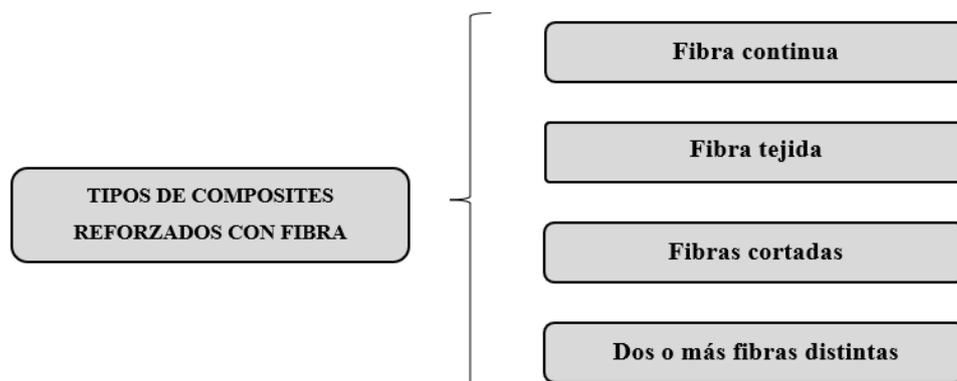


Figura 5: Tipos de composites reforzados con fibra

5.1.1 Fibras de refuerzo

Hoy en día existen multitud de tipos de fibras que son empleadas para el desarrollo de *composites*, cada una con unas características concretas en función del fin al que va a ir destinado. Se destacan las más usadas dentro del sector de la ingeniería:

- Fibra de carbono
- Fibra de vidrio (Los dos tipos más conocidos son S-Glass y E-Glass)
- Fibra de aramida (conocida por su marca registrada Kevlar)
- Fibra de boro
- Fibra de carburo de silicio

En la *Tabla 1* se muestra una comparación de propiedades mecánicas entre distintos tipos de fibra y dos de los metales más empleados en estructuras, como son el aluminio y el acero.

Material	Rest. tracción [MPa]	Módulo elástico [GPa]	Densidad [g/cm ³]
Aluminio 6061T6	310	69	2,71
Acero SAE 4340	1034	200	7,83
Fibra vidrio (E-Glass)	3448	72	2,54
Fibra vidrio (S-Glass)	4482	86	2,49
Fibra carbono (IM-7)	5413	276	1,77
Fibra carbono (T-300)	3654	231	1,77
Kevlar 29	3792	62	1,44
Kevlar 49	3792	131	1,47
Fibra de boro	3516	300	2,57
Fibra de carburo de silicio	3448	427	3,04

Tabla 1: Comparación de propiedades mecánicas de las distintas fibras [3]

En la *Tabla 2* se muestra una comparativa de alguna de las características que presentan las distintas fibras.

Fibra	Coste	Peso	Rigidez*	Rest. impacto*
E - Glass	Bajo	Alto	Flexible	Buena
S - Glass	Bajo/moderado	Alto	Flexible	Excelente
Carbono	Alto	Ligero	Rígido	Pobre
Aramida	Moderado	Moderado	Flexible	Excelente

*Tabla 2: Comparación simple entre los refuerzos más usados. *Propiedades en laminado [4]*

Mediante la agrupación de miles de filamentos (*Figura 6*) de los materiales mencionados previamente, se forman las fibras, las cuales a su vez forman distintos productos. Por ello, cuando se hace referencia a fibras con denominación 3K, 6K o 12K, se especifica el número de miles de filamentos que componen un hilo de fibra.



*Figura 6: Fibra de carbono (hilo) 3K
(Fuente: Easy Composites)*

Principalmente, estas fibras se tejen empleando maquinaria textil formando un tejido cuyas propiedades mecánicas corresponden a las de los filamentos. Se encuentran en multitud de configuraciones y tipos de tejidos.

Particularmente en la fibra de carbono, se pueden encontrar fibras tejidas unidireccionalmente (*Figura 7.a*) otorgando propiedades mecánicas en una sola dirección, sin embargo, lo más común es encontrar fibras tejidas bidireccionalmente, es decir, las fibras están dispuestas en un plano, pero con diferentes direcciones (*Figura 7.b*).

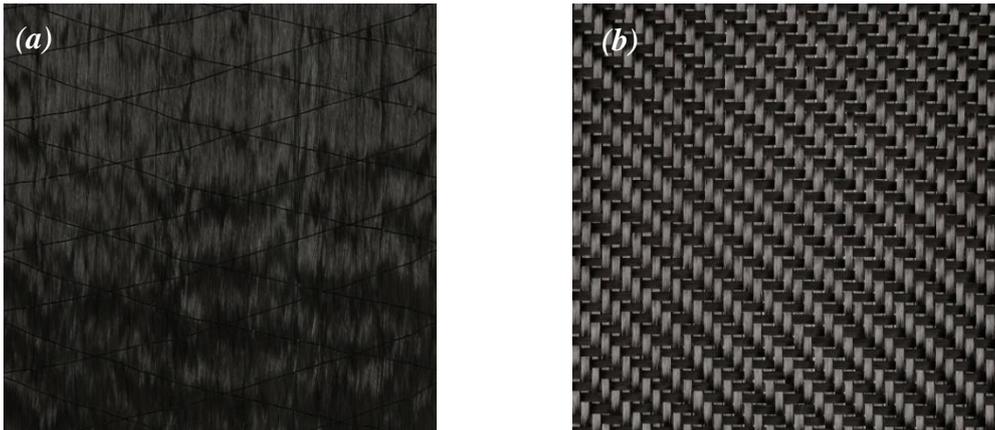


Figura 7: Tejido de carbono unidireccional (a) y bidireccional (b)
(Fuente: Easy Composites)

Existen diferentes tipos de ligamento, es decir, de formas en las que las fibras se pueden tejer para formar los tejidos. El tipo de ligamento influirá en el comportamiento del tejido a la hora de adaptarse a las superficies de moldes, así como a la facilidad de separarse la trama y la urdimbre (véase *Tabla 3*).

- **Ligamento tafetán** (*Plain weave*): La trama cruza los hilos de la urdimbre por encima del primero y por debajo del segundo sucesivamente (*Figura 8.a*).
- **Ligamento sarga** (*Twill weave*): Aunque existen variantes, la trama se entrecruza por encima de 2 hilos de la urdimbre y luego por debajo de otro dos, al contrario que el ligamento tafetán por donde solo se entrecruza con un hilo (*Figura 8.b*).

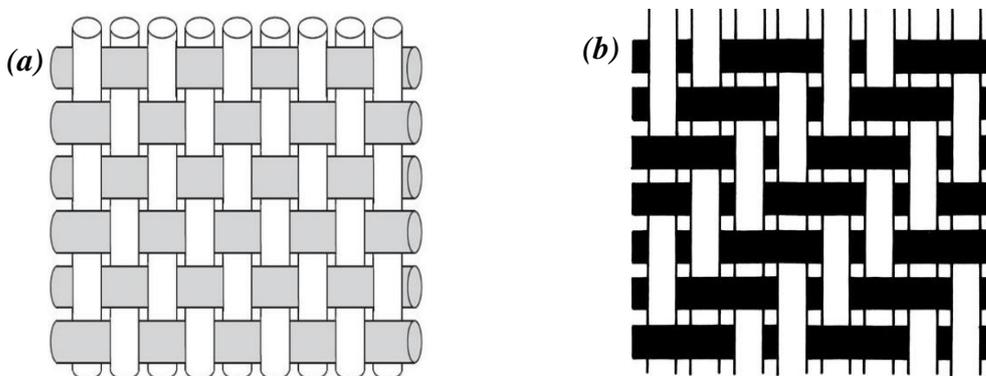


Figura 8: Tipos de ligamento. Tafetán (a) y sarga (b)
(Fuente: Pinterest)

- **Ligamento raso** (*Satin weave*): Con este tipo de ligamento, el tejido queda muy liso ya que la trama es muy fina mientras que la urdimbre es más gruesa y se encuentra oculta (*Figura 9.a*).
- **Ligamento canasta** (*Basket weave*): En este caso, el ligamento es idéntico al tafetán, sin embargo, en este caso se agrupan varias tramas y varias urdimbres de dos en dos (*Figura 9.b*).

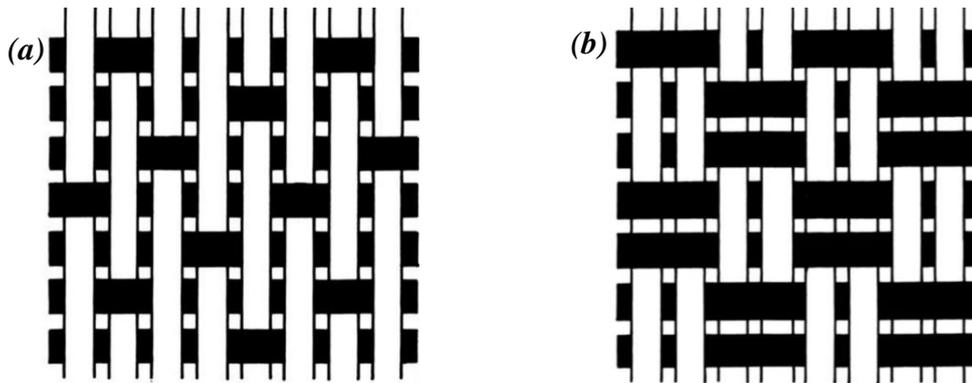


Figura 9: Tipos de ligamento. Raso (a) y canasta (b)
(Fuente: Pinterest)

Ligamento	Estabilidad del tejido	Facilidad de impregnación	Adaptación a superficies curvas
Tafetán	Excelente	Buena	Pobre
Sarga	Buena	Buena	Buena
Raso	Pobre	Pobre	Excelente
Canasta	Buena	Excelente	Pobre

Tabla 3: Comparación entre los distintos tipos de ligamento [4]

Por otro lado, existen otros productos derivados del carbono como pueden ser los refuerzos de fibra de carbono sin tejer, conocidas como *mat de carbono* (*Figura 10.a*), normalmente empleadas para la fabricación de moldes y piezas que no requieran de grandes prestaciones mecánicas o las fibras de carbono cortadas, para la fabricación de piezas comúnmente llamadas de “carbono forjado” (*Figura 10.b*).

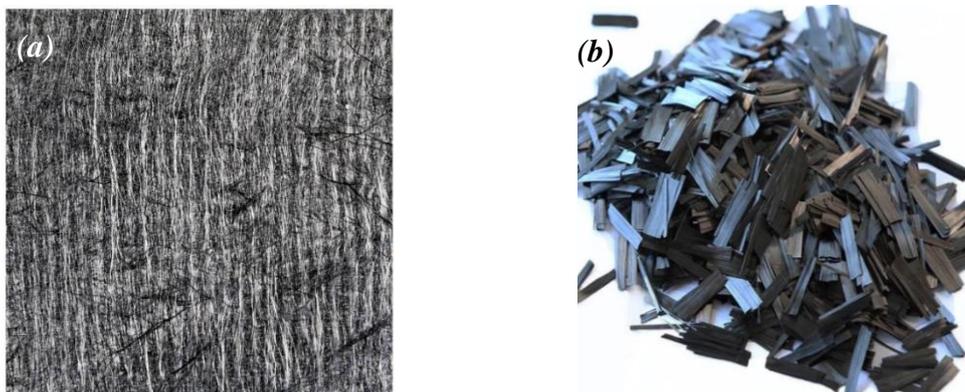


Figura 10: Fibra de carbono sin tejer (a) y fibra de carbono cortada (b)
(Fuente: Castro Composites)

5.1.2 Matriz

En los composites basados en fibra, se emplean matrices poliméricas, aunque también existen otros materiales con los cuales se emplean matrices metálicas (aleaciones de aluminio, titanio etc.) o matrices minerales/cerámicas.

Las matrices poliméricas más comunes son las resinas, tanto termoplásticas como termoestables, aunque en los composites reforzados con fibra, lo más común es el empleo de resinas termoestables, entre las cuales se destacan las más usadas:

- Resina epoxi
- Resina de poliéster
- Resina de viniléster

La elección de la resina dependerá de factores como el uso al que va a ir destinada (laminados, fines adhesivos, recubrimiento superficial etc.), la fibra de refuerzo seleccionada o la utilidad final del *composite*. Para buscar un buen rendimiento en el *composite*, es importante seleccionar la resina adecuada para la fibra de refuerzo que se quiere emplear, por ejemplo, la fibra de carbono es una fibra con buena resistencia, por lo que sería interesante emplear una resina que también tuviese buenas prestaciones como la resina epoxi, en cambio, si se usase una con bajas prestaciones como la resina de poliéster, no se estaría haciendo un uso eficiente de los constituyentes. Una comparativa de las propiedades mecánicas de resinas termoestables se muestra en la *Tabla 4*.

Resina	Densidad [kg/m ³]	Módulo elástico [MPa]	Módulo cortante [MPa]	Módulo de Poisson
Epoxi	1200	3000	1600	0,4
Fenólica	1300	4000	1100	0,4
Poliéster	1200	4000	1400	0,4
Policarbonato	1200	2400	-	0,35
Viniléster	1150	3300	-	-
Silicona	1100	2200	-	0,5

Tabla 4: Propiedades mecánicas de resinas termoestables comunes [2]

Las resinas termoestables se encuentran en estado líquido a temperatura ambiente y mediante la adición de un catalizador o endurecedor (dependerá de la resina), se genera una reacción química exotérmica irreversible por la cual se solidifica, gracias a que cada extremo de las moléculas de polímero se une con otros creando una gran y única molécula. A dicho proceso se le llama “curado” de la resina.

Cabe destacar que todas las resinas presentan degradación cuando se exponen a radiación ultravioleta, ya que esta rompe los enlaces químicos de las moléculas, viéndose

perjudicadas las propiedades mecánicas de la misma y por tanto las del composite. Por este motivo, es muy común hoy en día la comercialización de resinas con aditivos que las protegen frente a la radiación UV.

5.1.3 Laminados

La unidad estructural más básica de un *composite* es una lámina o capa, es decir, el conjunto de una sola capa de fibra unidireccional junto a la resina. Del estudio de esta lámina se pueden establecer relaciones tensión-deformación y obtener sus propiedades mecánicas mediante ensayos de cargas unidireccionales.

Se denomina laminado al conjunto de láminas, por tanto, en un laminado se emplean diversas capas de fibra junto a la resina, formando una pieza de determinada geometría y cuyas propiedades mecánicas dependerán de la orientación de las fibras seleccionada en las distintas capas respecto a un eje de referencia local.

- **Laminado ortotrópico:** Las fibras están dispuestas en 2 direcciones ortogonales principales, por lo tanto, hay 2 planos de simetría ortogonales en cada punto del material. Por ejemplo, un laminado del tipo $[90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ]$.
- **Laminado cuasi-isotrópico:** Las fibras se disponen de tal manera que las propiedades mecánicas del laminado en el plano podrían aproximarse casi a las de un material isotrópico. El más típico es el $[0^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ]_s^*$ (Figura 11).

*El símbolo 's' hace referencia a que el laminado es simétrico respecto a la línea media del laminado.

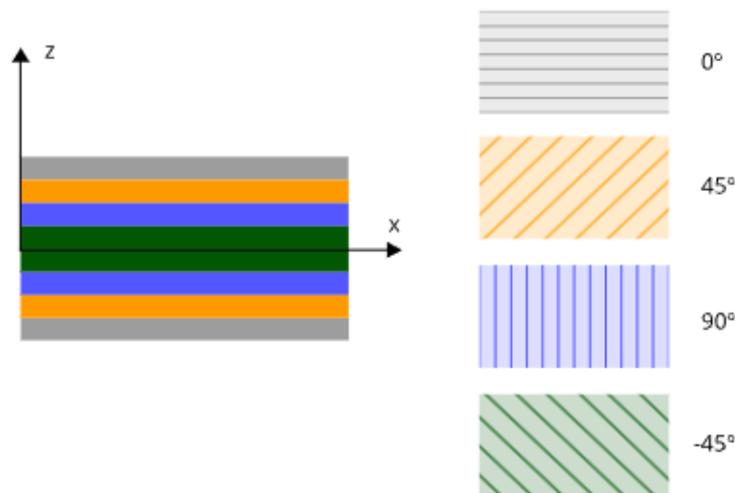


Figura 11: Esquema de orientación de capas. Laminado cuasi-isotrópico

Aparte de los dos elementos principales en un *composite* como son la fibra de refuerzo y la matriz, en algunos laminados se suelen emplear los llamados *core* o núcleos. Estos núcleos son, por lo general, de algún material liviano y su objetivo será aumentar el

espesor del laminado otorgando a este de mayor inercia y espesor, pero sin suponer un apoyo estructural al laminado.

Este tipo de estructura se le conoce por el nombre de estructura tipo sándwich y consiste en laminar el núcleo por ambos lados, tal como se ilustra en la *Figura 12*. Existen distintos tipos de núcleos, empleándose desde espumas de polímero como el poliestireno extruido hasta paneles *honeycomb* metálicos.

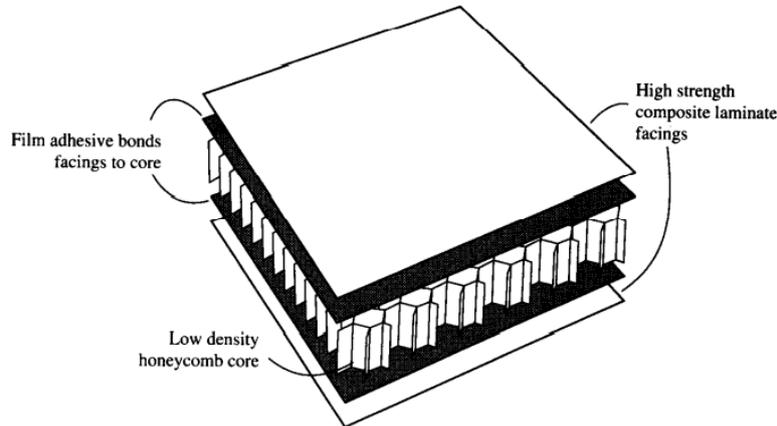


Figura 12: Estructura tipo sándwich
(Fuente: [2])

Orientación de las fibras en un laminado

La colocación de las fibras en un laminado cobra suma importancia en las etapas de diseño, sobre todo cuando se sabe previamente a que cargas (y en que direcciones) estará sometido el laminado. Como se ha mencionado, en un *composite*, el elemento que mejores propiedades mecánicas tiene y por tanto, es más resistente, es el refuerzo fibroso, mientras que la matriz es mucho más débil.

Es por ello que la dirección de las fibras debe ser tal que se encuentren en la medida de lo posible en la misma dirección de aplicación de las cargas. Por ejemplo, en un estado de carga unidireccional como es la tracción, lo adecuado sería colocar las fibras en dicha dirección, como se muestra en la *Figura 13*.

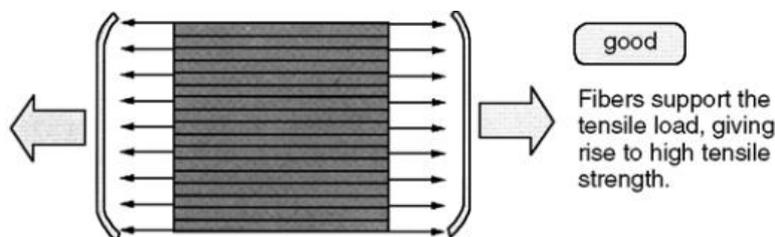


Figura 13: Colocación óptima de las fibras ante carga unidireccional
(Fuente: [2])

Sin embargo, hay *composites* sometidos a cargas en distintas direcciones, para los cuales, se podría plantear un laminado que fuese cuasi-isotrópico, ya que idealmente se considera que se tiene las mismas propiedades mecánicas en todas las direcciones del material.

6. Requisitos de diseño

6.1 Requisitos dimensionales

Para plantear un diseño inicial, es necesario establecer las dimensiones de la unión en base a los tubos de fibra de carbono que se pretenden unir.

En las estructuras tubulares se emplean un gran abanico de tubos de diferentes dimensiones en función del uso al que esta vaya destinada. En este caso, se selecciona un diámetro de tubo cuyas dimensiones permitan una sencilla fabricación de las uniones a la par que no sean necesarias grandes cantidades de material.

Finalmente, se opta por el uso de un tubo de fibra de carbono de 20 mm de diámetro exterior (*Figura 14*).

Características del tubo:

- **Material:** Fibra de carbono 3K
- **Tipo de tejido:** 2x2 Twill
- **Diámetro exterior:** 20 mm
- **Diámetro interior:** 18 mm
- **Espesor:** 1 mm



Figura 14: Tubo de carbono seleccionado

Entonces, el diámetro interior de la unión vendrá marcado por el diámetro exterior del tubo. Sin embargo, el espesor de la unión dependerá del tipo de laminado que se vaya a realizar, ya que principalmente, el espesor irá en función del número de capas de fibra que se vayan a emplear (además de otros factores como el método de fabricación).

En cuanto a las longitudes de los brazos de la unión, se han establecido de manera que haya suficiente longitud de contacto entre el tubo y el brazo. Dichas dimensiones se reflejan (sin contar con holguras) en la *Figura 15*.

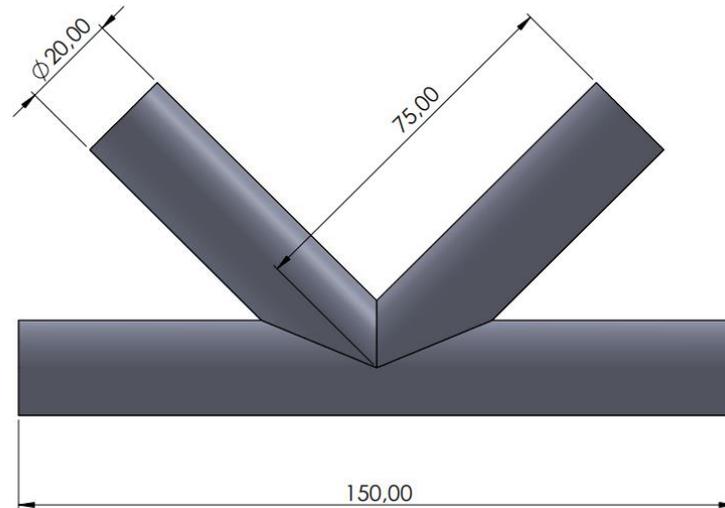


Figura 15: Longitudes de los brazos de la unión (Unidades en mm)

6.2 Métodos de fabricación

Inicialmente se plantean 3 métodos de fabricación para la unión, todos ellos permiten obtener la geometría especificada con anterioridad mediante los recursos que se disponen. Estos métodos que se plantean son ideas generales que se irán modificando y adaptando según se vayan obteniendo resultados experimentales durante la fabricación real de las probetas.

6.2.1 Fabricación basada en un núcleo hidrosoluble

Se basa en obtener mediante impresión 3D un núcleo hidrosoluble que servirá como molde, en el cual se laminará su superficie exterior.

En primer lugar, se desarrolla un modelo 3D que represente la geometría final esperada para la unión. Así mismo, en el modelo se ha de considerar una tolerancia suficiente para que los tubos puedan ser introducidos en la unión final. Una vez obtenido el modelo, se procederá a cubrir toda la superficie en fibra de carbono y posteriormente se disolverá el núcleo con agua obteniendo así una pieza hueca de fibra de carbono.

En la *Figura 16* se muestra el modelo que inicialmente se ha diseñado. Como se puede observar, se han añadido redondeos en algunas zonas para facilitar la deposición de las capas de fibra de carbono ya que la geometría representada en la *Figura 15* es muy compleja de replicar sin la adición de dichos redondeos, debido a que es necesario generar solapes para que el laminado mantenga continuidad de las fibras en toda la superficie de la unión.



Figura 16: Modelo 3D para impresión en material hidrosoluble

De igual manera, se ha establecido una holgura diametral inicial de 0,6 mm, considerando así posibles defectos superficiales al imprimir y para asegurarse de que haya espacio suficiente para que se deposite resina entre las paredes del tubo y la unión.

6.2.2 **Fabricación basada en moldes negativos**

Mediante este método se desarrollará un molde que represente geoméricamente la mitad de la unión que se pretende construir, por tanto, para fabricar una unión será necesario hacer el proceso de fabricación 2 veces.

En este caso, se desarrollará un molde negativo y una tapa (contramolde), entre los cuales se depositará la fibra de carbono. Para este método se considera generar unas cartelas en todo el contorno de la unión (Figura 17) para facilitar su pegado posterior a la par que se añade más resistencia a la unión.

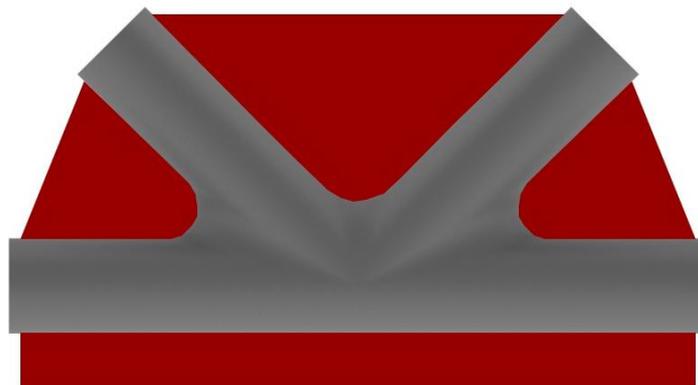


Figura 17: Cartelas que se dejarán en el contorno de la geometría (en rojo)

En la Figura 18 y la Figura 19 se muestra el molde y la tapa respectivamente. De igual manera, en la Figura 20 se representa el procedimiento.



Figura 18: Molde negativo



Figura 19: Tapa para el molde negativo

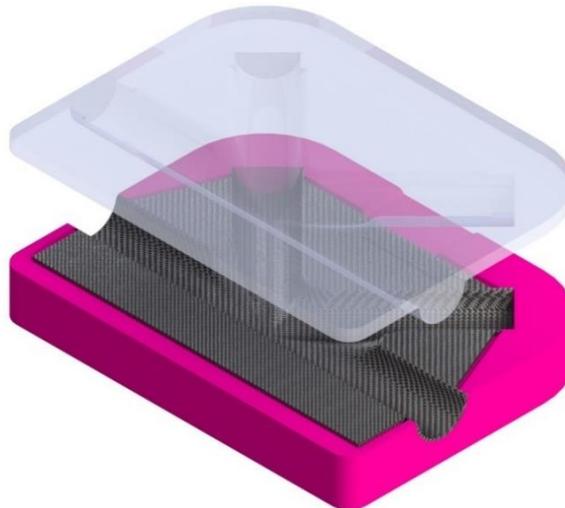


Figura 20: Representación del procedimiento de fabricación con molde negativo y tapa

Al igual que para el método anterior, se considera una holgura diametral inicial de 0,6 mm. Sin embargo, las dimensiones del molde deben ser tales que se considere en ellas el espesor total de la fibra de carbono que se va a laminar para que el diámetro interior final de la unión sea de aproximadamente 20 mm. Estas dimensiones están expuestas en los planos.

6.2.3 Fabricación basada en moldes y con macho hidrosoluble

En este último método de fabricación se hace una fusión entre los 2 métodos explicados previamente. Una de las principales desventajas que se presenta en el método de fabricación anterior es que se han de fabricar 2 mitades y luego pegarlas para obtener una unión.

Mediante este método se precisa emplear un molde y un contramolde exactamente iguales, añadiendo un núcleo hidrosoluble con forma K entre ambos haciendo la función de macho. En la *Figura 21* se muestra el molde empleado, pudiéndose observar que se han añadido dos resaltos en ambos brazos inclinados para poder centrar el núcleo correctamente dentro de los moldes.



Figura 21: Molde/contramolde para núcleo hidrosoluble

El procedimiento consistirá en laminar la fibra de carbono sobre el molde y contramolde de manera que, al encerrar ambas partes, la K sirva para rellenar el espacio que posteriormente quedará hueco. En este caso, el núcleo con forma de K ha de ser del diámetro interior de la unión (considerando nuevamente las holguras necesarias). En la *Figura 22* se observa una vista explosionada de los elementos que conforman el procedimiento.

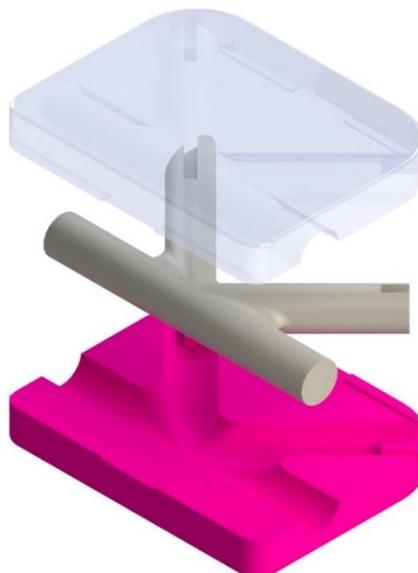


Figura 22: Vista explosionada de moldes y núcleo

En el esquema de la *Figura 23* se muestra una representación de la sección del procedimiento, indicando cada uno de los componentes que conforman el conjunto de los moldes, además del espacio ocupado por el laminado.

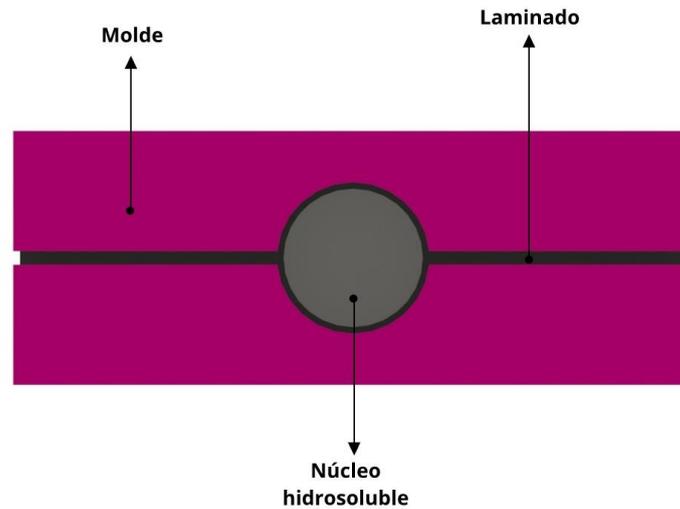


Figura 23: Esquema de sección del proceso de fabricación 3

6.3 Materiales seleccionados

Los materiales a emplear se dividen en 2 grupos principales: los que serán usados en el propio laminado de la unión y los que serán empleados en la construcción de los moldes impresos en 3D.

6.3.1 Material de laminado

Tal como se ha especificado con anterioridad, se pretende desarrollar las uniones empleando materiales compuesto, por lo que es necesario establecer el conjunto matriz-refuerzo. En este caso, el refuerzo que se ha seleccionado es la fibra de carbono mientras que la matriz será resina epoxi.

Se disponen de dos tipos de fibra de carbono, cada una de ellas con un propósito distinto dentro de los métodos de fabricación empleados.

➤ **Tejido de fibra de carbono**

- **Modelo:** C200T2 (Fibermax Composites LTD)
- **Densidad superficial:** 193 g/m²
- **Estilo de tejido:** 2x2 Twill
- **Tipo de hilo:** 3K (ambos, trama y urdimbre)
- **Espesor teórico (en laminado):** 0,19 mm

➤ **Funda tubular de carbono**

- **Diámetro:** 20 mm
- **Peso por unidad de longitud:** 12,5 g/m
- **Tipo de hilo:** 3K (ambos, trama y urdimbre)

Adicionalmente, en la *Tabla 5* se exponen las características mecánicas de la fibra, en este caso, se muestran las propiedades del modelo PYROFIL TR30S 3K del fabricante Grafil INC, las cuales conforman el tejido de carbono sarga seleccionado (*Figura 24*). Por otro lado, en la *Figura 25* se muestra la funda tubular de carbono.

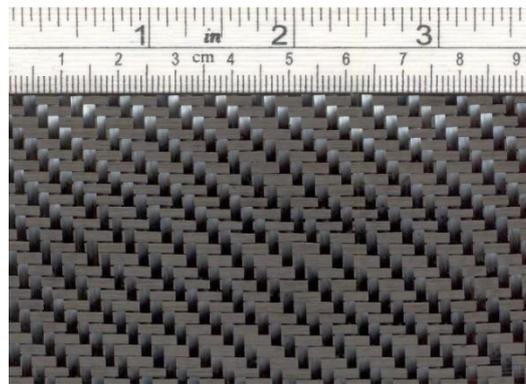


Figura 24: Tejido de fibra de carbono seleccionado (Fuente: Fibermax)

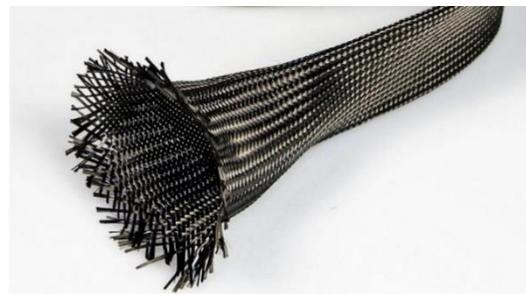


Figura 25: Manga tubular de carbono (Fuente: Castrocomposites)

Propiedad	Valor
Tensión de rotura a tracción [MPa]	441,0
Módulo elástico [GPa]	235,0
Elongación máxima [%]	1,9
Densidad [g/cm ³]	1,8

Tabla 5: Propiedades mecánicas fibra TR30S 3K (Fuente: Ficha técnica – Grafil INC)

Por otro lado, se ha seleccionado un conjunto resina-endurecedor del fabricante *Entropy Resins*. En este caso, se trata de una resina epoxi de la categoría CLR, apropiada tanto para el laminado de composites como para ser usada como adhesivo y permite un curado a temperatura ambiental (*Figura 26*).

A su vez, un endurecedor del tipo CLF, cuyas siglas indican que se trata de un curado rápido de la resina (Figura 27). La ratio de mezcla de ambos componentes es de una proporción 2:1 en volumen o de 100:45 en peso.



Figura 26: Resina epoxi CLR



Figura 27: Endurecedor CLF

Las especificaciones técnicas están recogidas en la Tabla 6.

Propiedad	Valor
Módulo elástico [GPa]	3,0
Tensión de rotura a tracción [MPa]	65,5
Elongación [%]	5%
Módulo de flexión [GPa]	3,0
Tensión de rotura a flexión [MPa]	93,1
Tensión de rotura a compresión [MPa]	78,1

Tabla 6: Propiedades mecánicas de la resina epoxi CLR (Fuente: Entropy Resins)

Según indica el fabricante, el tiempo total de curado recomendado es de 7 días a una temperatura ambiental aproximada de 25°C, sin embargo, serán suficientes 8 horas para que la resina se haya endurecido completamente.

6.3.2 Material para moldes

En general, se emplearán 2 tipos de filamentos, cuyo uso dependerá del método de fabricación y del fin al que vaya destinado el molde.

Para el desarrollo de los moldes negativos se opta por filamento PLA (Figura 28), ya que es de fácil impresión, se encuentra disponible en el comercio local a un bajo costo y se tiene gran disponibilidad de este. Se descartan materiales como ABS o PETG debido a que las propiedades mecánicas del PLA son suficientes para el uso al que está destinado y por lo general es un material más económico.



Figura 28: Filamento PLA
(Fuente: smartmaterials3d.com)

Para los núcleos (o machos) se hará uso de filamento hidrosoluble, en este caso, se hará uso tanto de alcohol polivinílico (PVA) como *Innovatefil Hydrosoluble* (Figura 29), los cuales serán empleados indistintamente según disponibilidad en el momento de ser requeridos. La diferencia entre ambos es que en general, con el PVA se obtienen peores acabados debido a que es un material complejo de imprimir debido a su fluidez y presenta una solubilidad peor. Las propiedades relacionadas con los parámetros de impresión de los filamentos mencionados con anterioridad se recogen en la *Tabla 7*.



Figura 29: Filamento Innovatefil Hydrosoluble
(Fuente: smartmaterials3d.com)

Propiedades	PLA	PVA	Hydrosoluble
Densidad [g/cm ³]	1,24	1,23	1,13
Temperatura de impresión [°C]	200 – 240	190 - 210	190 - 220
Temperatura de la cama [°C]	0 - 60	25 - 60	80 – 100
Velocidad de impresión [mm/s]	-	30 - 45	40 - 60

Tabla 7: Propiedades de los filamentos empleados (Fuente: Fichas técnicas – SmartMaterials3D. Anexo C)

6.4 Método de laminación empleado

Todos los laminados se realizarán mediante un método húmedo, es decir, se deposita el material de refuerzo seco (en este caso la fibra de carbono) sobre un molde cuya forma adoptará el *composite* y posteriormente, se impregna con la resina mediante el uso de una brocha o rodillo.

Generalmente, el procedimiento consiste en aplicar una capa de fibra y una de resina y así sucesivamente hasta completar el laminado, tal como se muestra en la *Figura 30* a modo de ejemplo.

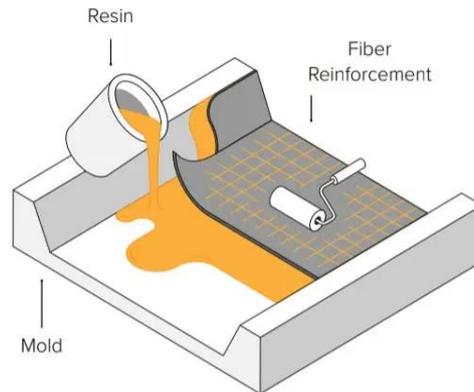


Figura 30: Método de laminado húmedo
(Fuente: Formlabs)

Existen muchas maneras de someter a la mezcla de fibra y resina a presión suficiente para formar el laminado cuando esta última se haya curado, es decir, existen muchos tipos de procedimientos por los cuales se pueden fabricar *composites*, entre los cuales se destacan:

- **Moldeo por contacto:** Se deposita la fibra sobre el molde y se procede a extender mediante un rodillo la resina a la vez que se van comprimiendo las capas de fibra.
- **Moldeo por compresión:** Se emplea un molde donde se deposita el conjunto de fibra y resina, pero esta vez se usará un contramolde que encierra el laminado. Se empleará una carga externa para ejercer una presión uniformemente en todo el laminado.

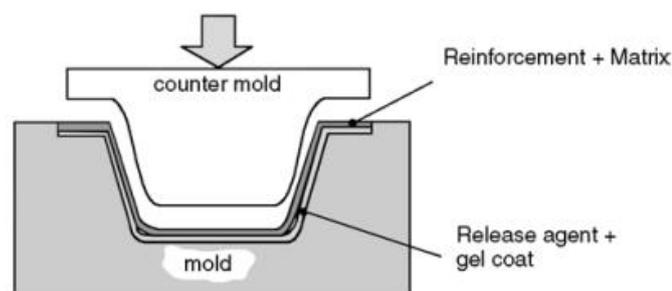


Figura 31: Moldeo de composites por compresión.
(Fuente: [2])

- **Moldeo por inyección de resina:** Se emplea molde y contramolde, los cuales encierran el material de refuerzo seco. La resina en este caso es inyectada posteriormente. Se trata de un moldeo a baja presión ya que es necesario permitir que la fibra se impregne.
- **Moldeo a presión mediante autoclave:** Este método es empleado en piezas que requieren muy buenos acabados superficiales o para composites que serán usado

en aplicaciones donde se requieran excelentes propiedades mecánicas. Tiene la particularidad de que la presión se ejerce con el uso de una autoclave, la cual permite someter al laminado a presiones elevadas y a temperaturas de curado procediendo así a la polimerización de la resina. En este método de fabricación es necesario el uso de fibras pre-impregnadas y someterlas previamente a vacío antes de introducirlas en la autoclave. Este tipo de fibras, también llamadas como *prepeg* necesitan temperatura para que se active la reacción química necesaria para curar la resina.

- **Moldeo mediante vacío:** Al igual que en los casos anteriores, se depositan las fibras impregnadas sobre un molde, pero con la particularidad de que se someterá a vacío el laminado para su curación, por tanto, en este procedimiento es posible aplicar una carga de idealmente 1 atm a toda la superficie.

Para el presente proyecto se ha seleccionado el moldeo mediante vacío por los motivos que se señalan a continuación:

- Se dispone actualmente de una bomba de vacío para poder realizar los laminados.
- En el comercio local hay disponibilidad de todos los consumibles y materiales necesarios para llevar a cabo el procedimiento de fabricación.
- Para alguno de los métodos de fabricación de las uniones propuestos no es posible el empleo de otro tipo de procedimiento que no sea el vacío por su flexibilidad a la hora de adaptarse a superficies complejas.
- Se descartan el método por contacto ya que para este proyecto es necesario aplicar bastante presión en el laminado debido a su geometría.
- Se descarta el método por inyección de resina, así como la autoclave porque no se cuenta con la infraestructura y maquinaria necesaria para llevarlos a cabo.

Aparte de la maquinaria necesaria como es la bomba de vacío (*Figura 32*), el procedimiento requiere del uso de una serie de consumibles que se mencionarán a continuación. Así mismo, en la *Figura 33* se muestra un esquema de la disposición de dichos consumibles.

- **Peel Ply:** Este tejido se coloca encima de la fibra ya impregnada y su uso es opcional, ya que su finalidad al despegarlo de la superficie del laminado es romper la última capa de resina, añadiendo más rugosidad superficial y es útil cuando se pretende volver a laminar encima o cuando se va a realizar ciertos acabados superficiales.

- **Film perforado:** Como su nombre indica, es una capa perforada que es colocada encima del composite o del Peel ply (según el caso) y permite la extracción de la resina sobrante cuando se genere el vacío.
- **Manta de absorción:** Es la última capa, colocada encima del film perforado y absorbe toda la resina sobrante.
- **Bolsa de vacío:** Como su nombre indica, es una bolsa especial en la que se introducirá el laminado para su aplicación del vacío.
- **Masilla sellante:** Esta masilla permite el sellado de la bolsa de vacío para permitir que su interior sea completamente hermético.



Figura 32: Bomba de vacío empleada en el proyecto

Las fichas técnicas de todos los consumibles empleados en el presente proyecto se encuentran en el Anexo C.

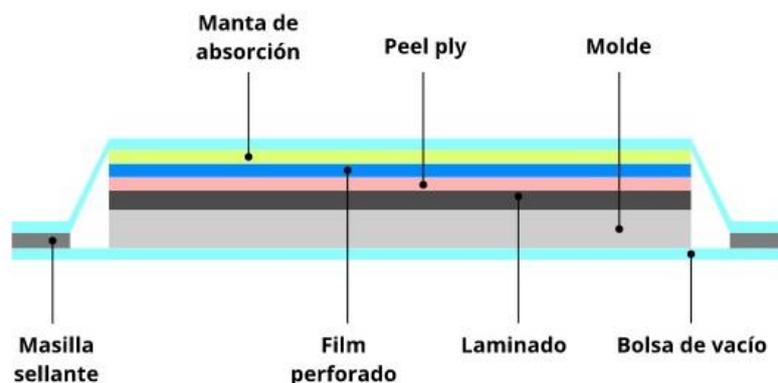


Figura 33: Esquema de consumibles en método a vacío

En el segundo y tercer proceso de fabricación, se realiza también una especie de moldeo por compresión, con la particularidad de que la presión que se ejerce sobre el molde y contramolde será mediante vacío, por lo que se sigue considerando un moldeo mediante vacío. Esta decisión es tomada debido a que es una manera sencilla de poder aplicar suficiente presión sobre los moldes.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (ec. 1)$$

Siendo el área del molde de 16644,69 mm² y considerando un vacío ideal donde se consiga extraer 1 atm (0,1013 MPa), se aplica al ecuación *ec.1* para obtener la fuerza sobre los moldes.

Se obtiene una carga de **1686,11 N** (171,88 kg). Aplicar dicha carga mediante otro método que no sea el vacío podría resultar difícil. Otra ventaja que presenta el método es que es posible realizar varias piezas de manera simultánea, ya que mediante el empleo de varios moldes por separado es posible hacer varios laminados a la vez, utilizando una única bolsa.

6.5 Propiedades mecánicas del laminado

Es necesario conocer cuáles son las propiedades mecánicas del laminado, es decir, las características finales que tendrá el *composite* ya realizado y que difieren de las propiedades de los constituyentes por separado.

Tal como se explica en el *Anexo A* es posible determinar las propiedades mecánicas de una lámina a partir de las propiedades mecánicas de los constituyentes seleccionados y mediante la realización de ensayos de laboratorio, en los cuales se pueden obtener propiedades como tensiones últimas de rotura o módulos elásticos. Las propiedades de los constituyentes seleccionados se mostraron con anterioridad en la *Tabla 5* (fibra de carbono) y en la *Tabla 6* (resina).

Lo ideal sería realizar un ensayo experimental de probetas realizadas idénticamente a las uniones que se diseñan en este proyecto, es decir, probetas fabricadas con los mismos materiales y mismo número de capas, así como el mismo método de fabricación. De los distintos ensayos se pueden obtener las propiedades que se exponen en la Figura 34. En cualquier caso, este procedimiento se encuentra fuera del alcance del proyecto por lo que se emplearán unas propiedades del laminado extraídas de la base de datos del software eLamX² tal como se explica en la referencia [1], las cuales se exponen en la *Tabla 8*.

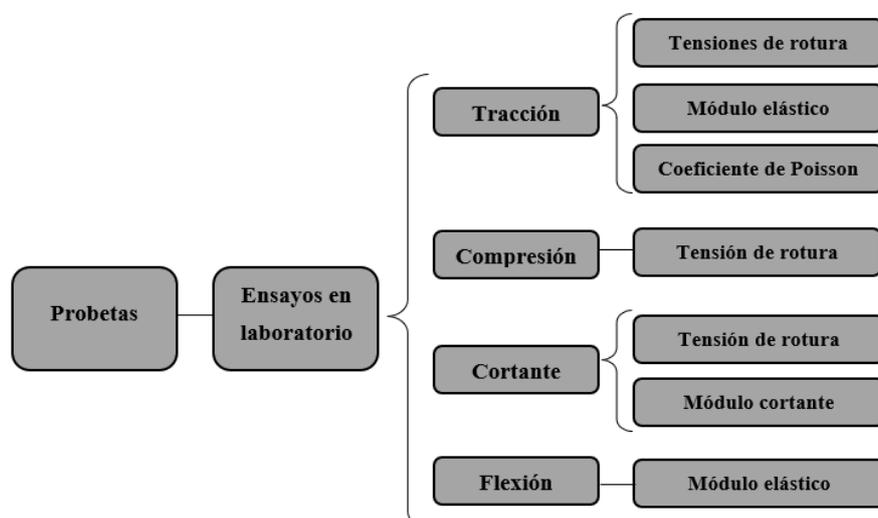


Figura 34: Ensayos para la obtención de propiedades mecánicas del laminado

Debido a la fibra de carbono seleccionada, los laminados serán ortotrópicos por la manera en la que están tejidas las fibras, por tanto, existen 2 direcciones principales en el material, en adelante nombradas por '1' (dirección longitudinal) y '2' (dirección transversal) y en las cuales se tendrán propiedades mecánicas distintas.

Propiedad	Símbolo	Valor
Fracción en volumen de fibra*	v_f	0,6
Módulo elástico en dirección 1	E_1	125 GPa
Módulo elástico en dirección 2	E_2	8 GPa
Módulo cortante en el plano 12	G_{12}	5 GPa
Módulo de Poisson en el plano 12	ν_{12}	0,3
Resistencia a tracción dirección 1	$S_{UT1,T}$	1450 MPa
Resistencia a compresión dirección 1	$S_{UT1,C}$	1400 MPa
Resistencia a tracción dirección 2	$S_{UT2,T}$	55 MPa
Resistencia a compresión dirección 2	$S_{UT2,C}$	170 MPa
Resistencia a cortante en el plano 12	τ_{UT12}	90 MPa
Densidad	ρ	1580 kg/m ³

Tabla 8: Propiedades del laminado [1]

*Este parámetro representa la fracción parcial en volumen de la fibra en el composite, cuyas expresiones se encuentran en el Anexo A. Generalmente, en el método de fabricación a vacío se obtienen porcentajes entre el 50 y el 80 % (Tabla 9).

Proceso de moldeo	Fracción en volumen de la fibra
Moldeo por contacto	30 %
Moldeo por compresión	40 %
Moldeo mediante vacío	50-80 %

Tabla 9: Fracciones en volumen de fibra típicas según proceso de fabricación [2]

6.6 Estudios previos

Inicialmente se desconoce si una impresión totalmente de material hidrosoluble es capaz de soportar el método de laminación que se emplea en el desarrollo de las uniones. En consecuencia, se realizan dos estudios iniciales para comprobar la viabilidad de emplear este tipo de materiales.

Es de suma importancia hacer estas comprobaciones puesto que, si el material no resiste la presión de vacío o presenta solubilidad frente a la resina epoxi, se deberá descartar su uso en cualquiera de las propuestas iniciales de diseño.

6.6.1 Estudio de resistencia al vacío

Debido al método de fabricación empleado, es necesario comprobar si el material de impresión (PVA) soportará la presión del vacío. Por tanto, se someterán a vacío probetas con distintos porcentajes y patrones de relleno. Los 3 tipos de relleno empleados son el rectilíneo, *honeycomb* y un relleno hueco de distintos espesores (*Figura 35* y *Figura 36*), cuya información está recogida en la *Tabla 10*.

Las probetas a estudiar son cilíndricas de 50 mm de altura y 20 mm de diámetro. Por otro lado, interesa optimizar tanto el material como el tiempo de impresión, por lo que paralelamente se quiere saber cuál es la configuración de impresión óptima, en la que menos material se emplea y más rápida es la impresión. Todas las probetas se han impreso bajo las mismas condiciones de impresión (véase *Tabla 11*) y usando la misma impresora 3D.

Probeta	Patrón	Porcentaje relleno [%]	Tiempo [h]	Peso [g]
P1	Rectilíneo	20	1,04	7,57
P2	Rectilíneo	40	1,05	10,76
P3	Rectilíneo	60	1,06	13,81
P4	Rectilíneo	80	1,07	16,65
P5	Honeycomb	20	1,04	7,55
P6	Honeycomb	40	1,07	10,32
P7	Honeycomb	60	1,13	13,04
P8	Honeycomb	80	1,25	15,53
P9	Rectilíneo	100 (1 mm espesor)	1,03	3,60
P10	Rectilíneo	100 (1,5 mm espesor)	1,05	5,89
P11	Rectilíneo	100 (2 mm espesor)	1,03	6,79
P12	Rectilíneo	100 (3 mm espesor)	1,08	10,41

Tabla 10: Información de probetas sometidas a vacío

Nota: Las probetas P9-P12 son cilíndricas huecas con un determinado espesor, por tanto, su relleno será del 100% ya que se pretende que el espesor de la pared sea macizo. El patrón de relleno usado es rectilíneo.

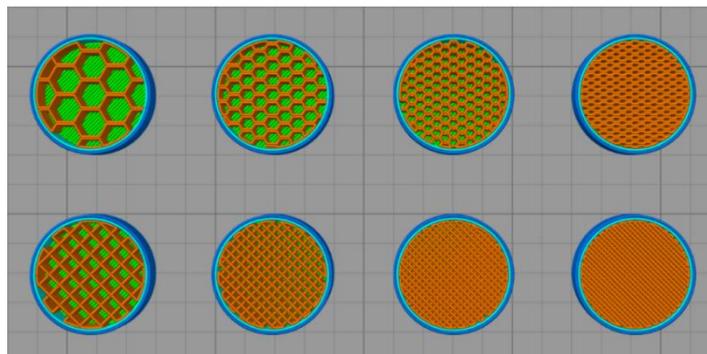


Figura 35: Patrones de relleno P1 a P8

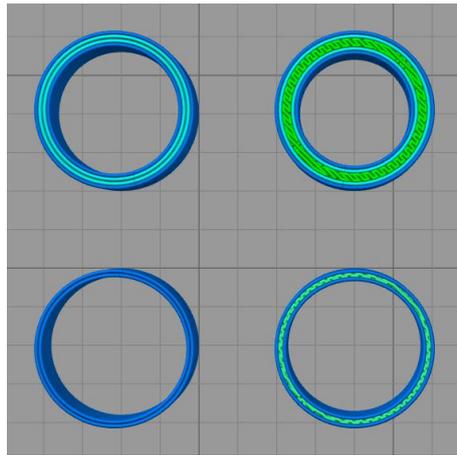


Figura 36: Patrones de relleno P9 a P12

Altura de capa [mm]	0,2
Capa sólida inferior y superior [mm]	3,0
Capa perimetral [mm]	2,0
Temperatura del extrusor [°C]	210
Temperatura de la cama caliente [°C]	50
Velocidad de impresión [mm/s]	60

Tabla 11: Parámetros de impresión empleados

El procedimiento experimental empieza con la preparación de la bolsa de vacío donde se introducen todas las probetas. Con el uso de una bomba de vacío, se extrae todo el aire sometiendo a las probetas a presión. En la *Figura 37* se muestran las probetas enumeradas mientras estaban sometidas a vacío.



Figura 37: Probetas sometidas a vacío

Después de un total de 30 minutos, se observa como ninguna de las probetas ha sufrido deformación. A continuación, se realiza una comprobación manual donde se presionan las probetas para ver si alguna de ellas se deforma, obteniéndose un resultado negativo, ya que todas las probetas han mantenido la geometría inicial.

Según los tipos de probetas mostrados con anterioridad, lo óptimo sería emplear la configuración de la probeta P9, ya que es la que menos material usa y más rápido se imprime. Sin embargo, se selecciona inicialmente una configuración como la de la probeta P10 para tener mayor margen de seguridad.

6.6.2 **Estudio de la solubilidad en resina**

Otro inconveniente que podría surgir durante el laminado de la unión es que, al emplear un material hidrosoluble, éste presentase solubilidad al contacto con la resina. Experimentalmente se tratará de comprobar su solubilidad en presencia de la resina epoxi que se ha seleccionado.

Se prepara una mezcla de resina y endurecedor. Se hará uso de una probeta con las mismas dimensiones que en el experimento anterior, previamente encerada para evitar la adhesión de la probeta a la resina, usando el desmoldeante mostrado en la *Figura 38*. Por último, se introduce la probeta en la mezcla y se mantiene en ella durante un tiempo de curado de 8 horas.

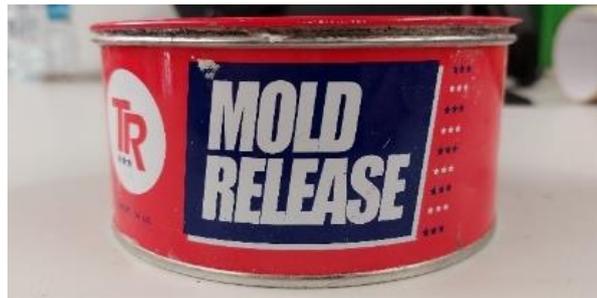


Figura 38: Cera desmoldeante

En la *Figura 39*, se observa que, pasado el tiempo de curación, la probeta ha mantenido su forma intacta y se concluye que no presenta solubilidad frente a la resina epoxi.

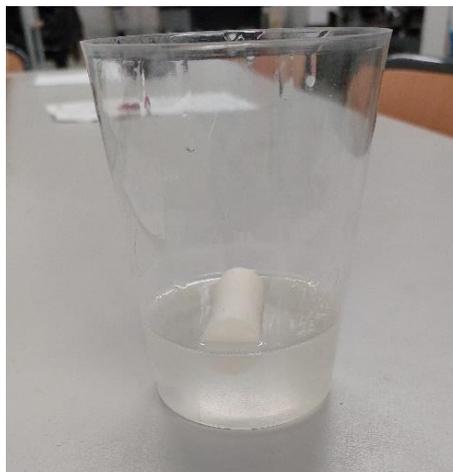


Figura 39: Probeta de PVA en resina epoxi

6.6.3 Primera impresión de la unión

Acorde a los métodos de fabricación explicados con anterioridad, es necesario imprimir la geometría de la unión completamente en material hidrosoluble. Generalmente, este tipo de filamentos es empleado únicamente como soportes en impresiones de otro tipo de material, para luego disolverlos con agua. Sin embargo, se desconoce el comportamiento de este material cuando se imprime una pieza completa.

Se procede a una primera impresión 3D con PVA empleando los mismos parámetros y configuración seleccionadas en el primer experimento.

El resultado es que se obtiene un mal acabado superficial, ya que en algunas zonas donde la inclinación es de 45° , la capa perimetral se desprende, generando deformación de la geometría y un acabado rugoso e imperfecto (*Figura 40*).

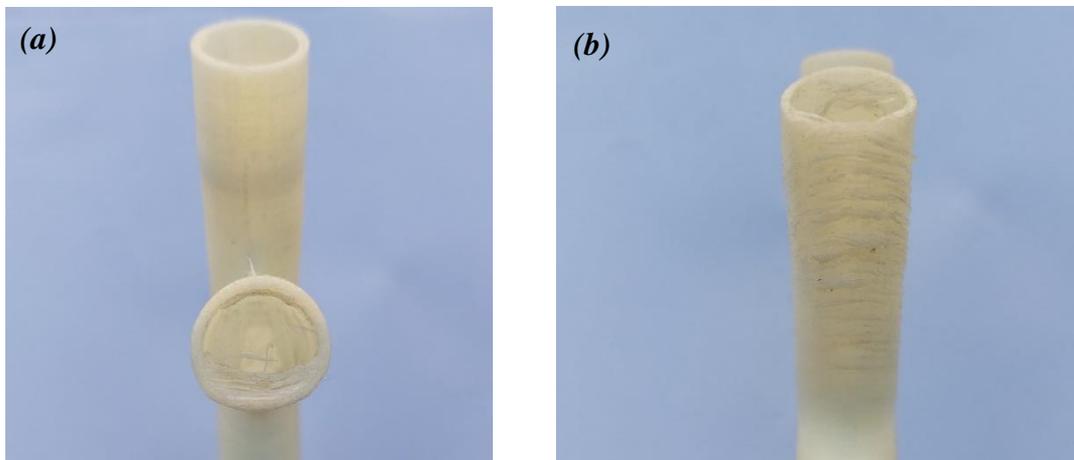


Figura 40: Deformación de la geometría (a) y capas perimetrales desprendidas (b) en la primera impresión

Se plantean 2 posibles soluciones:

- **Solución 1:** Optar por el empleo de soportes para sostener las superficies con una inclinación igual o superior a 45° (*Figura 41*). Para facilitar la impresión, se extenderá el brazo inclinado de manera que su sección se encuentre horizontal a la cama de impresión.

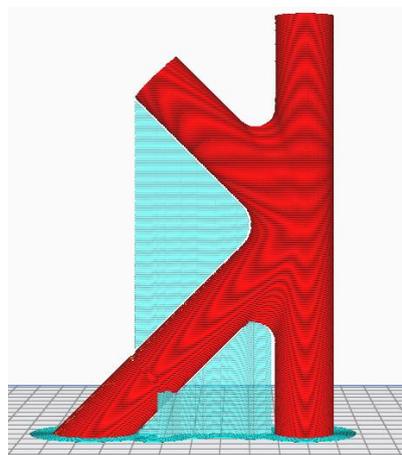


Figura 41: Solución planteada 1

- **Solución 2:** Debido a que en la primera impresión la mitad inferior de la unión tenía un acabado aceptable, se podría optar por imprimir dos mitades independientes con una ranura, las cuales serán unidas mediante un pasador de manera que se impida el giro de una respecto a la otra (*Figura 42*).

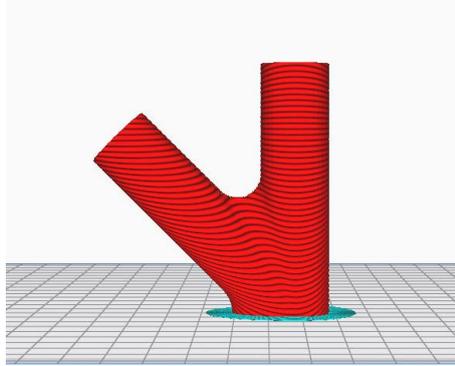


Figura 42: Solución planteada 2

No se opta por una solución concreta, sino que se empleará cada una en función de los requerimientos del método de fabricación seleccionado y en función del tipo de material hidrosoluble que se esté empleando en ese momento.

7. Análisis de soluciones

7.1 Introducción

Tal como se ha expuesto en el apartado 6.2 *Métodos de fabricación*, inicialmente se han planteado varios procesos mediante los cuales se van a fabricar las uniones, ya que se consideran viables a la hora de generar una unión que represente la geometría de un nudo tipo K.

El objetivo será fabricar mediante los 3 procesos de fabricación al menos 3 probetas de cada uno para poder compararlas en los ensayos experimentales. A pesar de que 3 probetas por método es un número limitado para obtener conclusiones de alta fiabilidad, se consideran suficientes para valorar los métodos de fabricación y para comparar las variaciones de resultados entre estos.

A continuación, se explicará en detalle cada uno de los procedimientos llevados a cabo, analizando las ventajas y desventajas, así como los problemas encontrados y las soluciones planteadas para cada uno de ellos. Además, durante el proceso de construcción de las probetas se han ido realizando modificaciones debido a que alguna de las premisas que se planteaban no resultaban ser las óptimas a la hora de fabricar.

Para que todas las uniones realizadas por los distintos métodos sean comparables, lo propio sería realizar un laminado con el mismo número de capas de tejido de carbono y realizado mediante el mismo método de fabricación. Se opta por un laminado de 4 capas de tejido, lo que correspondería con aproximadamente 1 mm de espesor.

7.2 Proceso de fabricación 1

En primer lugar, se plantea la laminación exterior de un núcleo de material hidrosoluble como primera opción para desarrollar la unión. Una vez se haya laminado y curado, se introducirá en agua para que el interior de esta se quede hueca.

7.2.1 Intento de laminado mediante patrones de tejido

Se procede a intentar un primer laminado considerando la posibilidad de envolver el núcleo mediante tejido de carbono sarga. El procedimiento consiste en recortar patrones de tela de manera que toda la superficie quede cubierta, solapando unas piezas con otras ya que es importante que no haya discontinuidad en el laminado.

Debido a la propia geometría de la unión y las curvaturas que presenta, es complicado emplear grandes trozos de tejido que se adapten bien a la superficie, por lo que se opta por recortar pequeños patrones para cada una de las partes (*Figura 43*).

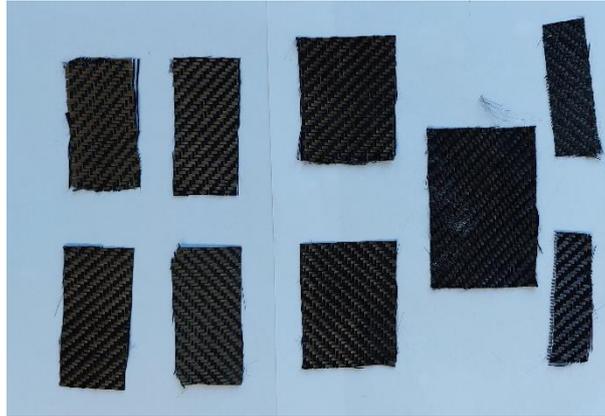


Figura 43: Proceso 1 - Patrones de tejido de carbono sarga

En este caso, se ha formado el núcleo mediante la impresión de 2 mitades independientes, las cuales se unen mediante un pasador cilíndrico (Figura 44). Para impedir que la resina se adhiera a la superficie impresa, se aplicará sobre su superficie cera desmoldeante.

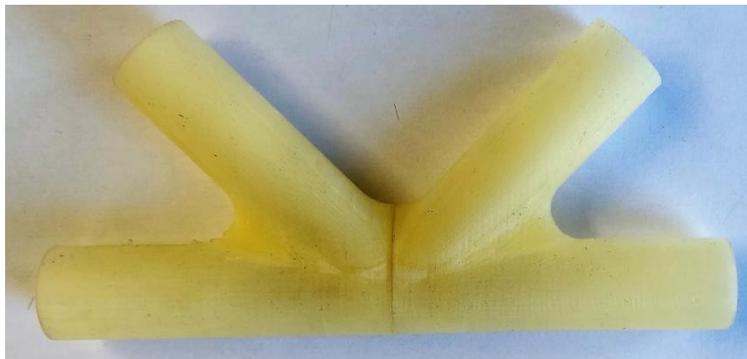


Figura 44: Proceso 1 - Núcleo a laminar

Problemas encontrados durante el laminado:

- Es difícil mantener las piezas de tejido de carbono seco en el lugar donde van.
- Al aplicar la resina, la tela impregnada se vuelve resbaladiza y no se mantiene fijada sobre la superficie, por lo que es imposible controlar que estén bien solapadas las capas.
- Debido a lo anterior, y al no poder mantener en su lugar la primera capa, resulta imposible laminar capas consecutivas.
- Al aplicar el vacío, se observa como la tela depositada se ha desplazado del lugar donde fue inicialmente colocada.

Posibles soluciones:

- Emplear un spray adhesivo especial para composites para facilitar la tarea de fijado de la tela a la superficie.
- Emplear piezas de tela más grandes para no necesitar realizar tantos solapes.
- Hacer laminados individuales capa a capa, es decir, laminar una capa, proceder a su curado, volver a laminar una capa y así sucesivamente.

No es posible aplicar ninguna de las soluciones, ya que se desestima el empleo del spray adhesivo porque, aunque podría cumplir con su función, una vez el tejido se ha impregnado con la resina, su efecto se verá reducido y volvería surgir el problema previo.

Por otro lado, tal como se mencionaba con anterioridad, se descarta emplear piezas grandes por la complejidad de disponerlas sobre la geometría de manera de que cubra bien la superficie. Si bien se podría realizar pequeños cortes en la tela para que se adapte mejor, hay que tener en cuenta que es importante mantener la continuidad en el laminado.

Por último, laminar capa a capa mediante procedimientos individuales supondría realizar la unión completa mediante 4 procesos de curado a vacío, lo que implicaría un total de 32 horas por probeta (96 h para el total de las probetas) de únicamente curado, por lo que no se considera que esta opción sea óptima.

En conclusión, no se considera válido el empleo de tejido de carbono tipo sarga para cubrir la superficie de este proceso de fabricación.

7.2.2 Laminado mediante funda de carbono

Como alternativa al procedimiento descrito con anterioridad, se descarta el uso del tejido de carbono sarga y se sustituye por la funda tubular de carbono seleccionada en el apartado 6.3.1 *Material de laminado*, de esta manera, se facilita la colocación de las capas de fibra de carbono ya que se puede ajustar perfectamente a la geometría del núcleo.

Como se puede observar en la *Figura 45*, el tipo de ligamento de la fibra de carbono sigue siendo ortogonal a pesar de que sus ángulos no sean 0° y 90° , sino que se disponen a 45° y -45° respecto a la dirección longitudinal de la funda, lo cual hay que tenerlo en cuenta de cara a valorar los resultados.

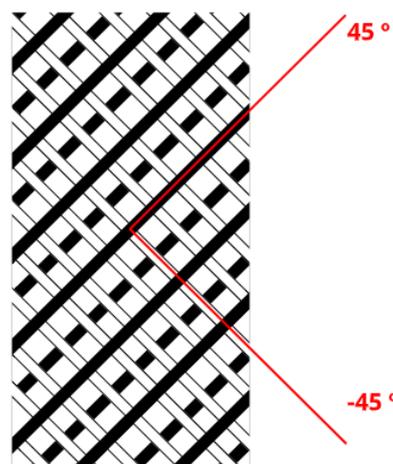


Figura 45: Tipo de ligamento de la funda tubular de carbono

Primer laminado con funda tubular

Se procede al laminado de un núcleo hidrosoluble idéntico al anterior, nuevamente encerado para evitar que se adhiera resina a la superficie. Para este procedimiento, se hace uso de hilo de coser para amarrar las capas de tela de manera que queden sujetas para poder depositar unas capas encima de otras. Este hilo no supone una gran inclusión en el laminado, puesto que su diámetro es de en torno a los 0,15 mm y no se están empleando grandes cantidades. De igual manera, el hilo quedará embebido en la resina una vez se haya curado

El procedimiento llevado a cabo se detalla en los siguientes pasos:

- Depositar una primera capa de fundas tubulares de manera que cubran toda la superficie, haciendo hincapié en que se solapen bien las diferentes capas (*Figura 46*).
- A modo de refuerzo, se enrollará la funda de carbono de manera que se refuercen los 3 redondeos de la unión, ya que es una zona donde el solape de las primeras capas es muy pequeño (*Figura 47*).
- Depositar otra capa de manera que vuelva a cubrir toda la superficie.
- Una vez aplicadas todas las capas, impregnar la unión con resina, colocar los consumibles y aplicar vacío.



Figura 46: Primera unión con funda - Primera capa



Figura 47: Primera unión con funda - Primera capa y refuerzos

En la *Figura 48* se muestra el resultado final del núcleo envuelto con todas las capas, mientras que en la *Figura 49* se muestra la colocación de los consumibles previo al vacío. Por último, en la *Figura 50*, se observa la unión ya en la bolsa con el vacío aplicado.



Figura 48: Primera unión con funda - Aspecto final de las capas de fibra de carbono



Figura 49: Primera unión con funda – Consumibles colocados sobre el laminado



Figura 50: Primera unión con funda - Unión a vacío

Una vez concluido el tiempo de curado, se extrae la unión de la bolsa y se debe proceder al despegado de los consumibles, así mismo, se ha de recortar el sobrante de fibra que sobresale de los brazos del núcleo. En la *Figura 51* y *Figura 52* se muestra el resultado superficial de la unión obtenida por cada lado. En este caso, se colocó una capa de Peel ply sobre el laminado, es por ello que el color de la superficie es grisáceo.



Figura 51: Primera unión con funda - Acabado superficial 1



Figura 52: Primera unión con funda - Acabado superficial 2

Problemas encontrados:

- Debido al ajustado diámetro de la funda, solo ha sido posible cubrir los brazos de la unión con 2 capas tela, lo cual no cumple con la premisa de emplear 4 capas de carbono. En la parte central no se encuentra este problema debido a los refuerzos, ya que se han depositado un total de 6 capas de tela en dicha zona.
- El acabado superficial es muy rugoso. Esto es debido a que, cuando se ha aplicado el vacío, la bolsa se arruga y, en consecuencia, sucede lo mismo con la última capa de tela, que tal como se observa en la *Figura 48*, no se amarró con el hilo.
- Debido a la presión que se genera sobre el laminado al aplicarse el vacío, se ha formado una aleta en todo el contorno de la unión (*Figura 53*), pudiendo ser crítico a la hora de valorar la resistencia, además de que el acabado final no es el esperado. No es posible su mecanizado porque si se recortase dicha aleta, se perdería continuidad de alguna de las capas en esos puntos y por tanto, la resistencia se vería comprometida.



Figura 53: Primera unión con funda - Aleta perimetral formada

Debido a los problemas mencionados, se descarta esta primera unión, tratando de mejorar la siguiente con el mismo método de fabricación. A modo de solución, se amarrará con hilo la última capa exterior del laminado, así como aumentar la cantidad de hilo en las capas internas, haciendo especial hincapié en los brazos de la unión para tratar de impedir que se forme la aleta.

En cualquier caso, se mantendrá el número de capas ya que se considera que con los refuerzos empleados es suficiente para que resista la unión.

Segundo intento de laminado

Como se expuso en las soluciones previas, se procede a laminar de la misma manera la unión, pero añadiendo más hilo entre capas, así como en la capa exterior para evitar la rugosidad y el aleateado perimetral. En la *Figura 54* se muestra la unión antes de impregnarse con resina.



Figura 54: Segunda unión con funda - Capas exteriores

De esta manera se obtuvo el acabado superficial mostrado en la *Figura 55*. Se sigue observando cierta rugosidad sobre todo en la parte central de la unión (debido a los solapes de los refuerzos en esa zona), así como los hilos que fueron empelados para amarrar la capa exterior. Sin embargo, en este caso, se han minimizado notablemente las imperfecciones que se obtuvieron en la unión previa (*Figura 56*).



Figura 55: Segunda unión con funda - Acabado superficial



Figura 56: Segunda unión con funda – Contorno de la unión

Debido a que el resultado de este último procedimiento ha sido más adecuado, se construirá otra probeta de la misma manera.

La orientación de las fibras en este proceso se deja en un segundo plano ya que con la funda tubular empleada no es posible variar la orientación de las fibras y se ven forzadas a disponerse según el ligamento de la propia funda.

Sin embargo, a modo de conclusión, vistos los resultados y la complejidad del proceso, no se considera que este procedimiento de fabricación sea viable en geometrías más complejas o cuando sea requerido un mayor número de capas, por lo que se procede a su descarte como opción viable para ser reproducida.

En cualquier caso, se procederá al ensayo experimental de las 2 probetas construidas para que sirva de comparativa con los procesos de fabricación que se explicarán en los siguientes apartados.

7.3 Proceso de fabricación 2

Este proceso de fabricación se realizará mediante moldes negativos, empleando un contramolde que hará la función de tapa para distribuir la presión que se ejerce sobre el laminado cuando se aplique el vacío y forzar a que el diámetro interno de la unión sea el estipulado en los requisitos dimensionales. Los moldes diseñados son los mostrados en la *Figura 18* y *Figura 19* del apartado 6.2.2 *Fabricación basada en moldes negativos*, por tanto, para cada unión se ha de fabricar dos mitades independientes. Cabe destacar que se pretende que el proceso de fabricación sea lo más sostenible posible, por tanto, se espera que los moldes sean totalmente reutilizables para todas las probetas que se han de fabricar.

Tal como se ha explicado, para facilitar el pegado de las 2 mitades e incrementar la resistencia, se dejarán unas cartelas perimetrales, cuyas dimensiones se encuentran inicialmente definidas en el propio molde.

Los moldes serán impresos mediante impresión 3D con los parámetros de impresión expuestos a continuación en la *Tabla 12*.

Impresora	Creality3d Ender 6
Filamento	PLA
Altura de capa [mm]	0,25
Nº Capas perimetrales	2
Espesor capa perimetral [mm]	1
Nº Capas superior/inferior	2
Espesor capas superior/inferior [mm]	1
Relleno [%]	15
Patrón de relleno	Triángulos
Temperatura extrusor [°C]	200
Temperatura cama caliente [°C]	50
Velocidad [mm/s]	60

Tabla 12: Parámetros de impresión para los moldes

Debido a la forma del molde, en las zonas donde la impresora debe representar una geometría curva, es normal que la circunferencia que representa la superficie exterior de la unión no sea perfecta, por tanto, se debe asegurar que sea posible desmoldear el laminado una vez se haya curado. Sin embargo, la cera de desmoldeo que se ha empleado hasta ahora no tiene una consistencia fluida, por lo que es complejo rellenar toda la rugosidad fruto de la impresión.

Como alternativa, se plantea usar una grasa natural de origen animal como es la mantequilla, la cual, impedirá igualmente que la resina se adhiera al molde y al contrario que la cera, esta puede aplicarse en su forma líquida si se calienta ligeramente, permitiendo lubricar de manera sencilla toda la superficie. Posteriormente se solidificará cuando se encuentre a temperatura ambiente y se podrá laminar sobre el molde sin ningún inconveniente.

En los planos se muestran las dimensiones exactas de los moldes. Como allí se observa, la dimensión del molde debe considerar tanto el diámetro exterior que se pretende obtener en la unión como el espesor del laminado para que finalmente se obtenga un diámetro interior de 20 mm, tal como se ha especificado en los requisitos dimensionales.

En este proceso de fabricación se plantea igualmente laminar mediante el uso de 4 capas de tejido de fibra de carbono sarga:

- **Número de capas de tela:** 4
- **Número de capas de fibra:** 8
- **Espesor por capa** (en laminado): 0,19 mm
- **Espesor total de laminado:** 1 mm
- **Tipo de laminado:** Ortotrópico

Debido a que se pretende que el proceso de fabricación sea lo más sencillo posible, en vista de comprobar si este tipo de fabricación es viable para reproducirla en mayores cantidades, no se prestará especial atención a la optimización de la colocación de las fibras, sino que se plantea emplear un recuadro de tejido y disponerlo de manera de que existan fibras horizontales y verticales en el plano del molde (*Figura 57*).

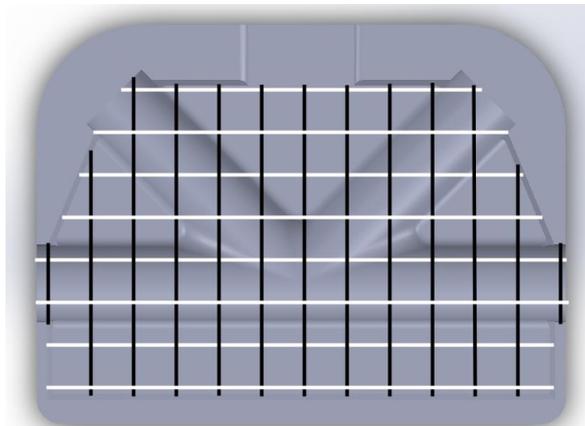


Figura 57: Orientación de las fibras (0° y 90°)

A pesar de disponer de dicha manera las telas, al poner una superficie plana sobre una curva, es evidente que los ángulos entre fibras cambiarán para adaptarse a las curvaturas y los redondeos, por lo que no será un laminado completamente ortotrópico realmente, sino que habrá presentes variaciones de ángulos según la zona estudiada.

Se seguirá el siguiente procedimiento de fabricación:

- Imprimir ambas partes del molde.
- Aplicar el desmoldeante a ambas mitades (*Figura 58*).
- Recortar el tejido de fibra de carbono de manera de que se ajuste a la superficie que se debe laminar (geometría K y aleteado).
- Depositar las capas de fibra junto a la resina (*Figura 59*).
- Cerrar el molde con el contramolde (*Figura 60*) y aplicar presión mediante vacío.

En este caso, no es necesario el empleo de consumibles sobre la superficie del laminado ya que la resina sobrante saldrá del molde, aun así, se ha colocado manta absorbente alrededor del molde para recoger esta resina y que no se quede depositada en el interior de la bolsa.



Figura 58: Proceso de fabricación 2 – Molde con desmoldeante aplicado



Figura 59: Proceso de fabricación 2 - Tejido de carbono y resina depositadas en el molde



Figura 60: Proceso de fabricación 2 - Molde cerrado con el laminado en el interior

Un vez terminado el tiempo de curado dentro del molde a vacío (8h), se procede a su desmoldeo. Como se muestra en la *Figura 61*, se obtiene una pieza con la geometría requerida y a su vez, el molde se muestra intacto, por lo que se ha conseguido el objetivo planteado de poder reutilizarlo.

Aunque el acabado superficial no es perfecto, estas piezas aún necesitan un mecanizado posterior donde se recorte el sobrante y se prepare su superficie para que su apariencia sea más apropiada. En cualquier caso, se considera el resultado como aceptable y debido a su facilidad de fabricación es completamente viable replicarlo con facilidad.

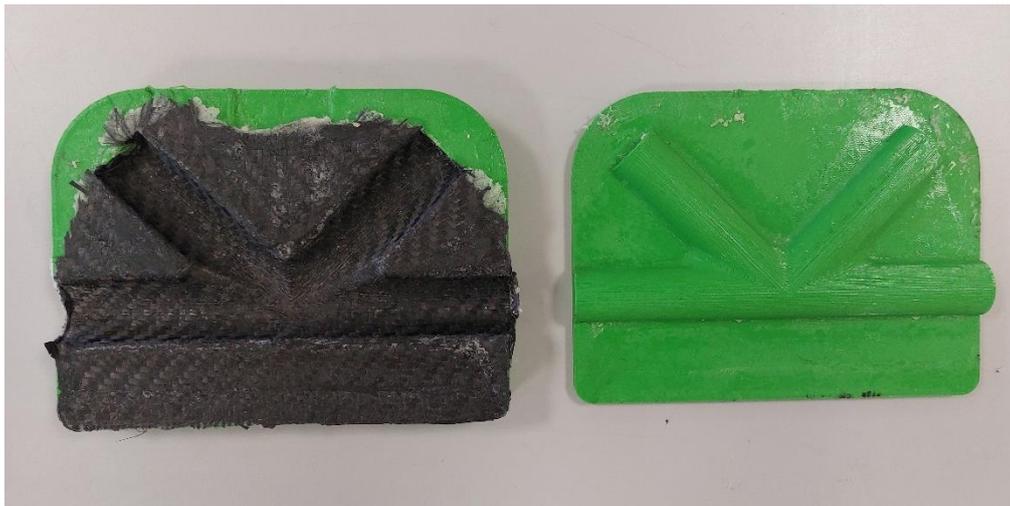


Figura 61: Proceso de fabricación 2 - Desmoldeo de la unión

Por último, se debe fabricar la otra mitad restante. Estas dos mitades se muestran en la *Figura 62* y *Figura 63* sin haber sido tratadas superficialmente, ya que este tratamiento se explicará con posterioridad en los siguientes apartados.



Figura 62: Proceso de fabricación 2 - Primera mitad



Figura 63: Proceso de fabricación 2 – Segunda mitad

Modificaciones planteadas:

A pesar de no tener gran relevancia, para facilitar el proceso de fabricación, se realizarán cambios en el molde de manera que no se encuentren dimensionadas las cartelas en él, sino que se deje en la unión superficie sobrante con la idea de que se recorte posteriormente. De esta manera, no hará falta recortar las capas de tela con una determinada forma, sino que se hará uso de capas rectangulares. Aun así, dichos moldes presentan las mismas dimensiones que los anteriores y están mostrados en los planos.

Siguiendo el mismo proceso de fabricación de antes, se vuelven a engrasar los moldes (Figura 64), y se depositan las capas de fibra con resina que conforman el laminado (Figura 65) para luego someterlas a vacío. Se fabrican el resto de las piezas necesarias para formar un total de 3 uniones. Los resultados mediante esta última modificación se muestran en la Figura 66, observándose incluso como el acabado superficial mediante esta última modificación, ha mejorado notablemente ya que la tela de carbono se ha manipulado menos antes de su deposición.



Figura 64: Proceso de fabricación 2 - Moldes modificados sin aleteado preestablecido

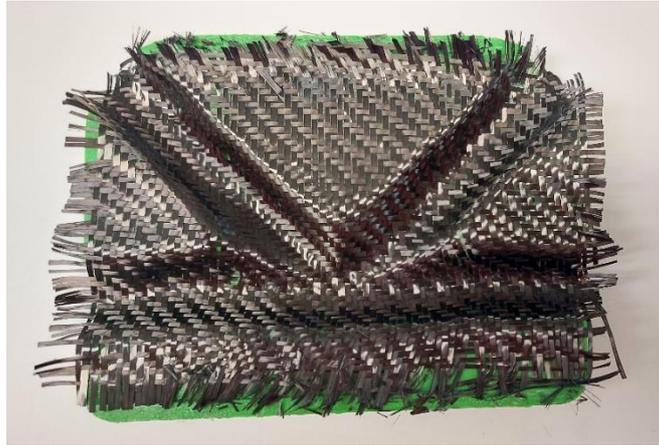


Figura 65: Primera capa depositada



Figura 66: Proceso de fabricación 2 - Acabado superficial de la segunda unión

7.4 Proceso de fabricación 3

Al contrario que el método anterior, mediante este proceso se puede obtener una unión de una pieza y no es necesario realizar dos mitades por separado, por lo que se estaría optimizando el proceso de fabricación y es más rápido realizar uniones consecutivas.

En este caso, se cambiará los parámetros de impresión del núcleo para tener un mayor margen de seguridad, por lo que se introducirá relleno de un 20% y no se imprimirá hueca como se contemplaba en el primer método de fabricación.

Nuevamente, se considera un laminado de 4 capas por cada lado de la unión, por lo que en este caso se emplearán un total de 8 capas de tela. La disposición de las fibras seguirá el mismo patrón que el explicado en el método anterior y referenciado en la *Figura 57* por el mismo motivo, para que el método de fabricación sea lo más sencillo y replicable posible.

Se seguirá un procedimiento similar al anterior:

- Se aplica desmoldante a todos los componentes que forman el molde (*Figura 67*).



Figura 67: Proceso de fabricación 3 - Molde y contramolde con desmoldante

- Se lamina uno de los lados del molde con 4 capas de tela (*Figura 68*).



Figura 68: Proceso de fabricación 3 - Primeras 4 capas de tela

- Se coloca el núcleo hidrosoluble sobre el laminado, asegurándose que esté centrado según las pestañas y ranuras que tienen los moldes (*Figura 69*).



Figura 69: Proceso de fabricación 3 - Introducción del núcleo en el laminado

- Se lamina 4 capas de tela sobre el núcleo (*Figura 70*).



Figura 70: Proceso de fabricación 3 - Laminado de las 4 capas superiores

- Finalmente se cierra con el contramolde y se aplica presión mediante vacío (*Figura 71*).

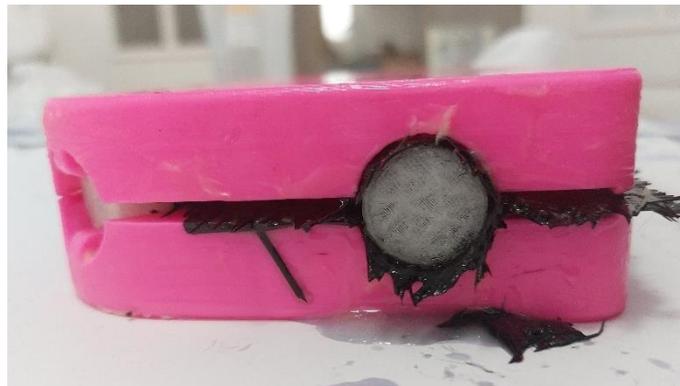


Figura 71: Proceso de fabricación 3 - Cierre del molde (laminado y núcleo)

Al igual que antes, no será necesario el uso de consumibles sobre el laminado, únicamente un poco de manta absorbente por fuera del molde para que absorba la resina restante.

Una vez te finalizado el tiempo de curado se obtiene el resultado de la *Figura 72*, en la que se observa el sobrante del núcleo hidrosoluble, el cual falta por disolver en agua. En este caso, también se necesita un mecanizado posterior para recortar la unión con las dimensiones requeridas y obtener un aleteado igual a las uniones ya fabricadas. Las dimensiones del aleteado deberán ser iguales a las establecidas en el método de fabricación anterior.

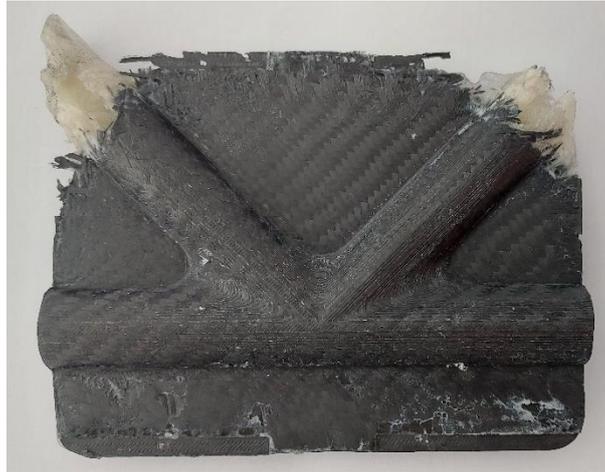


Figura 72: Proceso de fabricación 3 – Pieza desmoldeada

Problemas encontrados:

- Debido a la presión ejercida, a pesar de considerarse una holgura diametral para introducir el tubo con facilidad, esta no es suficiente y el diámetro interior de la unión es menor a 20 mm.

Posibles soluciones:

- Lijado de la superficie interior de la unión de manera que aumente su diámetro.
- Lijado del tubo hasta que sea posible introducirlo en la unión.
- Rediseño de los moldes para aumentar la holgura.

Para la unión ya construida, se tomará como solución el lijado del tubo hasta que la holgura sea suficiente para introducirlo.

De igual manera, en las fabricaciones restantes se plantea un cambio de holgura diametral, aumentándose esta hasta 1 mm total para corregir dicho error. Dichas dimensiones corregidas son las que se han contemplado finalmente en los planos.

7.5 Acabado de las uniones

En el presente apartado, se explicará el procedimiento de acabado de las uniones fabricadas, ya que cada una de las probetas hay que mecanizarlas para corregir imperfecciones, rellenar porosidades propias del método de fabricación, o quitar excedente de resina.

En cuanto a las 2 uniones realizadas mediante *proceso de fabricación 1*, tal como se ha mencionado, se ha descartado dicho método, sin embargo, se ha limado su superficie quitando toda la rugosidad posible de manera que se obtenga un resultado mejorado (*Figura 73 y Figura 74*).



Figura 73: Unión 1 (Proceso de fabricación 1)



Figura 74: Unión 2 (Proceso de fabricación 2)

Al resto de piezas fabricadas por los métodos restantes, se ha recortado el exceso de cada una de ellas mediante el empleo de una multiherramienta tipo Dremel, ya que se pretende que para que la comparación de cada una de ellas sea justa, se disponga de las mismas cartelas y que sean del tamaño especificado en los requisitos dimensionales.

Una vez las piezas cumplen con los requisitos dimensionales se procede a una mejora del acabado superficial. Debido a la rugosidad del molde, algunas superficies presentan algo de rugosidad, incluso falta de resina en algunas zonas del laminado. Por tanto, se realizará un tratamiento a la superficie de todas las piezas fabricadas con el fin de reparar dichas imperfecciones.

Este procedimiento se basa en los siguientes pasos:

- Lijado de la superficie con papel de lija de agua de grano 280 para eliminar restos de resina y de desmoldeante, así como obtener una superficie limpia para trabajar sobre ella.
- Aplicar resina en toda la superficie para rellenar los huecos y la porosidad.
- Lijado de la superficie con los siguientes grados abrasivos: 360 / 500 / 1000 / 2000 / 5000.
- Lacado tipo satinado para mejorar el acabado superficial.

A modo de ejemplo, se muestra en la *Figura 75* y en la *Figura 76* el acabado obtenido para 2 probetas, cada una de un método de fabricación distinto.



Figura 75: Acabado final de unión por proceso de fabricación 2 (ambas mitades)



Figura 76: Acabado final de unión por proceso de fabricación 3

Nota: En las uniones mostradas, aún falta por recortar las cartelas, pero se pretende realizar esta operación una vez se hayan unido los tubos para tratar que ambas partes sean lo más iguales posible.

En cuanto a las uniones fabricadas mediante dos mitades, ha sido necesario tratar su superficie interior, ya que se necesita que, a la hora de pegarlas con resina, toda la superficie interior de las cartelas esté perfectamente nivelada para que haya un buen contacto entre ambas partes. Por tanto, se ha lijado con papel de lija de grano 280 todo el interior para quitar imperfecciones, así como la capa superficial interior de resina para procurar que la resina que se aplique a posteriori se adhiera bien.

8. Análisis de resultados

8.1 Preparación de las uniones previo al ensayo

Para el ensayo de las uniones es necesario el empleo de los tubos seleccionados para introducirlos en los brazos, los cuales facilitan el ensayo a la hora de aplicar las cargas sobre el nudo. Además, aportan cierta rigidez al conjunto de la unión.

La preparación de las uniones consistirá en:

- Recortar el tubo en tramos más pequeños.
- Lijar de la superficie del tubo.
- Pegar los tubos en la unión con resina.

8.1.1 Preparación de los tubos

Antes de proceder al pegado, se ha de recortar los tubos en pequeños tramos. Cada una de las uniones cuenta con 4 brazos, por tanto, se necesitan un total de 32 tramos (8 uniones en total).

Debido al procedimiento que se empleará para el ensayo de las uniones y el cual se explica en el siguiente apartado *8.2 Ensayo experimental de las uniones*, se considera que, de los 4 brazos de la unión, en 2 de ellos se debe introducir el tubo al menos 5 cm. Considerando que se dejan por fuera de la unión otros 5 cm, la longitud total de los tramos ha de ser de 10 cm. Dichos tubos servirán para sujetar la unión y aplicar la carga durante el ensayo.

En los otros 2 brazos, se emplearán tramos de 8 cm, por lo que se introducirán solo 4 cm, ya que estos no se emplearán para aplicar ningún tipo de carga ni restricción.

Dicho lo cual, se recortarán los siguientes tramos:

- 16 tramos de 10 cm (2 por unión)
- 16 tramos de 8 cm (2 por unión)

Una vez cortados los tramos, será necesario su lijado, ya que estos presentan un acabado superficial que consisten en una capa de laca protectora y ésta podría ser un impedimento para su adhesión con la resina. Será suficiente lijar la superficie con papel de lija grano 280 para desprender dicha capa.

Debido a la disparidad de holguras que presentan cada una de las uniones, en ocasiones será necesario un mayor lijado del tubo para permitir que sea introducido en la unión. Cabe destacar que es importante que el tubo no entre en los brazos de la unión muy ajustado, ya que es importante permitir que haya una capa de resina suficiente entre la pared exterior del tubo y la interior de la unión, tal como se ha mencionado en apartados anteriores.

En la *Figura 77* se muestra un esquema donde se refleja la disposición de los tubos dentro de la unión.

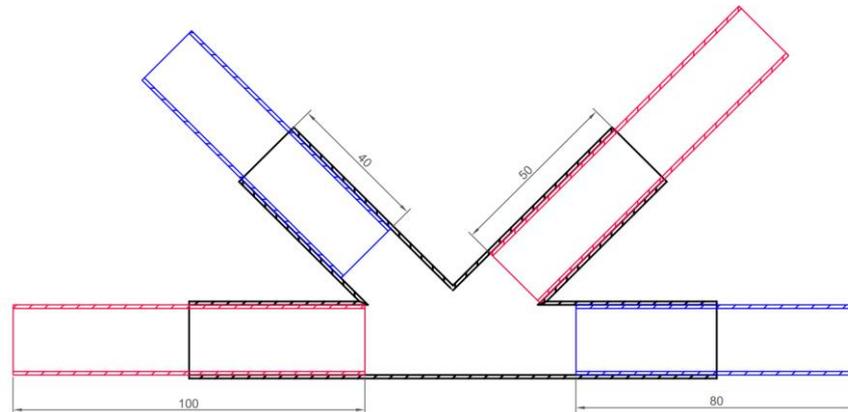


Figura 77: Vista de sección. Disposición de los tubos dentro de la unión (Cotas en mm).

8.1.2 Pegado de los tubos

Se procede al pegado de los tubos ya previamente cortados y lijados. Según indica el fabricante de la resina empleada, esta es apta tanto para realizar los laminados como para funciones adhesivas, por lo que se seguirá empleando el mismo conjunto de resina-endurecedor.

Para las uniones que consisten en una única pieza, la operación es sencilla, se aplica la resina tanto en las paredes interiores de la unión como en las exteriores del tubo y se introduce. Pasadas unas 8 horas, la resina se habrá endurecido, pegando los tubos perfectamente.

Las uniones que se forman mediante 2 mitades se forman mediante un procedimiento igual al descrito, con la particularidad de que se debe mantener el contacto entre las 2 mitades y el tubo durante todo el tiempo de curado, así como asegurar que las cartelas de ambas partes se mantengan unidas, siendo necesaria la aplicación de presión. Inicialmente se planteaba emplear el vacío ya que, como se explicó con anterioridad, permite aplicar mucha carga de manera sencilla, sin embargo, finalmente se descarta por las siguientes razones:

- Se debe hacer uso de una bolsa muy grande como para que se adapte correctamente a la unión con los tubos, por lo que habría que pegarlas una a una, conllevando muchas horas de proceso.
- Todo el exceso de resina saldrá de la unión y podría depositarse sobre su superficie exterior, dañando así su acabado.
- Los contornos de la unión están afilados, ya que han sido mecanizados, por lo que podrían perforar la bolsa de vacío. Una solución podría ser emplear la manta absorbente de modo que se cubran los contornos, sin embargo, esta absorberá la resina sobrante y se adherirá a la unión.

En consecuencia, se hará uso de sargentos y pinzas de presión para unir las mitades, tal como se muestra en la *Figura 78* y *Figura 79*.



Figura 78: Pegado de la unión mediante sargento (1)



Figura 79: Pegado de la unión mediante sargentos (2)

A continuación, se procede a remachar la unión, ya que, si se ensayasen únicamente con la resina como medio de unión, esta sería la única que resistirá el cortante entre ambas mitades, por lo que se reforzará mediante remaches para aumentar la resistencia al despegado.

Los remaches empleados son de diámetro 4 mm y longitud 10 mm (*Figura 80*) y se empelará una remachadora manual (*Figura 81*).



Figura 80: Remaches utilizados para el pegado de la unión



Figura 81: Remachadora manual utilizada

Previo al remachado se ha de perforar la unión mediante taladrado con una broca del mismo diámetro que el remache, en este caso, con una broca de 4 mm. Así mismo, se colocará una arandela a cada lado del remache para mejorar el contacto entre este y la superficie de carbono. En la *Figura 82* se observa el acabado de una de las uniones realizadas mediante el proceso de fabricación 2.



Figura 82: Unión remachada

8.2 Ensayo experimental de las uniones

En el presente apartado se expondrá el procedimiento por el cual se realiza el ensayo experimental de las uniones. En primer lugar, se muestra el dispositivo con el que se aplica la carga y finalmente se procede con la realización de 3 ensayos diferentes:

- Comprobación de la resistencia de la unión respecto al tubo.
- Comprobación de la resistencia del tubo.
- Comprobación de la resistencia de la unión.

8.2.1 Dispositivo experimental

Se construye un dispositivo tal que permita restringir uno de los brazos de la unión mientras que se aplica un momento mediante otro de los brazos (*Figura 83*). Para ello, se usan redondos de diámetro 20 mm de acero, los cuales se cilindran en el torno de manera de que parte de su longitud (5 cm) tenga un diámetro de 18 mm para poder introducirlos en los tubos (*Figura 84*).

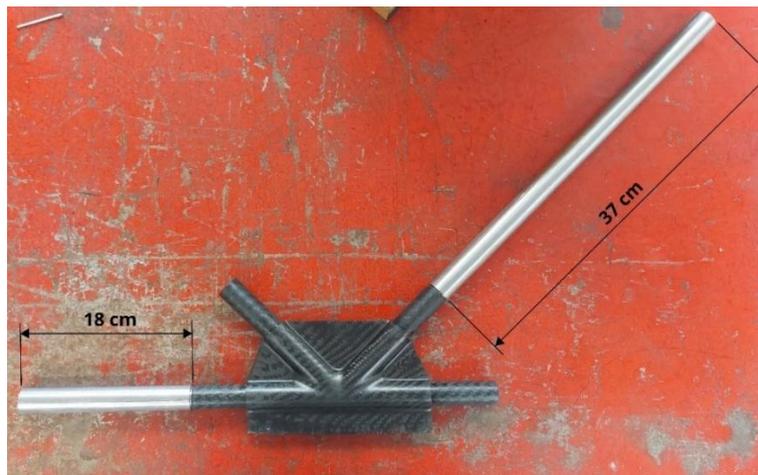


Figura 83: Brazos de acero introducidos en la unión. Brazo restringido (18 cm) y brazo de carga (37 cm)



Figura 84: Redondo de acero usado en el dispositivo experimental

Se emplea una base de madera para sujetar el brazo restringido de acero, el cual se fija mediante abrazaderas que, según el fabricante, soportan 60 kg cada una. Se espera que las cargas durante el ensayo sean elevadas, por lo que se disponen 4 abrazaderas por seguridad (*Figura 85*).

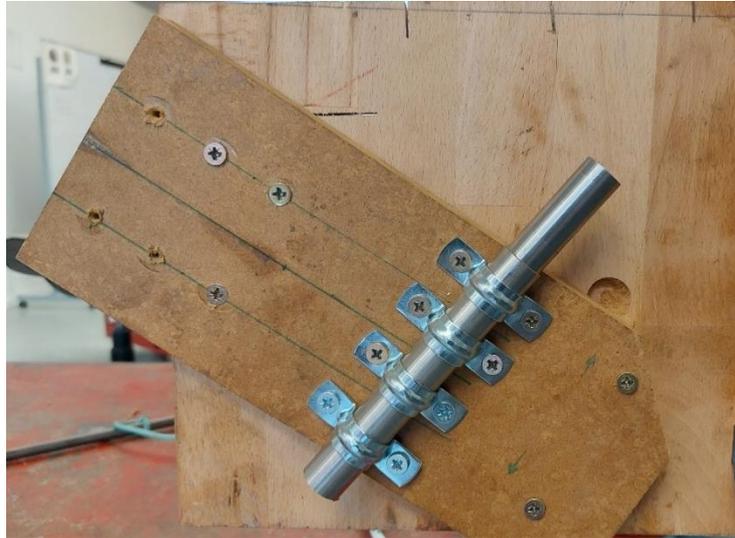


Figura 85: Brazo restringido sujeto por abrazaderas

Es importante que la unión no se encuentre apoyada en la madera durante su ensayo, por lo que se suplementa mediante tablas para que se encuentre en el aire. Por otro lado, el brazo de carga se ha dispuesto entre 2 tablas que restringen su movimiento en el eje perpendicular a la base, de manera que únicamente se mueva libre en el plano horizontal respecto a la madera (*Figura 86*). La separación entre tablas es de 20 mm debido a que debe coincidir con el diámetro del redondo.



Figura 86: Unión separada de la madera y guías del brazo de carga

Para sujetar todo el dispositivo se hace uso de un tornillo de banco, el cual está localizado en una mesa de trabajo. En la *Figura 87* se muestra el dispositivo final de ensayo.

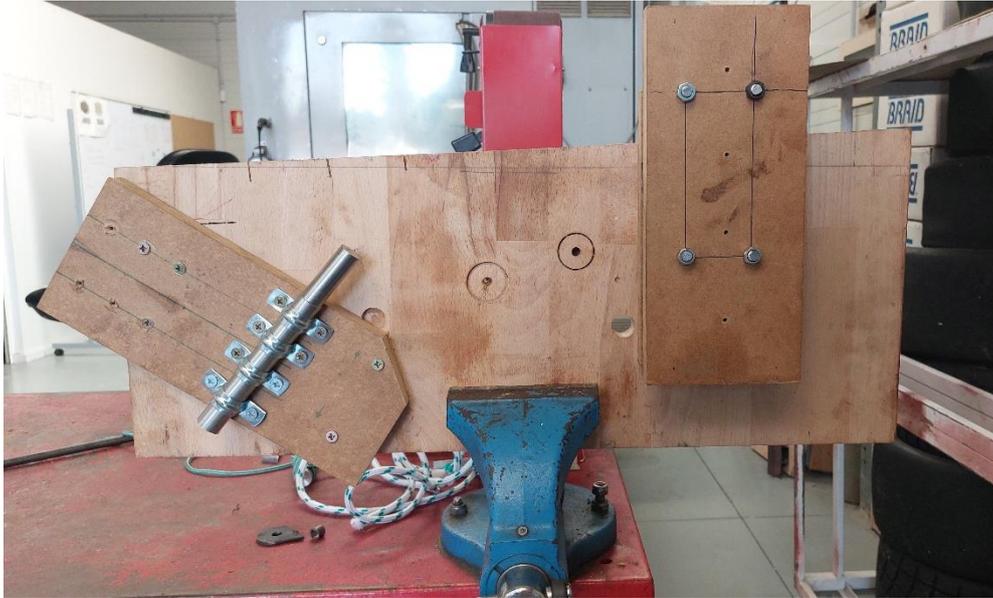


Figura 87: Dispositivo de ensayo sujeto a un tornillo de banco

La aplicación de la carga se realiza mediante cuerda de nylon amarrada al brazo de carga y disponiendo distintos pesos con la ayuda de una cesta. Los pesos empleados tienen distintos órdenes de magnitud para ajustar lo máximo posible la carga de fallo. En la *Tabla 13* se muestran los pesos disponibles para los ensayos.

Peso [kg]	Cantidad
16,2	1
10	4
2,85	1
1,92	1
1,3	3
1	2

Tabla 13: Pesos disponibles para los ensayos

8.2.2 Ensayo 1: Comprobación de la resistencia de la unión respecto al tubo

En primer lugar, se comprueba la resistencia de la unión y del adhesivo respecto a los tubos de carbono. El objetivo principal de la unión es resistir más que los elementos que pretende unir, es decir, que la propia unión no sea el elemento limitante en una posible estructura tubular.

Un resultado positivo de este ensayo será que el elemento que falle primero sean los tubos de fibra de carbono, por ello, se introducen tanto el brazo restringido como el de carga (de acero) dentro del tubo de carbono, tal como se muestra en el esquema representado en la *Figura 88*.

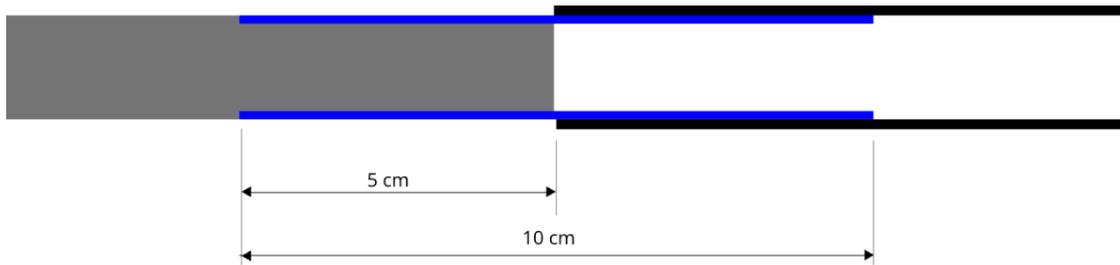


Figura 88: Esquema de la disposición de elementos dentro de la unión durante el ensayo. Brazo de acero (gris); tubo de carbono (azul); unión de carbono (negro)

Las uniones objeto de ensayo se han identificado según la nomenclatura expuesta en la Figura 89 y se ensayarán según el procedimiento mencionado en el apartado anterior. Las fabricadas mediante el procedimiento de fabricación 1 se identifican como **1.1** y **1.2**; las del proceso de fabricación 2 como **2.1**, **2.2** y **2.3**; por último, las fabricadas mediante el proceso de fabricación 3 como **3.1**, **3.2** y **3.3**.

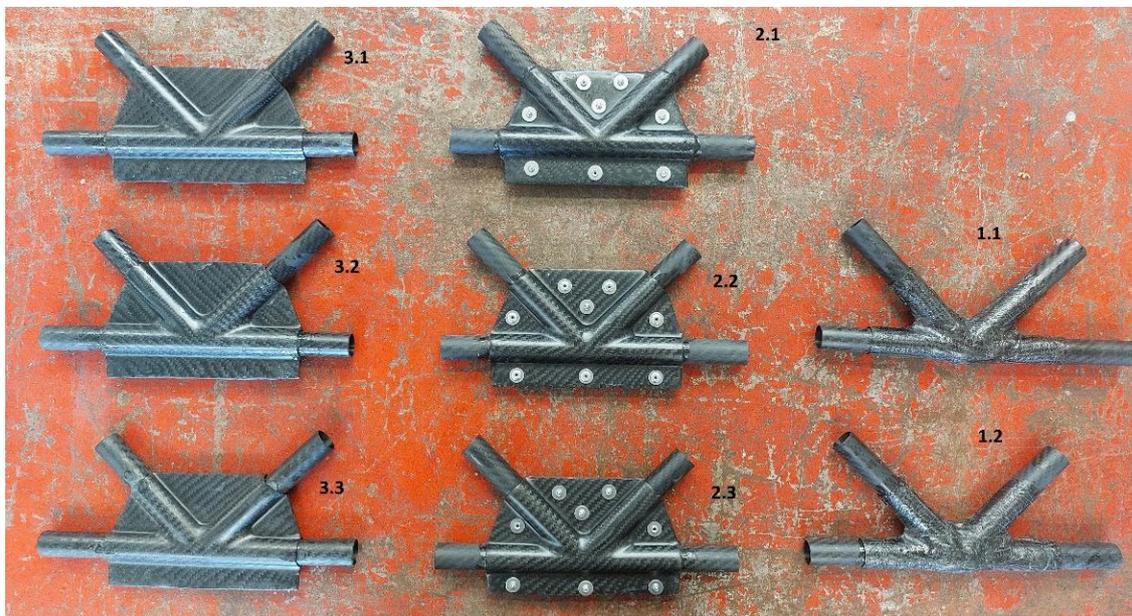


Figura 89: Identificación de las uniones objeto de ensayo

En este ensayo, la distancia entre el punto de aplicación de la carga respecto al brazo restringido de la unión (donde el momento es mayor durante el ensayo) es de 51 cm. Dicha distancia es la usada para calcular el momento máximo al que se ha sometido la unión.

En la Tabla 14 se establece el incremento de carga que se realizará durante el ensayo.

Registro	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Carga [kg]	10	12,9	14,8	16,0	17,4	18,7	19,7	20,7	21,9
Momento [kg m]	5,1	6,6	7,5	8,2	8,9	9,5	10	10,5	11,2

Tabla 14: Saltos de peso establecidos para el ensayo 1

Al incrementar el peso se espera alrededor de 20 segundos antes de volver a incrementarlo para asegurar que se estabilice la carga y comprobar que no haya ninguna rotura en ese tiempo.

Ensayo de uniones tipo 1

A pesar de que dicho proceso de fabricación ha sido descartado por su complejidad y por su poca flexibilidad a la hora de modificar los laminados, se ensayarán igualmente las probetas fabricadas con el fin de compararlas con el resto de las uniones.

En la *Figura 90* se muestra las imágenes asociadas a la rotura de la unión 1.1 mientras que en la *Figura 91* se muestran las de la unión 1.2.

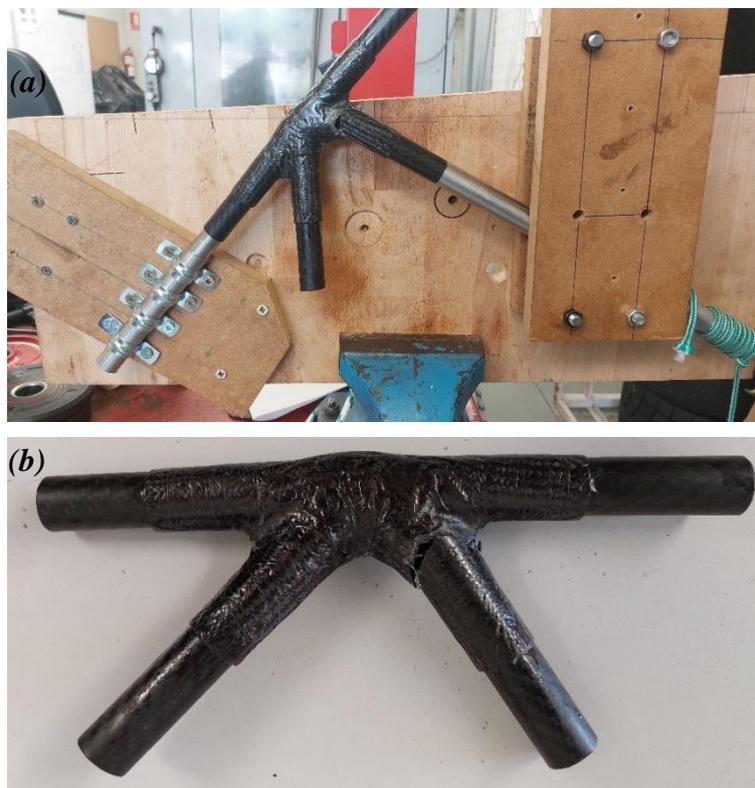


Figura 90: Rotura de probeta 1.1. (a) En dispositivo de ensayo. (b) Posterior al ensayo



Figura 91: Rotura de probeta 1.2. (a) En dispositivo de ensayo. (b) Posterior al ensayo

Por otro lado, en la *Tabla 15* se exponen las cargas de rotura de todas las probetas ensayadas de este tipo.

	Unión 1.1	Unión 1.2
Carga de rotura (kg)	12,85	10
Momento de rotura (kg m)	6,55	5,10

Tabla 15: Cargas de rotura de las uniones tipo 1

Observaciones:

- Ambas uniones han llegado a la rotura con cargas livianas, mientras que el tubo no ha roto en ninguna de ellas. Debido a lo anterior, este tipo de unión no cumple con el objetivo para el cual fueron diseñadas.
- La rotura es prácticamente instantánea al aplicar la carga, no se presentan signos sonoros previos a la rotura.
- Se observa como la rotura se origina en el brazo de carga, justo donde termina el tubo de carbono, debido al punzonamiento que este genera sobre las paredes de la unión.

Ensayo de uniones tipo 2

En la *Figura 92* se muestra las imágenes asociadas a la rotura de la unión 2.1; en la *Figura 93* se muestran las de la unión 2.2 y por último en la *Figura 94* las de la unión 2.3.

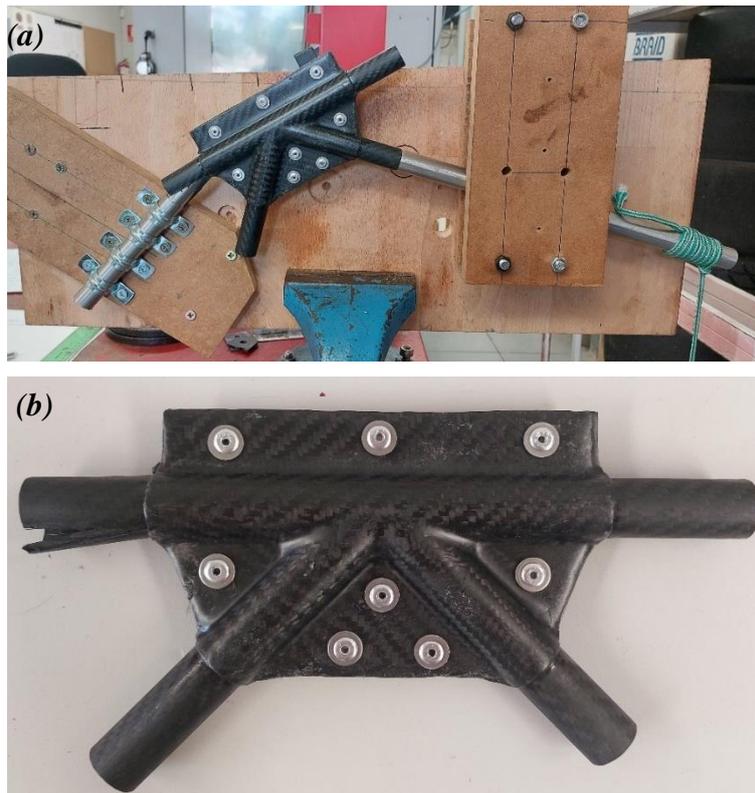


Figura 92: Rotura de probeta 2.1. (a) En dispositivo de ensayo. (b) Posterior al ensayo

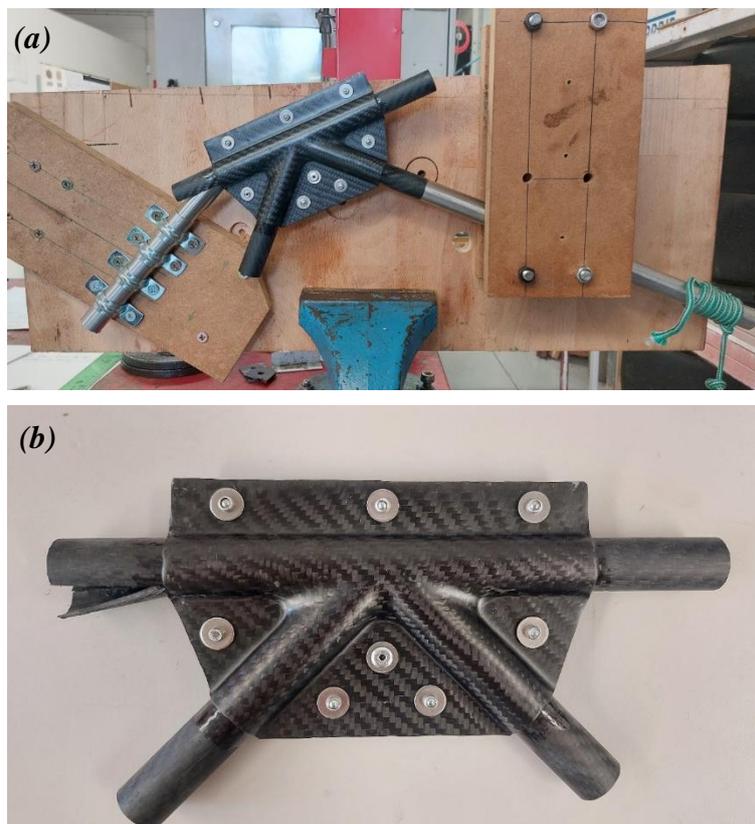


Figura 93: Rotura de probeta 2.2. (a) En dispositivo de ensayo. (b) Posterior al ensayo

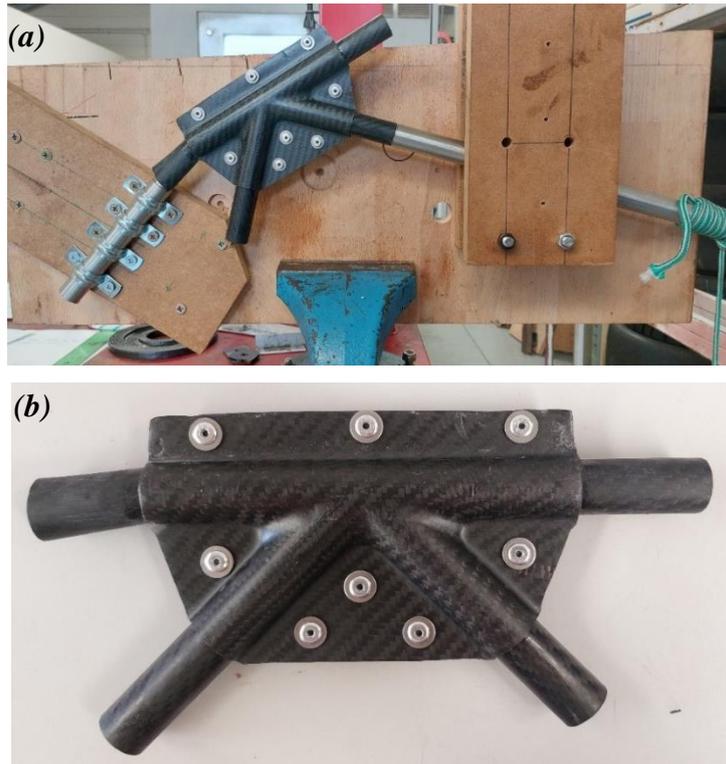


Figura 94: Rotura de probeta 2.3. (a) En dispositivo de ensayo. (b) Posterior al ensayo

En la *Tabla 16* se exponen las cargas de rotura de todas las probetas ensayadas de este tipo.

	Unión 2.1	Unión 2.2	Unión 2.3
Carga de rotura [kg]	17,37	20,67	21,92
Momento de rotura [kg·m]	8,86	10,54	11,18

Tabla 16: Cargas de rotura de las uniones tipo 2

Observaciones:

- En este caso, la rotura se origina en el tubo de carbono, no en la unión. Todas las uniones están en perfecto estado después del ensayo.
- Se escuchan signos sonoros de rotura en forma de *crackeos* según se desplaza el brazo de carga al aplicar los pesos.

Cuando un composite emite señales acústicas puede deberse a que hay fractura en la resina, en la fibra o incluso que dichos constituyentes se hayan separado, a pesar de ello, el composite puede emitir signos sonoros de rotura aun estando en un estado de carga dentro de lo admisible.

- Como se puede ver, en todos los casos, la rotura del tubo se origina en la parte inferior de este. Esto es debido a que cuando se somete a determinada carga de flexión, la sección del tubo se ovala, por lo que se deja de cumplir una de las premisas para poder aplicar la teoría de viga de Euler-Bernouli. Este hecho se demuestra en la rotura ya que la parte el tubo que está trabajando a tracción es la inferior.

Ensayo de uniones tipo 3

En la *Figura 95* se muestra las imágenes asociadas a la rotura de la unión 3.1, en la *Figura 96* se muestran las de la unión 3.2 y en la *Figura 97* las de la unión 3.3.



Figura 95: Rotura de probeta 3.1. (a) En dispositivo de ensayo. (b) Posterior al ensayo

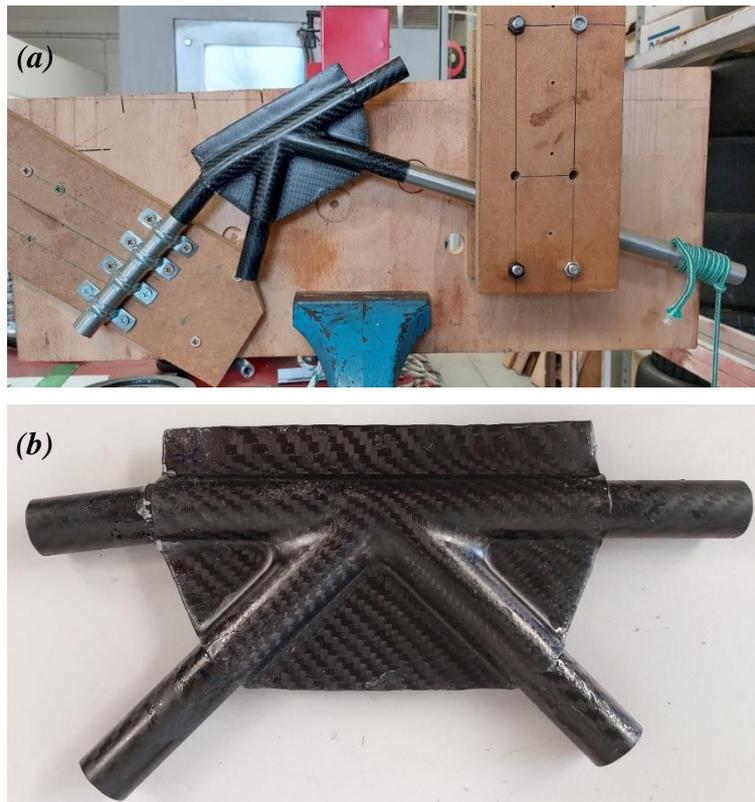


Figura 96: Rotura de probeta 3.2. (a) En dispositivo de ensayo. (b) Posterior al ensayo

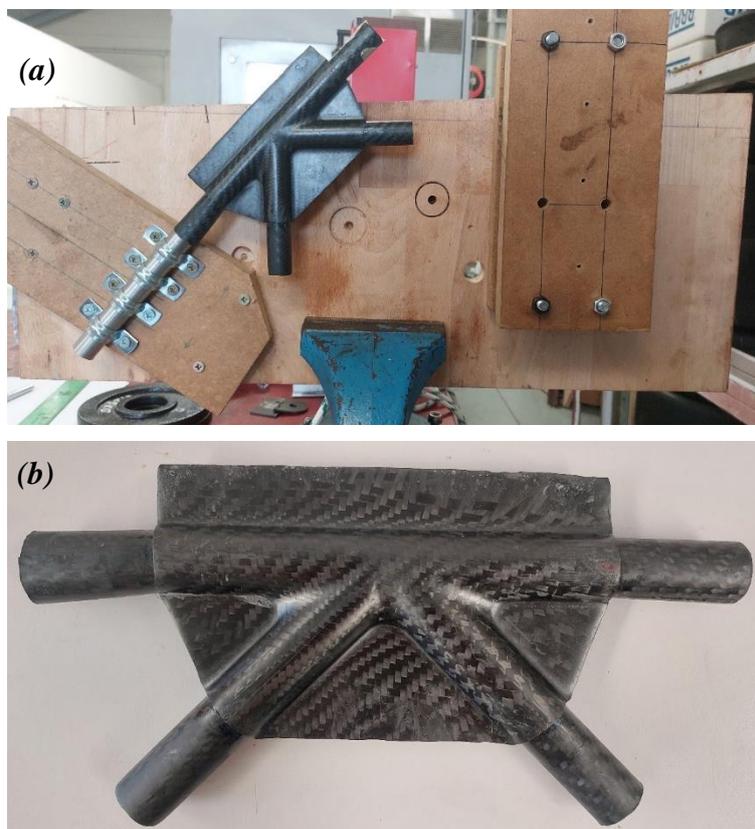


Figura 97: Rotura de probeta 3.3. (a) En dispositivo de ensayo. (b) Posterior al ensayo

A continuación se exponen las cargas de rotura de todas las probetas ensayadas de este tipo (*Tabla 17*).

	Unión 3.1	Unión 3.2	Unión 3.3
Carga de rotura [kg]	20,67	17,37	17,37
Momento de rotura [kg m]	10,54	8,86	8,86

Tabla 17: Cargas de rotura de las uniones tipo 3

Observaciones:

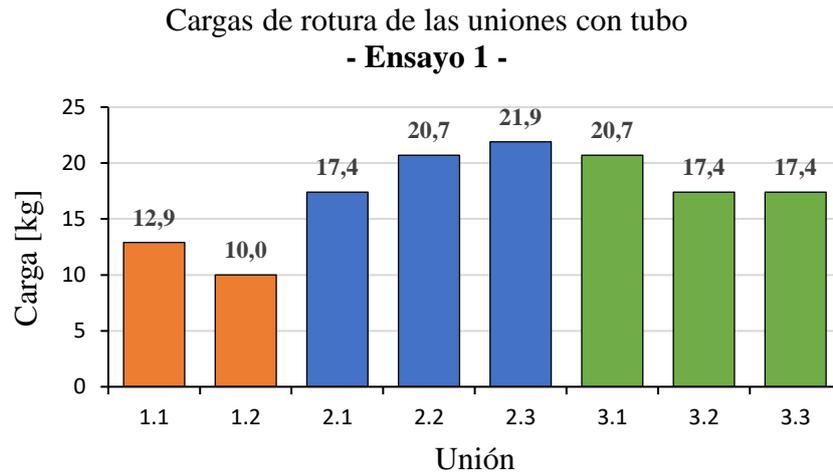
- Se alcanza el fallo en cargas similares a las de las probetas tipo 2. Al igual que antes, en ningún caso la unión ha fallado, sino que el elemento limitante ha sido otro.
- En el caso de la unión 3.2, ha fallado el adhesivo ya que el tubo se separa de la unión, tal como se observa en la *Figura 98*. Además, se ha producido rotura del tubo en la parte que se encuentra en el interior de la unión.



Figura 98: Rotura del adhesivo en la unión 3.2

- Nuevamente, según se aplica la carga y se generan desplazamientos, hay signos sonoros de rotura en forma de *crackeos*.
- Una vez más, la rotura del tubo se presenta en la parte inferior, fruto del ovalamiento de la sección.

A modo comparativo, en la *Gráfica 1* se muestra un diagrama de barras donde se comparan las distintas cargas de rotura alcanzadas durante el ensayo.



Gráfica 1: Comparativa de cargas de rotura (Ensayo 1)

Debido a que las uniones tipo 1 han llegado a rotura y su resistencia ha sido menor que la del tubo, se descartan completamente, considerándose como no aptas para ser empleado en estructuras tubulares de carbono.

En cuanto al resto de uniones, se observa como las cargas de rotura se encuentran muy próximas entre sí, obteniéndose una carga media de rotura de **19,3 kg**. A pesar de que la carga máxima se encuentra en la unión 2.3, aún no se puede concluir que tipo de unión es la que presenta más resistencia, ni cual es la óptima, ya que el elemento limitante en todas y cada una de ellas ha sido el tubo de carbono.

8.2.3 Ensayo 2: Comprobación de la resistencia del tubo

Como se ha mencionado con anterioridad, alguno de los tubos que fueron introducidos en las uniones, tuvieron que ser lijados para ajustar la tolerancia entre el diámetro interior de la unión y el exterior del tubo. Este hecho podría haber debilitado su resistencia y por tanto alcanzar la rotura con menos peso.

La finalidad del presente ensayo es comprobar cuál es la resistencia real del tubo sin haber sido mecanizado superficialmente. Para ello se emplea el mismo dispositivo de ensayo, pero orientándolo de tal manera que el brazo restringido se encuentre horizontal, pudiendo someter al tubo a flexión. Se seguirá empleando el brazo de carga del ensayo anterior para aplicar las cargas sobre el tubo. El dispositivo se muestra en la *Figura 99*.



Figura 99: Dispositivo de ensayo de resistencia del tubo

Ambos brazos de acero se introducen 5 cm dentro del tubo. Para evitar el ovalamiento de la sección del tubo en la parte restringida, se dispondrá de una abrazadera (*Figura 100*).



Figura 100: Abrazadera para evitar el ovalamiento de la sección

En la *Tabla 18* se muestra la información relativa a los tubos objeto de ensayo mientras que en la *Tabla 19* se muestran las cargas de rotura y los desplazamientos alcanzados en cada uno de ellos.

Número de tubos ensayados	4
Longitud [cm]	25
Diámetro exterior [mm]	20
Espesor [mm]	1
Distancia de momento [cm]	44

Tabla 18: Características de tubos objeto de ensayo

Tubo	Carga rotura [kg]	Desplazamiento [cm]*	Momento [kg cm]
1	22,55	1,9	992,2
2	22,55	1,7	992,2
3	19,95	1,5	877,8
4	22,55	1,7	992,2

Tabla 19: Resultados de los ensayos en tubos

**Dicho valor corresponde con el desplazamiento alcanzado a la máxima carga durante el ensayo, medido aproximadamente en la mitad del tubo.*

En 3 de los tubos ensayados, el fallo se alcanza porque se considera que el tubo se ha deformado de tal manera que no es posible que pueda emplearse así en una estructura. En la *Figura 101* se ilustra la deformación que se ha alcanzado, observándose como el brazo de acero ejerce cierto punzonamiento sobre el tubo a medida que este se desplaza verticalmente. Por tanto, no se alcanza una rotura como tal en dichos ensayos, pero se considera en cualquier caso que se ha alcanzado el fallo del material. Una vez se deja de aplicar la carga, el tubo no recupera su forma original, es decir, se ha deformado plásticamente.



Figura 101: Fallo alcanzado en 3 de los ensayos en tubos

Por otro lado, en uno de los tubos se alcanzó la rotura del material por el mismo motivo, debido a la fuerza que ejerce el brazo de acero sobre las paredes interiores del tubo. En la *Figura 102* se muestra el único tubo que sufrió rotura del material.



Figura 102: Rotura de uno de los tubos de ensayo. (a) Vista frontal. (b) Vista lateral

A modo de conclusión, se observa como las cargas de rotura en este ensayo son ligeramente superior a las del ensayo anterior, fruto de los mecanizados superficiales realizados en los tubos que fueron introducidos en las uniones. Aun así, la diferencia de valores entre ensayos no es significativa.

8.2.4 **Ensayo 3: Comprobación de la resistencia de la unión**

A partir de los resultados anteriores, donde se comprueba que la resistencia del nudo es mayor que la de los tubos de carbono, se procede a comprobar la resistencia de la propia unión con el fin de determinar su carga de rotura.

Se emplea el mismo dispositivo experimental que el usado en los ensayos previos, aunque para este caso, se recorta el tubo de carbono que sobresale de la unión para introducir los brazos de acero directamente en ella.

La distancia entre la aplicación de la carga y la restricción de la unión es de 44 cm. Dicha distancia es la empleada para el cálculo del momento aplicado.

Debido a que las uniones **1.1** y **1.2** rompieron en el primer ensayo, se descartan definitivamente y no serán ensayadas nuevamente.

En la *Tabla 20* se recogen los saltos de carga seleccionados para este ensayo.

Registro	1	2	3	4	5	6	7
Carga [kg]	16,2	25,9	28,8	30,8	32,8	35,4	39,2
Momento [kg·m]	7,1	11,4	12,7	13,5	14,4	15,6	17,2

Tabla 20: Saltos de pesos seleccionados para el ensayo 3

Si alguna unión llega al registro 7 (39,2 kg), aunque no llegue a rotura, se considera como apta, ya que supone que la resistencia de la unión es más del doble que la de los tubos y no se forzará la rotura de esta. Una vez alcanzada dicha carga, se procede a aplicar una carga de impacto ligera para que en caso de que la unión estuviese a punto de romper y tuviera cierta inestabilidad, ésta ceda.

Ensayo de uniones tipo 2

En el caso de las uniones 2.1 y 2.2, han resistido toda la carga aplicada sin ninguna rotura que se aprecie visualmente. Sin embargo, durante la aplicación de la carga hay diferentes signos sonoros en forma de *crackeos* que indican que hay pequeñas roturas en el material. Así mismo, en cargas muy elevadas, se observa un claro ovalamiento de la sección donde se introduce el brazo restringido (*Figura 103*) así como se puede ver que dicho brazo genera punzonamiento sobre las paredes de la unión.



Figura 103: Ovalamiento de la sección en unión 2.2 (ensayo 3)

A diferencia de las uniones anteriores, la 2.3 si alcanza la rotura a cargas muy bajas (25,9 kg) debido al esfuerzo que ejerce el brazo restringido sobre la unión. En la *Figura 104* se observa la fisura generada, mientras que en la *Figura 105* se puede ver como también ha fallado el adhesivo que une las dos mitades, permitiendo que se separen las mismas.



Figura 104: Fisura de la unión 2.3 (ensayo 3)

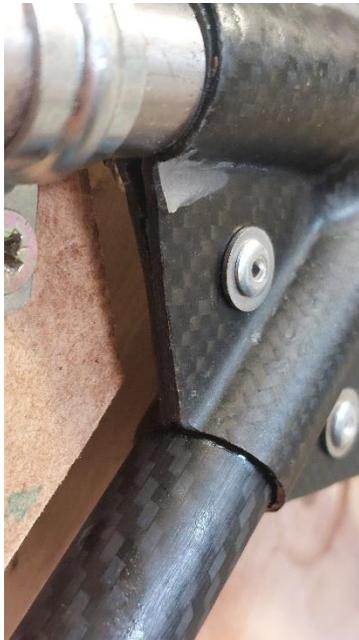


Figura 105: Separación de las 2 mitades unión 2.3 (ensayo 3)

En ambas imágenes se observa como la capa superficial de resina se ha roto, mostrándose con un color blanco. Se desconoce el motivo de la rotura a tan baja carga, pero podría deberse a algún error durante su fabricación.

En la *Tabla 21* se muestran las cargas soportadas para cada una de las uniones, así como el desplazamiento máximo alcanzado verticalmente. De igual manera, en la *Tabla 22* se expone el incremento del desplazamiento según se aplica la carga.

Unión	Carga soportada [kg]	Desplz. Vertical* [cm]
2.1	39,2	3,7
2.2	39,2	4,0
2.3	16,2	1,1

Tabla 21: Resultados de las uniones tipo 2 en el ensayo 3

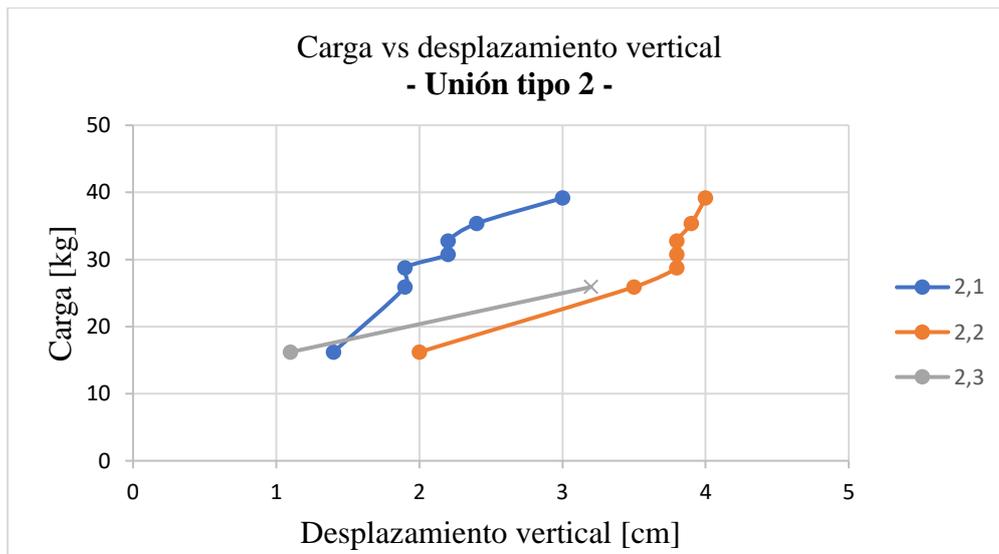
*Desplazamiento vertical medido en el punto de aplicación de la carga.

	1	2	3	4	5	6	7	8
Carga [kg]	16,2	25,9	28,8	30,8	32,8	35,4	39,2	Impacto
Desplz. unión 2.1 [cm]	1,4	1,9	1,9	2,2	2,2	2,4	3,0	3,7
Desplz. unión 2.2 [cm]	2,0	3,5	3,8	3,8	3,8	3,9	4,0	4,0
Desplz. unión 2.3 [cm]	1,1	Fallo	-	-	-	-	-	-

Tabla 22: Desplazamiento vertical al aplicar la carga, Probetas tipo 2 (ensayo 3)

En las tablas anteriores se observa como a excepción de la unión 2.3, las otras dos han soportado la misma carga y el desplazamiento ha sido prácticamente el mismo, siendo esto un resultado positivo ya que ambas uniones fueron fabricadas idénticamente.

En la *Gráfica 2*, se muestra una comparativa de las curvas *carga vs desplazamiento vertical* para las uniones tipo 2.



Gráfica 2: Carga frente desplazamiento (Uniones tipo 2)

Ensayo de las uniones tipo 3

Para el caso de la unión 3.1, esta ha llegado a la rotura al aplicarle una carga de 39,2 kg. La rotura se muestra en la *Figura 106.a*, en la que se observa que ha fallado debido a que se han separado las capas de fibra, es decir, ha fallado la resina interlaminar que las unía. La rotura está presente en la parte superior de la unión ya que es la parte que se encuentra a tracción durante el ensayo.



Figura 106: (a) Rotura de la unión 3.1 en el ensayo 3. (b) Rotura de la unión 3.2 en el ensayo 3

De igual manera, tal como se muestra en la *Figura 106.b*, la unión 3.2 ha roto de la misma manera y en la misma zona, aunque se ha despegado mayor superficie. La carga de rotura ha sido nuevamente 39,2 kg, aunque durante la aplicación de las cargas hubo presente mayores signos sonoros de rotura.

Este tipo de rotura es lógica, puesto que en la dirección normal al plano en el cual se disponen las capas de tejido de carbono, hay discontinuidad en el laminado. El brazo de acero junto al tubo de carbono interior genera un esfuerzo sobre la unión el cual es soportado en gran medida por la resina que une las capas, siendo dicho constituyente el más débil del laminado. Por lo tanto, no se está aprovechando completamente la resistencia que posee la fibra de carbono.

Este inconveniente no se encuentra presente en las uniones tipo 2 porque los remaches contribuyen a la resistencia de la resina y, por tanto, para generar la separación de las capas se debe superar el límite elástico del material del remache.

Por último, la unión 3.3 ha soportado toda la carga solicitada sin ningún tipo de rotura (*Figura 107*), aunque si se observan signos de deformación causados por el brazo de acero restringido sobre las paredes interiores de la unión.



Figura 107: Unión 3.3 con toda la carga aplicada en el ensayo 3

En la *Tabla 23* se muestran las cargas soportadas por cada una de ellas, así como el desplazamiento vertical máximo alcanzado. Así mismo, en la *Tabla 24* se muestra como aumenta el desplazamiento vertical según se aplica la carga.

Unión	Carga soportada [kg]	Desplz. Vertical [cm]*
3.1	35,35	2,8
3.2	35,35	3,4
3.3	39,15	4,3

Tabla 23: Resultados de las uniones tipo 3 en el ensayo 3

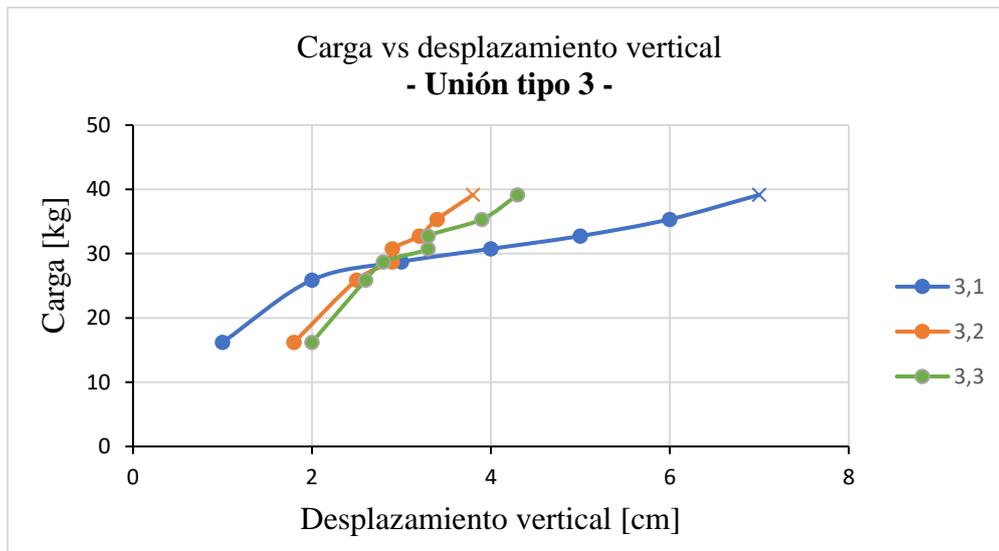
*Desplazamiento vertical medido en el punto de aplicación de la carga.

	1	2	3	4	5	6	7	8
Carga [kg]	16,2	25,9	28,8	30,8	32,8	35,4	39,2	Impacto
Desplz unión 3.1 [cm]	1,8	2,3	2,6	2,6	2,7	2,8	Fallo	-
Desplz unión 3.2 [cm]	1,8	2,5	2,9	2,9	3,2	3,4	Fallo	-
Desplz unión 3.3 [cm]	2	2,6	2,8	3,3	3,3	3,9	4,3	4,3

Tabla 24: Desplazamiento vertical al aplicar la carga, Probetas tipo 3 (ensayo 3)

Igualmente, las cargas soportadas en todas las uniones han sido parecidas, aunque los resultados no son tan positivos como en las uniones tipo 2 puesto que las cargas son ligeramente inferiores y se ha alcanzado la rotura de 2 de las 3 uniones.

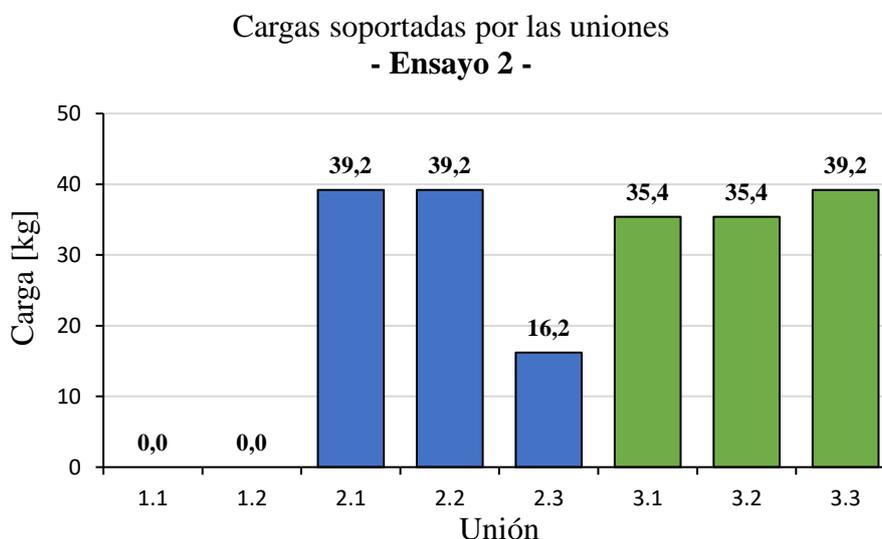
En la *Gráfica 3*, se muestra una comparativa de las curvas *carga vs desplazamiento vertical* para las uniones tipo 3.



Gráfica 3: Carga frente desplazamiento (Uniones tipo 3)

A diferencia de lo expuesto en el gráfico de las uniones tipo 2 (Gráfica 2), se observa como los desplazamientos son generalmente superiores. Esto es debido a que las uniones tipo 2 son más rígidas y permiten menos deformación debido a que los remaches contribuyen también a la rigidez de la unión. Además, debido al procedimiento de pegado de las uniones tipo 2, el espesor total de las cartelas es superior respecto a las tipo 3.

Finalmente, en el siguiente gráfico de barras (Gráfica 4) se comparan las cargas soportadas por cada una de las probetas a modo comparativo.



Gráfica 4: Comparativa de cargas soportadas por las uniones (Ensayo 2)

A pesar de que la unión 2.3 haya roto por cuestiones desconocidas, se observa como claramente las uniones tipo 2 son las que más resistencia proporcionan.

8.3 Resultados computacionales

Se procede a la simulación computacional del modelo de la unión mediante el software SolidWorks. Para ello, se realiza un estudio estático simulando el mismo estado de carga empleado en los ensayos experimentales.

8.3.1 Modelado mediante superficies compuestas

Los pasos seguidos para simular un modelo realizado mediante materiales compuestos en SolidWorks son los siguientes:

1. Diseño 3D que represente la geometría de la unión.
2. Convertir el modelo 3D en superficies, las cuales serán tratadas como superficies compuestas y se establecen los siguientes parámetros:
 - a. Número de capas.
 - b. Orientación de cada una de las capas.
 - c. Aplicar el material del laminado a cada una de ellas.
3. Aplicación de restricciones.
4. Aplicación de las cargas.
5. Creación de la malla (elemento de superficie) y ejecución de la simulación.

Se establece la orientación de las fibras lo más próxima al modelo real y se selecciona como material ortotrópico lineal el expuesto en la *Tabla 8*.

Acorde a la *Figura 108*, para las superficies 1, 2, 3 y siguiendo el sistema de referencia XY de dicha imagen, se establecen las siguientes propiedades para las superficies:

- **Espesor de la superficie:** 2 mm
- **Número de capas:** 16 capas de fibra (correspondiente a 8 capas de tela)
- **Espesor de cada capa:** 0,125 mm
- **Laminado ortotrópico:** [(0/90)₈]

Para el resto de las superficies, las siguientes propiedades:

- **Espesor de la superficie:** 1 mm
- **Número de capas:** 8 capas de fibra (correspondiente a 4 capas de tela)
- **Espesor de cada capa:** 0,125 mm
- **Laminado ortotrópico:** [(0/90)₄]

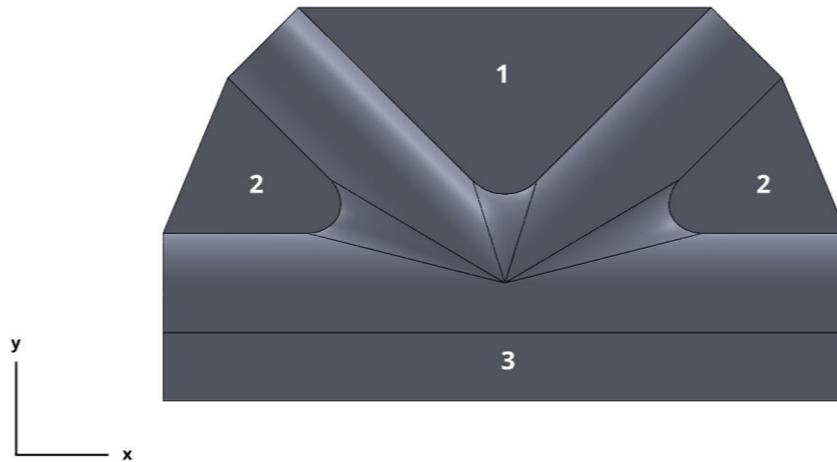


Figura 108: Identificación de superficies y sistema de referencia durante el estudio estático

Una vez establecidas las propiedades de cada una de las superficies, se establece una sujeción fija en uno de los brazos mientras que, en otro, se aplica una carga remota mediante unión rígida cuya fuerza se encuentra a la misma distancia y dirección que en el ensayo experimental (Figura 109).

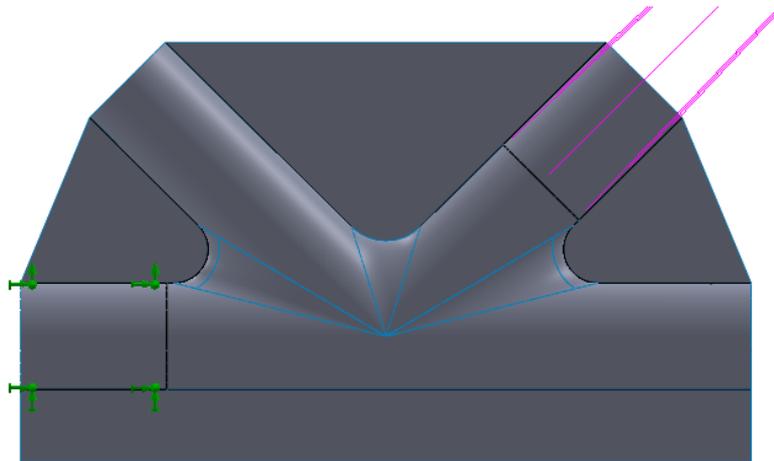


Figura 109: Restricciones y carga remota del estudio estático – Estudio superficies compuestas

Como la carga máxima soportada por las uniones en los ensayos experimentales ha sido de **39,2 kg**, se establece esta misma carga como inicial para el estudio estático y se aplica a la misma distancia de **44 cm** respecto a la restricción.

En la Figura 110 se muestra la malla con elementos de superficie. Se ha realizado un control de mallado más fino en las aristas correspondientes a los redondeos para tratar de mejorar los resultados.

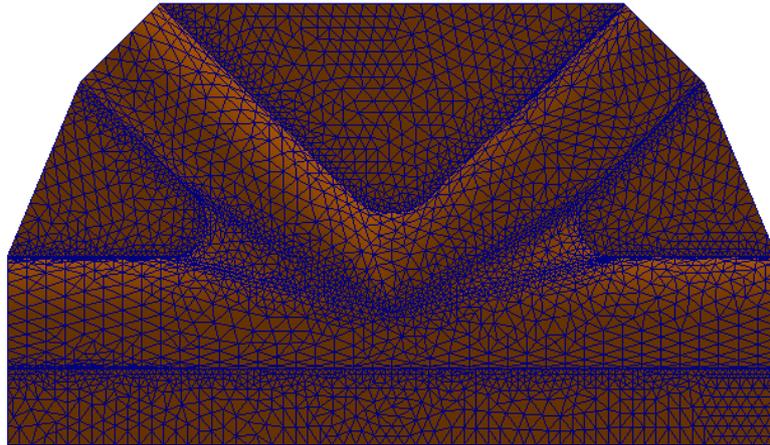


Figura 110: Malla – Estudio con superficies compuestas

Se prestará especial atención a los resultados relacionados con el FDS (Factor De Seguridad), para el cual se selecciona el criterio de Tsai-Hill, explicado en el *Anexo B*.

Para la interpretación de dichos resultados se sigue el siguiente criterio:

- **FDS > 1:** El material no ha fallado y se encuentra en un estado de carga admisible.
- **FDS = 1:** El material ha comenzado a fallar en dicha ubicación.
- **FDS < 1:** En esta ubicación, el material ha fallado.

En los resultados expuestos en la *Figura 111*, se puede observar como el valor mínimo del FDS es anormalmente bajo ($0,0765$), indicando que el material ha fallado superando con creces la resistencia del material.

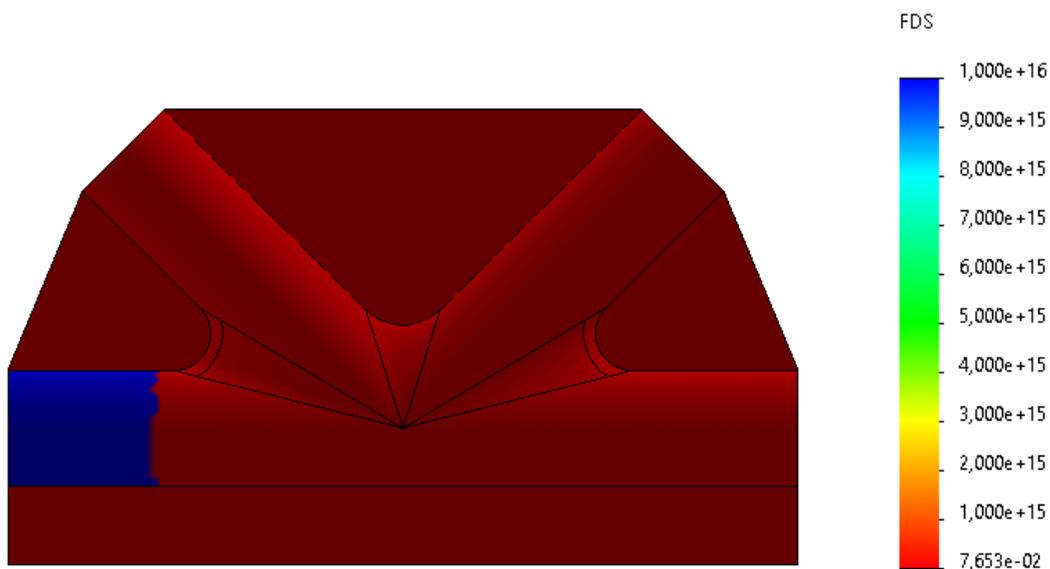


Figura 111: Resultados FDS - Estudio con superficies compuestas

Para poder analizar las regiones donde falla el material, se limita el valor máximo del FDS a la unidad para que únicamente se muestren las regiones con un valor inferior. La mayoría de estos valores se encuentran en las aristas asociadas a los redondeos y justo donde convergen 2 o más superficies del modelo (*Figura 112*).

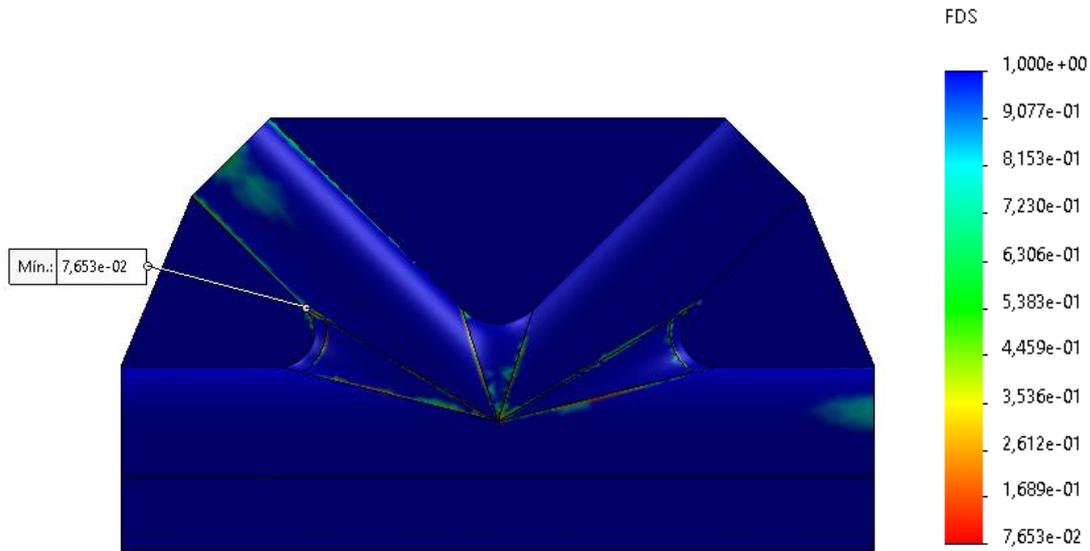


Figura 112: Localización de los valores FDS < 1 - Estudio con superficies compuestas

La causa principal de este error es que el software interpreta que hay discontinuidad en las fibras justo en las aristas mencionadas. A modo ilustrativo, en la *Figura 113*, se muestra la orientación de las fibras de 2 regiones contiguas, donde se observa como la orientación de las fibras, a pesar de tener la misma dirección, no se disponen sobre la superficie de la misma manera.

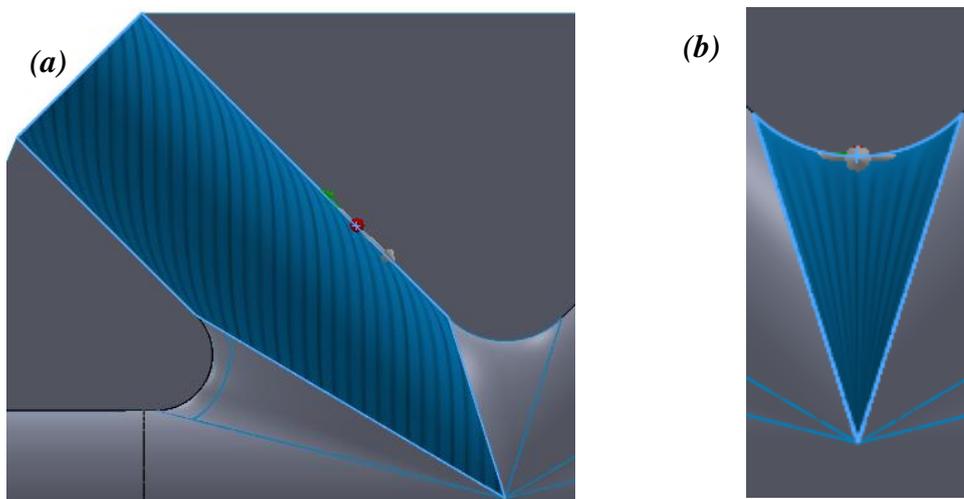


Figura 113: Orientación de las fibras en superficies compuestas contiguas (a) y (b)

En vista de los resultados, se descarta este modelo computacional.

8.3.2 Modelado mediante superficies delgadas cuasi-isotrópicas

A modo de alternativa, se aproxima el estudio al de un laminado cuasi-isotrópico donde no se establezcan las orientaciones de las capas, sino que las superficies se trataran como superficies delgadas con el mismo espesor que las anteriores.

En la *Tabla 25* se exponen las propiedades del material cuasi-isotrópico (carbono/epoxi) empleado.

Resistencia a tracción [MPa]	552
Módulo de elasticidad [GPa]	55
Coefficiente de Poisson* [-]	0,3
Módulo cortante* [MPa]	5000
Límite elástico [MPa]	497

Tabla 25: Propiedades de material cuasi-isotrópico (carbono/epoxi). [4] [1]

**Las propiedades que se indican han sido completadas con alguna de las propiedades de la Tabla 9.*

Se establecen las mismas condiciones que en el estudio estático anterior. Para este caso, se aplica el criterio de Von Mises al tratarse como un material isotrópico.

En la *Figura 114* se muestra la distribución de tensiones de Von Mises sobre el modelo, donde se observa el punto de máxima tensión, el cual supera el límite elástico del material.

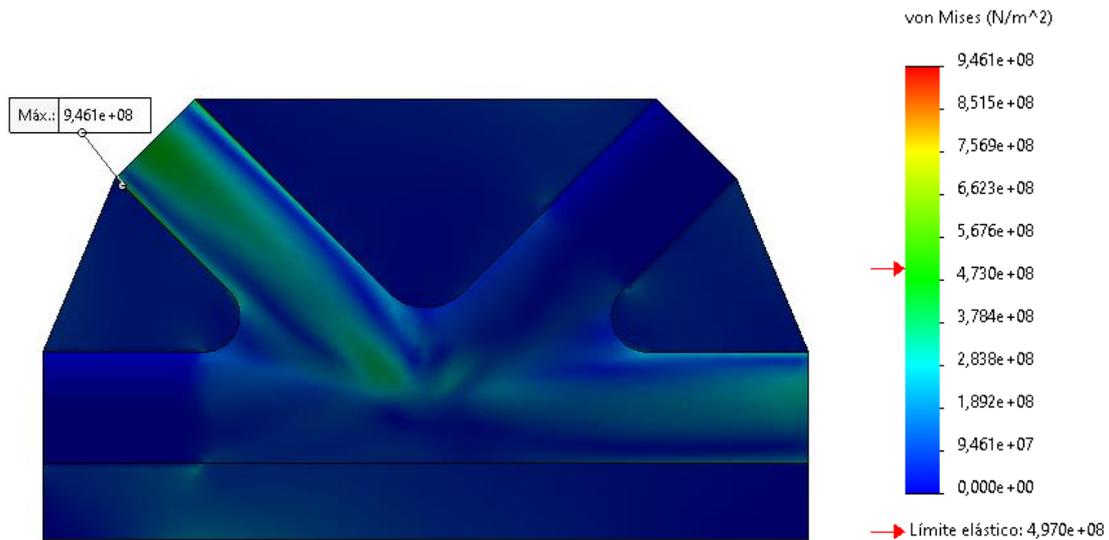


Figura 114: Tensiones de Von Mises – Estudio con superficies delgadas

En la perspectiva de la *Figura 115*, se observa como las tensiones elevadas son originadas porque la superficie de la cartela se clava sobre la superficie del brazo.

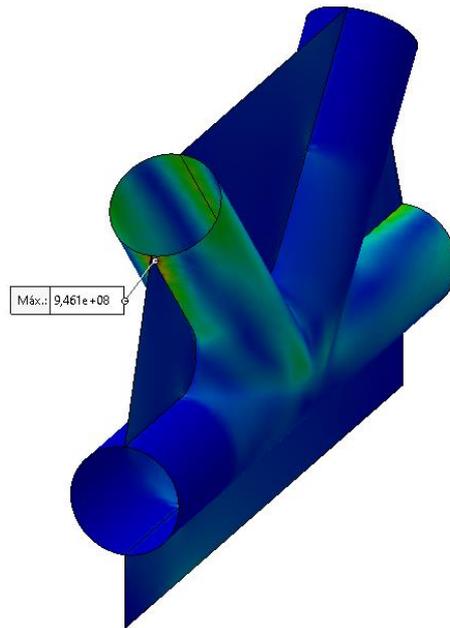


Figura 115: Perspectiva con tensiones de Von Mises – Estudio con superficies delgadas

Se descarta este modelo computacional y se busca una alternativa que se adapte con mayor fidelidad al modelo real.

8.3.3 Modelado mediante elemento sólido

Se emplea un modelo tridimensional que será tratado como sólido en el estudio estático. Se considera el mismo material empleado anteriormente, correspondiente a un laminado cuasi isotrópico (Tabla 25).

En la Figura 116 se muestra el modelo tridimensional, que como se puede observar, se han redondeado todas las aristas de contacto de las cartelas.

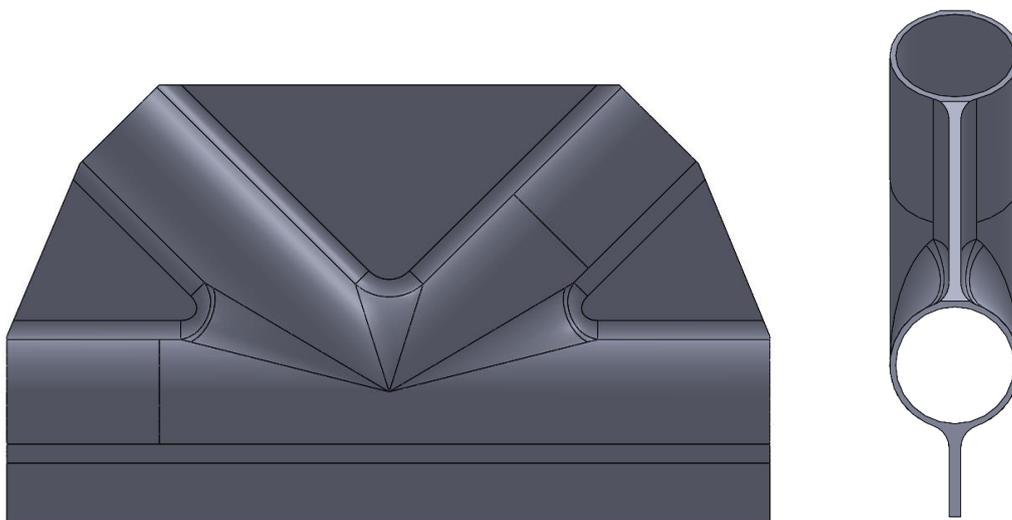


Figura 116: Modelo 3D – Estudio con modelo sólido

Nuevamente, se muestran las tensiones de Von Mises (Figura 117), donde se observa que, a pesar de haberse mejorado los resultados, el punto crítico sigue en la misma zona.

Esto es debido a que el modelo no es capaz de representar bien dicha región y muestra tensiones elevadas por el punzonamiento de la cartela. En el modelo real, la cartela no ejerce ese punzonamiento porque ambas superficies son continuas. Se omite el fallo del material en dicha región.

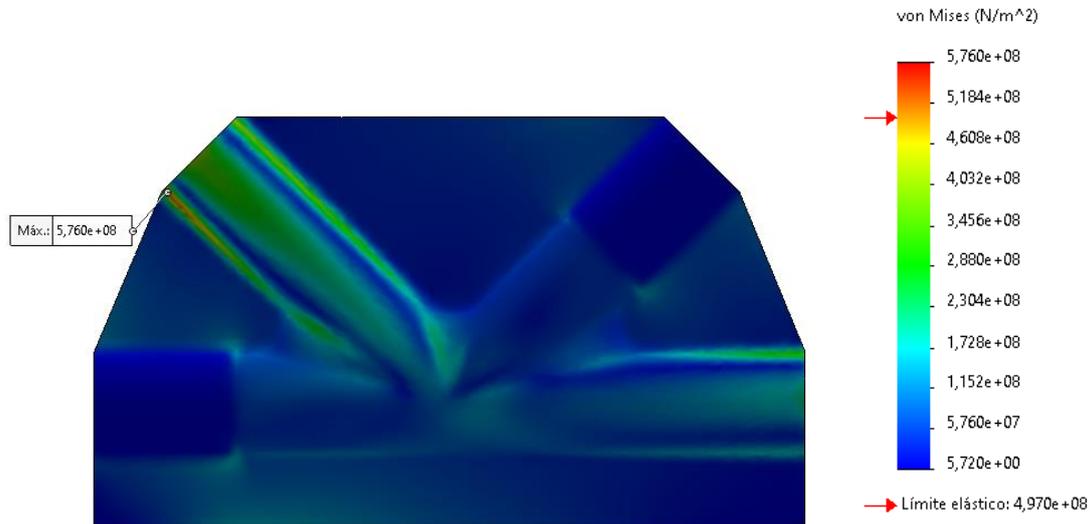


Figura 117: Tensiones Von Mises – Estudio con modelo sólido

Haciendo referencia a la rotura observada en los ensayos experimentales donde las capas de fibra se separan entre sí (véase la ***¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.*** d el apartado 8.2.4), en el modelo computacional las tensiones alrededor de dichas regiones deberían ser las máximas.

En el modelo real, al ovalarse ligeramente la sección en donde se introduce el brazo de carga, éste se clava sobre las paredes, ejerciendo la carga sobre 2 regiones interiores de la unión, provocando el fallo de la resina. Este hecho se observa con mayor facilidad en las tensiones normales a la dirección Z (normal al plano que contiene la unión), mostradas en la *Figura 118*, donde se observa que alrededor del tubo de carga las tensiones no son las máximas.

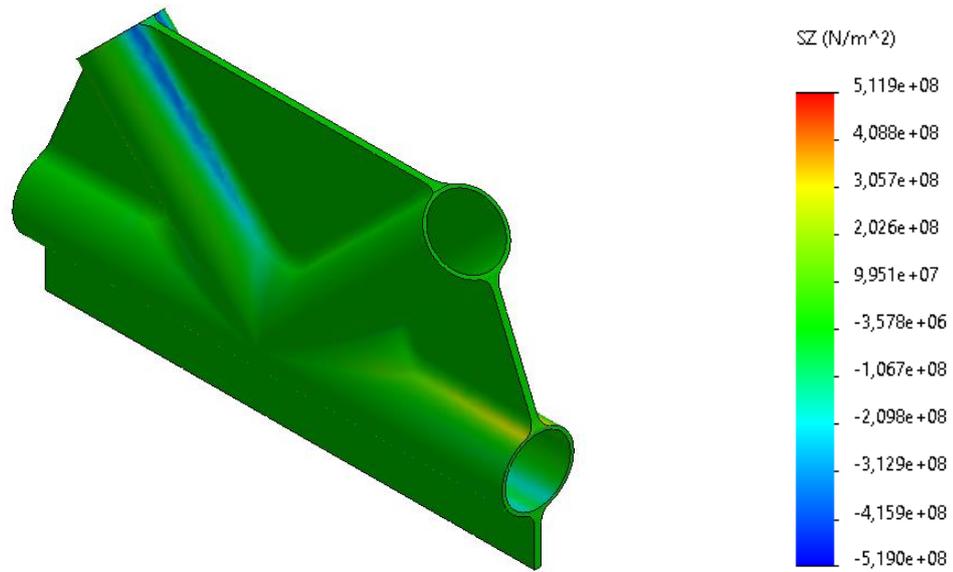


Figura 118: Tensiones normales a Z – Estudio con modelo sólido

Para tratar de ajustar el modelo a la realidad, se modifica la carga remota y se establece una conexión distribuida. Esto provoca que en el brazo de carga haya mayores tensiones ya que no se encuentra la sección completamente rigidizada.

Ahora, en las tensiones normales a Z (Figura 119) se muestra como aparecen tensiones en dichas regiones, pero cuyos valores no reproducen las tensiones esperadas.

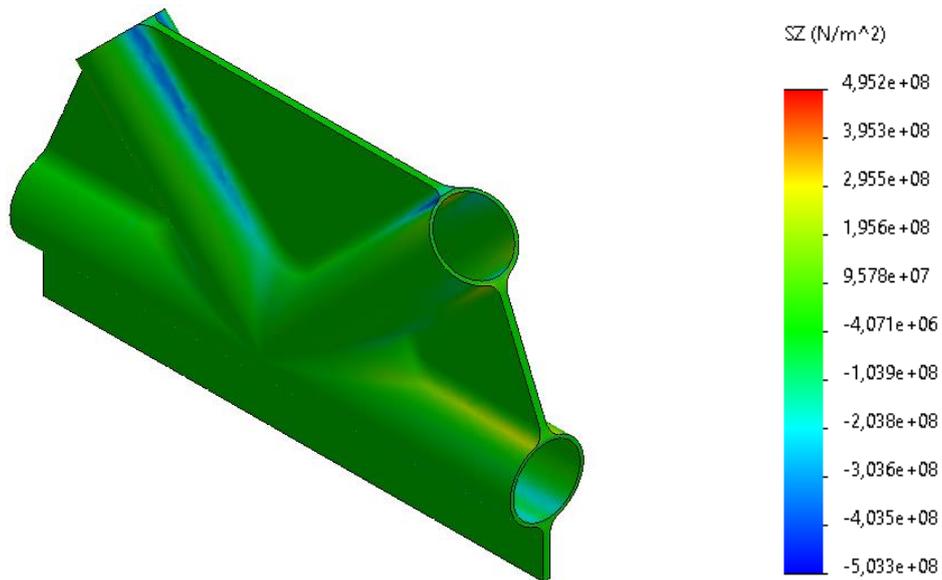


Figura 119: Tensiones normales a Z (carga con conexión distribuida) – Estudio con modelo sólido

La conexión rígida provoca que la sección donde se introduce el brazo de acero no se deforme. Para el caso de la conexión distribuida, tal como se muestra en la deformada de la Figura 120, si se deforma la sección, aunque no representa el ovalamiento que debería producirse.

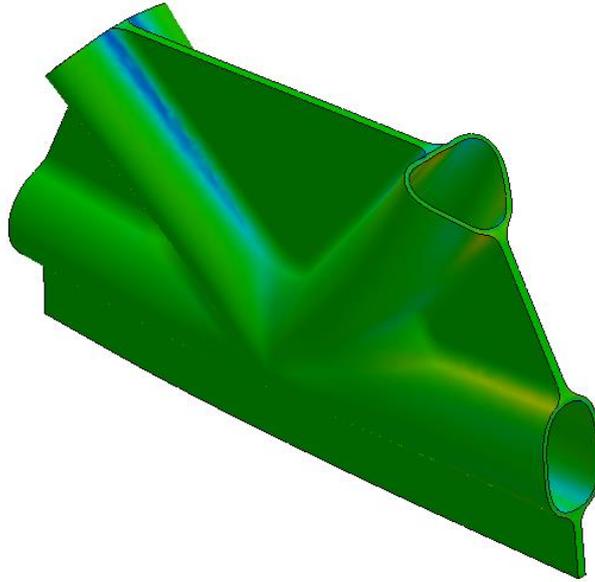


Figura 120: Deformada (carga con conexión distribuida) – Estudio con modelo sólido

Se plantea una modificación sobre el modelo computacional. Se modifica la superficie asociada a la carga distribuida, creando 2 regiones que simulan las superficies donde el contacto del brazo de acero genera mayores esfuerzos.

En la *Figura 121*, se muestra en vista de sección las 2 regiones mencionadas. Siendo el momento antihorario respecto al plano de la unión, tal y como está posicionada en la imagen, el brazo de carga genera un esfuerzo en la región 1 y su extremo se clava sobre la región 2.

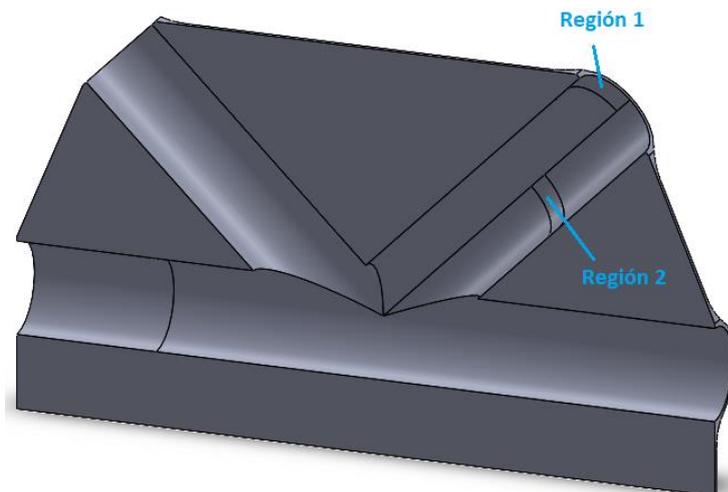


Figura 121: Regiones de sujeción de la carga remota – Estudio con modelo sólido

Estableciendo dichas regiones como sujeción para la carga remota y nuevamente suponiendo una conexión rígida, se obtienen los resultados de la *Figura 122*.

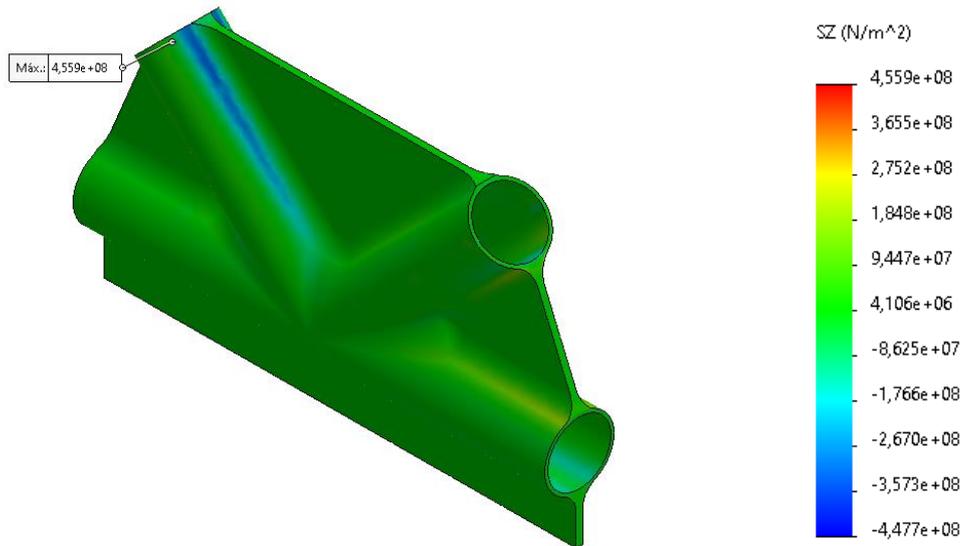


Figura 122: Tensiones normales a Z (sujeción mediante 2 regiones) – Estudio con modelo sólido

El valor máximo sigue sin estar presente en la región esperada y nuevamente la distribución de las tensiones alrededor del brazo de carga sigue sin ser parecida a la realidad, por lo que se descarta el modelo actual.

8.3.4 Modelado mediante ensamblaje

Se plantea un modelo alternativo con el que se espera que los esfuerzos que genera el brazo de acero sobre la unión se representen acorde a la realidad.

Se realiza un modelo tridimensional mediante el ensamblaje de 2 componentes (Figura 123):

- La geometría de la unión como cuerpo sólido (material cuasi-isotrópico)
- Brazo de acero (acero)

Estableciendo un contacto global sin penetración entre ellos, se simula el mismo estado de carga que en los modelos anteriores. Para reducir los tiempos de simulación, se representa una pequeña parte del brazo de acero y se aplica una carga distribuida a la distancia correspondiente.

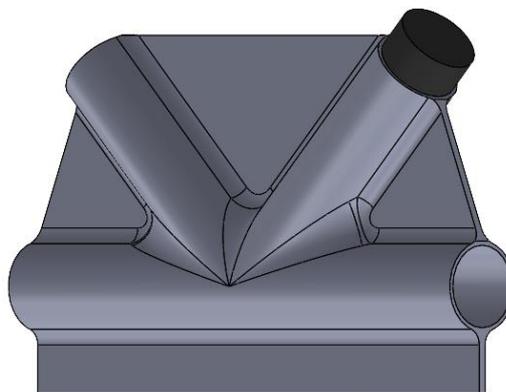


Figura 123: Modelo para simulación mediante ensamblaje

En la *Figura 124* se muestran las tensiones de Von Mises. Se observa como la tensión máxima ya no se encuentra en la misma zona que en los estudios anteriores, sino que ahora corresponde con una de las regiones próximas a las cartelas que llegaron al fallo en alguno de los ensayos experimentales. Esta tensión máxima, supera el límite elástico y la resistencia a tracción del material.

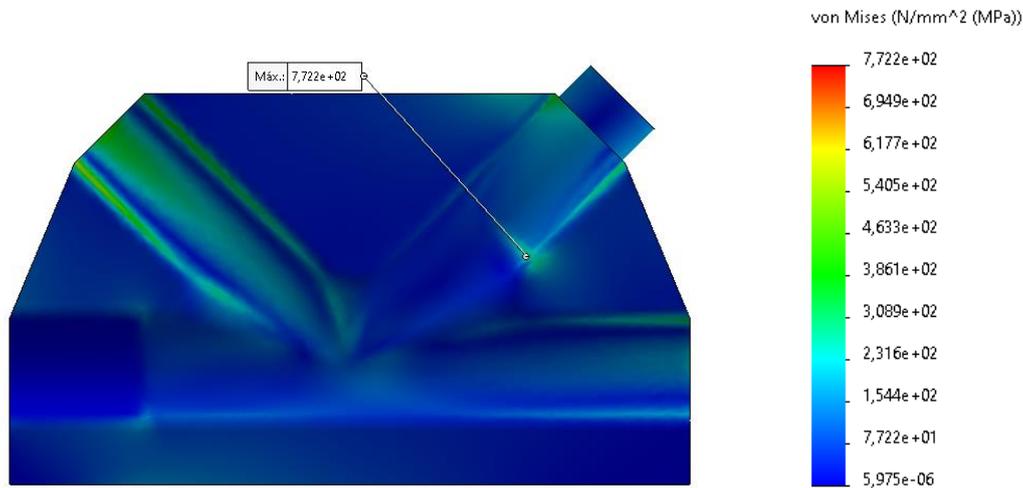


Figura 124: Tensiones de Von Mises - Modelado mediante ensamblaje

A continuación, se muestran los resultados con las tensiones normales a Z (*Figura 125*).

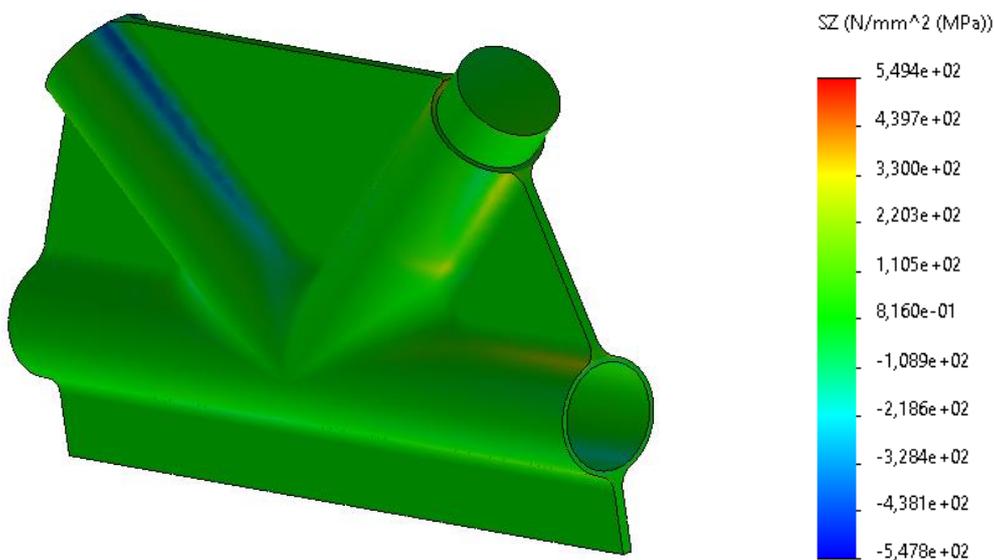


Figura 125: Tensiones normales a Z - Modelado mediante ensamblaje

Ahora si se muestra como acorde a la dirección del momento, se encuentra una concentración de tensiones en la cartela superior en una región próxima al brazo de acero, una de las regiones donde las fibras se separan en el ensayo experimental.

Para estudiar dicha región, se compara la tensión en la dirección Z de ese punto con la resistencia a tracción de la resina empleada, debido a que, al separarse las fibras, el elemento resistente que ha llegado a la rotura es la resina.

En la *Figura 127*, se observa el valor de la tensión en uno de los nodos corresponde con **430 MPa**, siendo el valor de resistencia a tracción de la resina de únicamente **55 MPa** (véase las propiedades de la resina en la *Tabla 6*), por lo que efectivamente, la resina llega a la rotura en dicha región.

En la *Figura 126*, se muestra la deformada. Se aprecia como la sección se ha ovalado ligeramente, reproduciendo exactamente el comportamiento esperado.

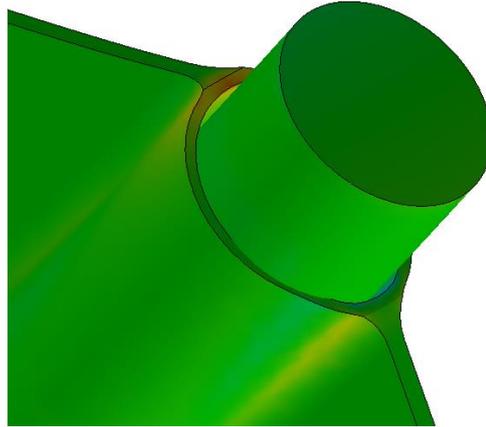


Figura 126: Sección ovalada (deformada) – Modelado mediante ensamblaje

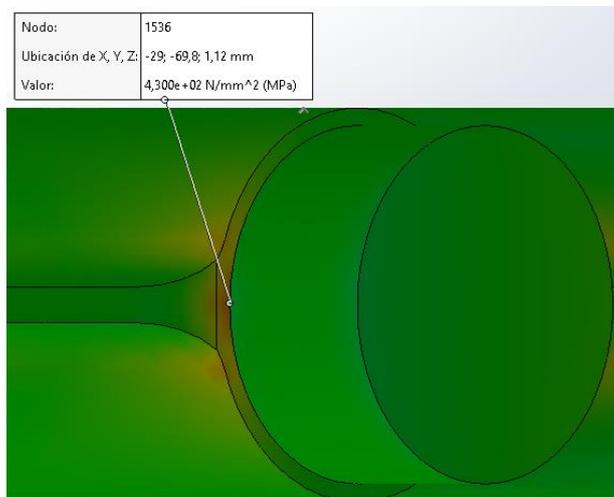


Figura 127: Valor de tensión normal a Z es la región de fallo – Modelado mediante ensamblaje

Dentro de las aproximaciones y las limitaciones del modelo, se consideran estos resultados como válidos, siendo los más próximos a la realidad.

En cuanto a los desplazamientos resultantes mostrados en la *Figura 128*, se observa como el orden de magnitud de estos no corresponde con los desplazamientos medidos en los ensayos experimentales.

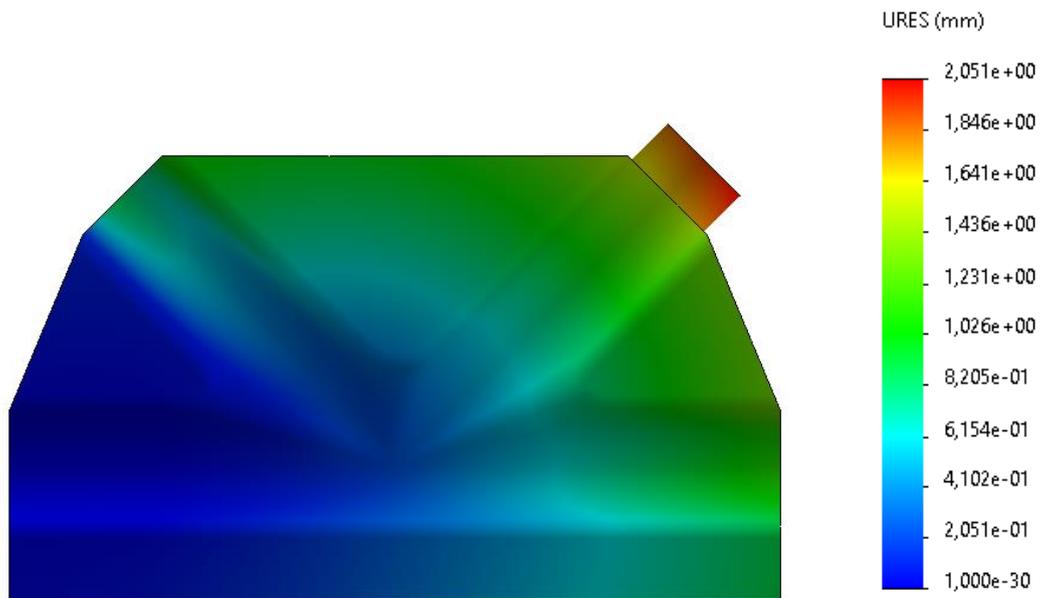


Figura 128: Desplazamientos resultantes – Modelado mediante ensamblaje

En modelo computacional presenta mayor rigidez que el real ya que, al haberse construido las uniones de manera manual, es normal que existan diversos problemas de fabricación que no están presentes en la idealización del modelo computacional.

9. Conclusiones

9.1 Conclusiones de los métodos de fabricación

A continuación, se mencionarán las principales ventajas y desventajas extraídas durante el procedimiento experimental acerca de los distintos métodos de fabricación.

- **Método de fabricación 1:** Basado en fundas tubulares de carbono

MÉTODO DE FABRICACIÓN 1

Ventajas	Inconvenientes
<ul style="list-style-type: none"> • No hay necesidad de recortar patrones de tela previo al laminado. 	<ul style="list-style-type: none"> • Limitado número de capas de fibra. • Imposibilidad de variar la orientación de las fibras. • Mal acabado superficial debido a la rugosidad que se genera. • Complejidad de fabricación debido a la necesidad de emplear hilo. • Dificultad para colocar los consumibles necesarios para el vacío.

- **Método de fabricación 2:** Basado en el laminado de 2 mitades y posteriormente unidad mediante resina y remache.

MÉTODO DE FABRICACIÓN 2

Ventajas	Inconvenientes
<ul style="list-style-type: none"> • Buen acabado superficial después del desmoldeo. • Fácilmente replicable gracias al uso de moldes, que, además, son reutilizables. • El proceso de laminación es muy sencillo. • Facilidad para ajustar la tolerancia respecto al tubo. • Se puede variar y optimizar la orientación de las fibras con facilidad y establecer el espesor de laminado deseado. 	<ul style="list-style-type: none"> • Se deben realizar 2 laminados independientes para formar una unión. • Hay que realizar tareas posteriores para formar la unión (lijado interno, pegado con resina, taladrado, remachado...)

- **Método de fabricación 3:** Basado en el laminado de la unión mediante molde y contramolde con un núcleo hidrosoluble interior.

MÉTODO DE FABRICACIÓN 3

Ventajas	Inconvenientes
<ul style="list-style-type: none"> • Buen acabado superficial después del desmoldeo. • Fácilmente replicable gracias al uso de moldes que además son reutilizables. • El proceso de laminación es muy sencillo. • Se puede variar y optimizar la orientación de las fibras con facilidad y establecer el espesor de laminado deseado. • La unión se fabrica mediante un único procedimiento de vacío y no es necesaria ninguna operación posterior. 	<ul style="list-style-type: none"> • El PVA es complejo de imprimir y su acabado superficial es muy irregular. • El control de la tolerancia diametral es muy complejo; en todas las uniones fabricadas, el diámetro interior final fue menor al estipulado.

Se concluye que:

- El método de fabricación 1 no es conveniente para este tipo de uniones por las desventajas mencionadas previamente.
- Los métodos de fabricación 2 y 3 son totalmente adecuados para el fin con el que fueron diseñadas las uniones debido a su fácil reproducción y sencillez constructiva.
- El método de fabricación 2, en comparación con el 3, presenta un coste económico mayor debido a la adición de los remaches, aunque esto no presenta una diferencia muy significativa.

9.2 Conclusiones de los resultados

Haciendo referencia a los resultados expuestos en el apartado 8. *Análisis de resultados*, se extraen las siguientes conclusiones.

9.2.1 **Conclusiones de los resultados experimentales**

- El procedimiento experimental realizado permite la repetibilidad del proceso, consiguiendo buenos resultados.
- Las uniones tipo 1 (realizadas mediante el método de fabricación 1) son inviables debido a su poca resistencia en presencia de cargas de flexión, consecuencia de un mal método de fabricación.
- Las uniones tipo 2 (realizadas mediante el método de fabricación 2) son las que mayor resistencia presentan debido a que los remaches contribuyen a que no se separen ambas mitades que conforman la unión.
- Las uniones tipo 3 (realizadas mediante el método de fabricación 3) presentan debilidad por la discontinuidad de la fibra de carbono en el plano interlaminar, por lo que dos de ellas han fallado debido a la separación de sus capas, consecuencia de superar la resistencia a tracción de la resina. En general la resistencia obtenida, a pesar de no ser baja, es inferior a las uniones tipo 2.
- A excepción de las uniones tipo 1, el resto han soportado mayor carga que el tubo de fibra de carbono.
- Los tubos de fibra de carbono introducidos en las uniones presentan ligeramente menor resistencia que el tubo sin mecanizar, aunque la diferencia no es significativa y, por tanto, no interfiere en los resultados.

Se concluye que:

A excepción de las uniones tipo 1, el resto de las uniones han resistido mayor carga que el tubo de carbono, por lo que serían completamente aptas, desde el punto de vista de la carga que soportan, con el fin para el que se han diseñado.

9.2.2 **Conclusiones de los resultados computacionales**

- El modelado mediante superficies compuestas otorga malos resultados debido a las limitaciones que presenta SolidWorks para la simulación de materiales compuestos con geometrías con cierta complejidad.
- Se descarta el modelo basado en superficies delgadas cuasi-isotrópicas, así como el modelo sólido con carga remota, ya que no representa la distribución de tensiones no es acorde con el fallo real de las uniones.
- Los resultados obtenidos con el modelado mediante contacto entre componentes (ensamblaje) muestran los resultados más próximos a la realidad, obteniendo una distribución de tensiones iguales a las obtenidas en los ensayos experimentales y observándose el mismo comportamiento del material.

10. Líneas futuras de trabajo

Expuestas las conclusiones previas y vistos los resultados experimentales para cada una de las probetas, se plantea como futura líneas de trabajo mantener uno de los procesos de fabricación y realizar un análisis más exhaustivo.

Se propone mantener el método de fabricación 2, cuyas uniones han provisto los mejores resultados, con las siguientes modificaciones y/o mejoras:

- Emplear moldes de mayor calidad, ya sean de aluminio mecanizados o de silicona/epoxi para moldes.
- Realizar los ensayos en una máquina de ensayo de laboratorio, donde puedan registrarse de manera más precisa los valores de carga y desplazamientos.
- Realizar probetas normalizadas para que sean ensayadas según describa la norma correspondiente, para obtener las propiedades mecánicas del material.
- Aumentar el número de uniones objeto de estudio.

Una vez mejorado el proceso constructivo y de ensayo se plantean las siguientes líneas de investigación:

- Estudio de la resistencia a modo de comparativa entre una unión soldada tradicional del mismo tipo respecto a la realizada en carbono.
- Estudio de la variación de la resistencia en función de la orientación de las fibras y la optimización de dicha orientación en función del estado de cargas. Así mismo, estudiar el incremento de resistencia según se aumenta el número de capas para optimizar la cantidad de material necesario.
- Estudio de la influencia del tamaño de las cartelas en la resistencia de la unión.
- Realización de distintos ensayos donde se someta la unión a diferentes estados de carga.
- Estudiar la interacción de la unión realizada en fibra de carbono con tubos de distinto material, para estudiar la viabilidad de unir tubos de acero o aluminio con carbono.

Lista de figuras

Figura 1: Idea de la unión llevada a cabo.....	4
Figura 2: Unión de aluminio 6061-T6.....	6
Figura 3: Nudo carbono 3 vías.....	6
Figura 4: Nudo carbono 5 vías.....	6
Figura 5: Tipos de composites reforzados con fibra.....	8
Figura 6: Fibra de carbono (hilo) 3K.....	9
Figura 7: Tejido de carbono unidireccional (a) y bidireccional (b).....	10
Figura 8: Tipos de ligamento. Tafetán (a) y sarga (b).....	10
Figura 9: Tipos de ligamento. Raso (a) y canasta (b).....	11
Figura 10: Fibra de carbono sin tejer (a) y fibra de carbono cortada (b).....	11
Figura 11: Esquema de orientación de capas. Laminado cuasi-isotrópico.....	13
Figura 12: Estructura tipo sándwich.....	14
Figura 13: Colocación óptima de las fibras ante carga unidireccional.....	14
Figura 14: Tubo de carbono seleccionado.....	15
Figura 15: Longitudes de los brazos de la unión (Unidades en mm).....	16
Figura 16: Modelo 3D para impresión en material hidrosoluble.....	17
Figura 17: Cartelas que se dejarán en el contorno de la geometría (en rojo).....	17
Figura 18: Molde negativo.....	18
Figura 19: Tapa para el molde negativo.....	18
Figura 20: Representación del procedimiento de fabricación con molde negativo y tapa.....	18
Figura 21: Molde/contramolde para núcleo hidrosoluble.....	19
Figura 22: Vista explosionada de moldes y núcleo.....	19
Figura 23: Esquema de sección del proceso de fabricación 3.....	20
Figura 24: Tejido de fibra de carbono seleccionado.....	21
Figura 25: Manga tubular de carbono.....	21
Figura 26: Resina epoxi CLR.....	22
Figura 27: Endurecedor CLF.....	22
Figura 28: Filamento PLA.....	23
Figura 29: Filamento Innovatefil Hidrosoluble.....	23
Figura 30: Método de laminado húmedo.....	24
Figura 31: Moldeo de composites por compresión.....	24
Figura 32: Bomba de vacío empleada en el proyecto.....	26

Figura 33: Esquema de consumibles en método a vacío.....	26
Figura 34: Ensayos para la obtención de propiedades mecánicas del lamiando	27
Figura 35: Patrones de relleno P1 a P8	29
Figura 36: Patrones de relleno P9 a P12	30
Figura 37: Probetas sometidas a vacío	30
Figura 38: Cera desmoldeante.....	31
Figura 39: Probeta de PVA en resina epoxi	31
Figura 40: Deformación de la geometría.....	32
Figura 41: Solución planteada 1.....	32
Figura 42: Solución planteada 2.....	33
Figura 43: Proceso 1 - Patrones de tejido de carbono sarga.....	35
Figura 44: Proceso 1 - Núcleo a laminar.....	35
Figura 45: Tipo de ligamento de la funda tubular de carbono	36
Figura 46: Primera unión con funda - Primera capa	37
Figura 47: Primera unión con funda - Primera capa y refuerzos.....	38
Figura 48: Primera unión con funda - Aspecto final de las capas de fibra de carbono	38
Figura 49: Primera unión con funda – Consumibles colocados sobre el laminado.....	38
Figura 50: Primera unión con funda - Unión a vacío	39
Figura 51: Primera unión con funda - Acabado superficial 1	39
Figura 52: Primera unión con funda - Acabado superficial 2	39
Figura 53: Primera unión con funda - Aleta perimetral formada	40
Figura 54: Segunda unión con funda - Capas exteriores.....	41
Figura 55: Segunda unión con funda - Acabado superficial	41
Figura 56: Segunda unión con funda – Contorno de la unión.....	42
Figura 57: Orientación de las fibras (0° y 90°).....	44
Figura 58: Proceso de fabricación 2 – Molde con desmoldeante aplicado	45
Figura 59: Proceso de fabricación 2 - Tejido de carbono y resina depositadas en el molde	45
Figura 60: Proceso de fabricación 2 - Molde cerrado con el laminado en el interior	45
Figura 61: Proceso de fabricación 2 - Desmoldeo de la unión.....	46
Figura 62: Proceso de fabricación 2 - Primera mitad.....	46
Figura 63: Proceso de fabricación 2 – Segunda mitad	47
Figura 64: Proceso de fabricación 2 - Moldes modificados sin aleteado preestablecido	47
Figura 65: Primera capa depositada	48
Figura 66: Proceso de fabricación 2 - Acabado superficial de la segunda unión.....	48

Figura 67: Proceso de fabricación 3 - Molde y contramolde con desmoldeante.....	49
Figura 68: Proceso de fabricación 3 - Primeras 4 capas de tela	49
Figura 69: Proceso de fabricación 3 - Introducción del núcleo en el laminado	49
Figura 70: Proceso de fabricación 3 - Laminado de las 4 capas superiores	50
Figura 71: Proceso de fabricación 3 - Cierre del molde (laminado y núcleo).....	50
Figura 72: Proceso de fabricación 3 – Pieza desmoldeada	51
Figura 73: Unión 1 (Proceso de fabricación 1)	52
Figura 74: Unión 2 (Proceso de fabricación 2)	52
Figura 75: Acabado final de unión por proceso de fabricación 2 (ambas mitades)	53
Figura 76: Acabado final de unión por proceso de fabricación 3.....	53
Figura 77: Vista de sección. Disposición de los tubos dentro de la unión (Cotas en mm).	55
Figura 78: Pegado de la unión mediante sargento (1)	56
Figura 79: Pegado de la unión mediante sargentos (2)	56
Figura 80: Remaches utilizados para el pegado de la unión	56
Figura 81: Remachadora manual utilizada.....	57
Figura 82: Unión remachada.....	57
Figura 83: Brazos de acero introducidos en la unión. Brazo restringido y brazo de carga	58
Figura 84: Redondo de acero usado en el dispositivo experimental	58
Figura 85: Brazo restringido sujeto por abrazaderas.....	59
Figura 86: Unión separada de la madera y guías del brazo de carga	59
Figura 87: Dispositivo de ensayo sujeto a un tornillo de banco.....	60
Figura 88: Esquema de la disposición de elementos durante el ensayo	61
Figura 89: Identificación de las uniones objeto de ensayo.....	61
Figura 90: Rotura de probeta 1.1. (a) En dispositivo de ensayo. (b) Posterior al ensayo.....	62
Figura 91: Rotura de probeta 1.2. (a) En dispositivo de ensayo. (b) Posterior al ensayo.....	63
Figura 92: Rotura de probeta 2.1. (a) En dispositivo de ensayo. (b) Posterior al ensayo.....	64
Figura 93: Rotura de probeta 2.2. (a) En dispositivo de ensayo. (b) Posterior al ensayo.....	64
Figura 94: Rotura de probeta 2.3. (a) En dispositivo de ensayo. (b) Posterior al ensayo.....	65
Figura 95: Rotura de probeta 3.1. (a) En dispositivo de ensayo. (b) Posterior al ensayo.....	66
Figura 96: Rotura de probeta 3.2. (a) En dispositivo de ensayo. (b) Posterior al ensayo.....	67
Figura 97: Rotura de probeta 3.3. (a) En dispositivo de ensayo. (b) Posterior al ensayo.....	67
Figura 98: Rotura del adhesivo en la unión 3.2.....	68
Figura 99: Dispositivo de ensayo de resistencia del tubo	69
Figura 100: Abrazadera para evitar el ovalamiento de la sección.....	70

Figura 101: Fallo alcanzado en 3 de los ensayos en tubos	71
Figura 102: Rotura de uno de los tubos de ensayo. (a) Vista frontal. (b) Vista lateral	71
Figura 103: Ovalamiento de la sección en unión 2.2 (ensayo 3).....	72
Figura 104: Fisura de la unión 2.3 (ensayo 3).....	73
Figura 105: Separación de las 2 mitades unión 2.3 (ensayo 3)	73
Figura 106: Rotura de la unión en el ensayo 3: (a) unión 3.1.y (b) unión 3.2.....	75
Figura 108: Unión 3.3 con toda la carga aplicada en el ensayo 3	76
Figura 109: Identificación de superficies y sistema de referencia durante el estudio estático	79
Figura 110: Restricciones y carga remota del estudio estático –.....	79
Figura 111: Malla – Estudio con superficies compuestas	80
Figura 112: Resultados FDS - Estudio con superficies compuestas	80
Figura 113: Localización de los valores FDS < 1 - Estudio con superficies compuestas	81
Figura 114: Orientación de las fibras en superficies compuestas contiguas (a) y (b)	81
Figura 115: Tensiones de Von Mises – Estudio con superficies delgadas.....	82
Figura 116: Perspectiva con tensiones de Von Mises – Estudio con superficies delgadas	83
Figura 117: Modelo 3D – Estudio con modelo sólido	83
Figura 118: Tensiones Von Mises – Estudio con modelo sólido	84
Figura 119: Tensiones normales a Z – Estudio con modelo sólido.....	85
Figura 120: Tensiones normales a Z (carga con conexión distribuida).....	85
Figura 121: Deformada (carga con conexión distribuida) – Estudio con modelo sólido	86
Figura 122: Regiones de sujeción de la carga remota – Estudio con modelo sólido	86
Figura 123: Tensiones normales a Z (sujeción mediante 2 regiones)	87
Figura 124: Modelo para simulación mediante ensamblaje	87
Figura 125: Tensiones de Von Mises - Modelado mediante ensamblaje	88
Figura 126: Tensiones normales a Z – Modelado mediante ensamblaje.....	88
Figura 127: Sección ovalada (deformada) – Modelado mediante ensamblaje.....	89
Figura 128: Valor de tensión normal a Z es la región de fallo	89
Figura 129: Desplazamientos resultantes – Modelado mediante ensamblaje	90

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

Grado en Ingeniería Mecánica

ANEXOS

TRABAJO FIN DE GRADO

**DISEÑO DE INTERSECCIÓN TIPO K EN FIBRA DE
CARBONO PARA TUBOS**

Autor:

Jehoshua González Perdomo

Tutores:

D. Carmelo Militello Militello

D. José Antonio Valido García

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo A: Cálculo de propiedades mecánicas de una lámina	101
Anexo B: Criterio de fallo Tsai-Hill	104
Anexo C: Fichas técnicas	105

Anexo A: Cálculo de propiedades mecánicas de una lámina

Es posible determinar las constantes de ingeniería mediante modelos teóricos micromecánicos sin la necesidad de fabricar probetas y proceder a su ensayo de manera empírica. Mediante la aplicación de estos modelos, empleando las propiedades mecánicas de los constituyentes por separado, es posible determinar las propiedades del material compuesto.

En primer lugar, es importante conocer la fracción de volumen o peso relativo entre los distintos constituyentes del material.

- **Fracción en volumen de un constituyente:** Representa el porcentaje de volumen de dicho constituyente respecto al volumen total.

$$v_i = \frac{V_i}{V_c} \quad (ec. 1)$$

Donde,

- V_i : Volumen del constituyente 'i'
- V_c : Volumen del composite

Asimismo, la suma de las fracciones de volumen debe ser la unidad, aunque para los composites reforzados con fibra, se simplificará a 3 constituyentes principales: la fibra (f), la matriz (m) y los vacíos (v).

$$\sum_{i=1}^n v_i = 1 \quad (ec. 2)$$

$$v_f + v_m + v_v = 1 \quad (ec. 3)$$

- **Fracción en peso de un constituyente:** Representa el porcentaje de peso de dicho constituyente respecto al peso total.

$$w_i = \frac{W_i}{W_c} \quad (ec. 4)$$

Donde,

- W_i : Peso del constituyente 'i'
- W_c : Peso del composite

De manera análoga, la suma de las fracciones de peso debe ser la unidad, considerando esta vez la masa de los vacíos como 0.

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1 \quad (ec. 5)$$

$$w_f + w_m = 1 \quad (ec. 6)$$

➤ **Densidad de una lámina:** Se determina mediante las fracciones de masa o volumen indistintamente.

$$\rho_c = \rho_f v_f + \rho_m v_m \quad (ec. 7)$$

$$\rho_c = \frac{1}{(w_f/\rho_f) + (w_m/\rho_m)} \quad (ec. 8)$$

Donde ρ_f , ρ_m y ρ_c son las densidades de la fibra, matriz y composite respectivamente.

Regla de mezclas

La regla de mezclas es uno de los modelos más comunes para determinar aproximadamente constantes de ingeniería en un material compuesto. Este estudio se basa en el estudio de láminas, es decir, un composite de una capa de fibra unidireccional en conjunto con su matriz (resina), de las cuales, mediante el estudio de casos de carga es posible determinar ecuaciones teóricas.

Para una lámina plana unidireccional, se consideran dos ejes principales del material, de manera que '1' corresponde con la dirección longitudinal mientras que 2 con la transversal (*Figura 129*).

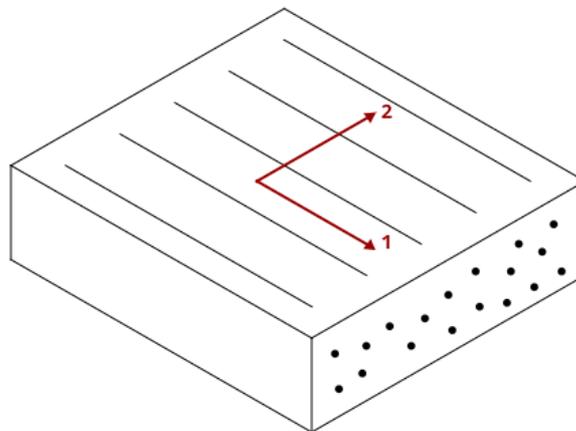


Figura 129: Ejes principales de la lámina unidireccional

➤ **Módulo elástico longitudinal (E_1)**

$$E_1 = E_{f1} \nu_f + E_m \nu_m \quad (ec. 9)$$

Donde E_{f1} es el módulo elástico de la fibra en la dirección 1 y E_m el módulo elástico de la resina.

➤ **Módulo elástico transversal (E_2)**

$$\frac{1}{E_2} = \frac{\nu_f}{E_{f2}} + \frac{\nu_m}{E_m} \quad (ec.10)$$

Donde E_{f2} es el módulo elástico de la fibra en su dirección transversal.

➤ **Módulo de Poisson (ν_{12})**

$$\nu_{12} = \nu_{f12} \nu_f + \nu_m \nu_m \quad (ec. 11)$$

Donde ν_{f12} es el módulo de Poisson de la fibra, mientras que ν_m es el de la resina.

➤ **Módulo cortante (G_{12})**

$$\frac{1}{G_{12}} = \frac{\nu_f}{G_{f12}} + \frac{\nu_m}{G_m} \quad (ec. 12)$$

Donde G_{f12} es el módulo cortante de la fibra, mientras que G_m es el de la resina.

Anexo B: Criterio de fallo Tsai-Hill

El criterio de fallo que se emplea en los materiales isotrópicos y homogéneos, como los metales, es el criterio de Von Misses. No obstante, los materiales compuestos son heterogéneos y además no son isotrópicos, por lo que el criterio de fallo de Von Misses no tiene cabida y hay que emplear otro.

El criterio de fallo más adecuado y comúnmente empleado en materiales compuestos es el *criterio de Tsai-Hill*, el cual sirve para predecir la ruptura del laminado.

Para una lámina, dicho criterio se encuentra representado en la siguiente expresión:

$$\frac{\sigma_1^2}{S_L^2} + \frac{\sigma_2^2}{S_T^2} - \frac{\sigma_1\sigma_2}{S_L^2} + \frac{\tau_{12}^2}{S_{LT}^2} = 1 \quad (ec. 13)$$

Donde,

- σ_1 : Tensión en la dirección longitudinal
- σ_2 : Tensión en la dirección transversal
- τ_{12} : Tensión cortante en el plano 12
- S_L : Tensión de rotura en la dirección longitudinal
- S_T : Tensión de rotura en la dirección transversal
- S_{LT} : Tensión de rotura en el plano 12

Conocidos todos los parámetros de la expresión se puede determinar si en dicha lámina se ha llegado a la rotura. Se considerará fallo en la lámina si el término izquierdo de la ecuación es mayor o igual a la unidad.

Anexo C: Fichas técnicas

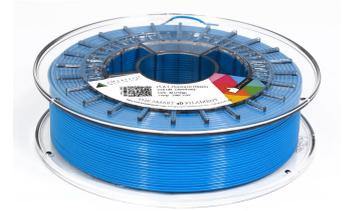
Smartfil - PLA	106
Innovatefil - Hydrosoluble	108
Fibermax Composites – C201T2s	110
Torayca – T300.....	111
Entropy Resins - CLR	113
PO180 - Copolymer Bagging Film.....	114
Tenowo – Vacuum bag.....	115
ELA20 P1& P3 – Perforated Polyolefin Release Film.....	116
PA64 – Polyamide Peel Ply Fabric	117

TECHNICAL DATA SHEET

VERSION 1.1

PLA

Biodegradable filament and ok for all 3d printers. It is very easy to print as it has no contractions so you can make really big pieces. With our PLA filament you can achieve a fantastic finish and lively colours in all your pieces.



Recyclable
Recyclable
Recyclable



Apto para contacto con alimentos
Food Approved
Aliments approuvés



Biocompostable
Biocompostable
Biocompostables

	TIPICAL VALUE	UNITS	TEST METHOD		
PHYSICAL PROPERTIES					
Chemical Name	Polylactic Acid				
Material Density	1.24	g/cm ³	ISO 1183		
Glass Transition Temperature	60	°C	D3418		
MECHANICAL PROPERTIES					
Tensile Strength at Break	50	MPa	D882		
Tensile Yield Strength	60	MPa	D882		
Tensile Modulus	3.5	GPa	D882		
Tensile Elongation	6	%	D882		
Notched Charpy Impact	5	KJ/m ²	ISO-179-1eA		
Flexural Strength	83	MPa	D790		
Flexural Modulus	3.8	GPa	D790		
THERMAL PROPERTIES					
Heat Distorsion Temperature (0.45 MPa)	55	°C	E2092		
PRINTING PROPERTIES					
Print Temperature	200-240	°C			
Hot Pad	0-60	°C			
Fan Layer	ON (100)	%			
SIZE	NET W.	GROSS W.	DIAMETERS	COLOR	PACKAGING
S	330 g	475 g	1.75 mm	Various colors	SmartBag, security seal, desiccant bag
M	750 g	975 g	1.75 mm/2.85 mm	Various colors	
L	1000 g	1256 g	1.75 mm/2.85 mm	Various colors	

DISCLAIMER: The information provided in the data sheets is intended to be just a reference. It should not be used as design or quality control values. Actual values may differ significantly depending on the printing conditions. The final performance of the printed components does not only depend on the materials, also the design and printing conditions are important.

Smart Materials assumes no responsibility for any damage, injury or loss produced by the use of its filaments in any particular application.

PVA

SMARTFIL PVA or polyvinyl alcohol is a water-soluble filament used as support material in 3D printing. It is especially recommended to use for PLA pieces to reach those points where the support structure is complex or inaccessible. Later, it can be removed by putting the piece in water, It is also a biodegradable filament, non-toxic and odorless.



Recyclable
Recyclable
Recyclable



Biocompostable
Biocompostable
Biocompostables

	TIPICAL VALUE	UNITS	TEST METHOD
PHYSICAL PROPERTIES			
Chemical Name	PolyVinyl Alcohol		
Material Density	1.23	g/cm ³	ISO 1183
Solubility	Soluble in water		

PRINTING PROPERTIES			
Print Temperature	190-210	°C	
Hot Pad	25-60	°C	
Fan Layer	ON (100)	%	
Layer Speed	30-45	mm/s	

SIZE	NET W.	GROSS W.	DIAMETERS	COLOR	PACKAGING
S	350 g	495 g	1.75 mm/2.85 mm	Natural	SmartBag, security seal, desiccant bag
M	750 g	975 g	1.75 mm/2.85 mm	Natural	



DISCLAIMER: The information provided in the data sheets is intended to be just a reference. It should not be used as design or quality control values. Actual values may differ significantly depending on the printing conditions. The final performance of the printed components does not only depend on the materials, also the design and printing conditions are important.

Smart Materials assumes no responsibility for any damage, injury or loss produced by the use of its filaments in any particular application.



Innovatefil® Hydrosoluble es un filamento de soporte soluble en agua adecuado para impresoras 3D de múltiples cabezales. Es compatible con una amplia gama de materiales para la impresión 3D y es fácil de imprimir, lo que le permite fabricar piezas con geometrías complicadas y se puede usar como soporte en lugares completamente inaccesibles para su posterior eliminación.

PROPIEDADES FÍSICAS	UNIDADES DE MEDIDA	VALOR
Composición química	BVOH (Butenediol alcohol co-polymer)	
Densidad	g/cm ³	1.13
Solubilidad	Soluble en agua	

PROPIEDADES DE IMPRESIÓN

Temperatura de impresión	°C	190-220
Temperatura de la cama	°C	80-100
Velocidad de impresión	mm/s	40-60
Ventilador de capa	%	0-40

VENTAJAS

FÁCIL DE ELIMINAR

Permite su rápida disolución en agua, eliminando el material de soporte fácilmente.

ALTERNATIVA AL HIPS Y PVA

Compatibilidad con un gran número de materiales (PLA, ABS, NYLON, PETG) por lo que es una alternativa al HIPS.

ESTABILIDAD TÉRMICA

A diferencia de los filamentos de PVA, Innovatefil Hydrosoluble dispone de una gran estabilidad térmica permitiendo realizar soportes con gran definición y exactitud. Además al disponer de un menor índice de fluidez, se elimina el goteo en la boquilla por lo que evitamos así, que la pieza pueda ser manchada en el cambio de extrusor.

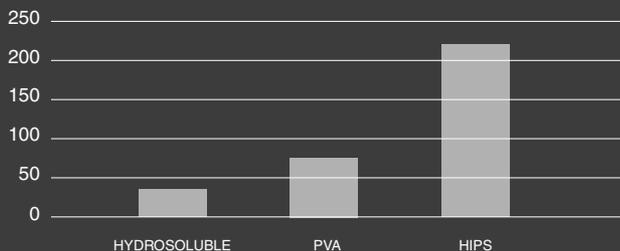
MENOR ABSORCIÓN DE HUMEDAD

En comparación con el PVA, dispone de menor nivel de absorción de humedad lo que permite conservarlo mejor en el tiempo y que el filamento no se ensanche debido a la humedad ambiente.

COMPARACIÓN DE TIEMPOS DE DISOLUCIÓN

PIEZAS DE TEST
40 x 30 x 3 mm

TIEMPO DE DISOLUCIÓN (min)



RECOMENDACIONES DE USO

OPTIMIZAR DE TEMPERATURAS DE LA CAMA SEGÚN EL MATERIAL

Para materiales como el PLA, recomendamos utilizar una temperatura de cama inferior a la indicada para que el PLA no se deforme debido al exceso de temperatura y aún mantenga su adherencia.

PROTEGER DE LA HUMEDAD

Innovatefil® Hydrosoluble se disuelve en el agua, por lo que debe protegerse y mantenerse en un ambiente seco para evitar la humedad y la absorción de agua.

El filamento se empaqueta en una bolsa de vacío con una gran barrera contra la humedad para asegurarse de que no pueda absorber la humedad. Esta bolsa se sella con un cierre automático, y se incluye una bolsa desecante con un gran poder de absorción, por lo que recomendamos mantener el filamento dentro para protegerlo.

Recomendamos no manipular el filamento con las manos mojadas para evitar la degradación.

PURGAR EL MATERIAL UNA VEZ UTILIZADO.

Aconsejamos purgar el extrusor para eliminar el material restante en el interior. Debido a la naturaleza del material, cuando se somete a un exceso de temperatura durante un tiempo prolongado, se degrada y cristaliza, solidificándose dentro del extrusor, y esto puede causar obturaciones.

ELIMINACIÓN DE RESIDUOS

Innovatefil Hydrosoluble es un producto biodegradable, siga las regulaciones locales y nacionales sobre la eliminación de residuos plásticos.



Descargo de responsabilidad: la información proporcionada en las hojas de datos está destinada a ser solo una referencia. No debe utilizarse como valores de diseño o control de calidad. Los valores reales pueden diferir significativamente dependiendo de las condiciones de impresión. El rendimiento final de los componentes impresos no solo depende de los materiales, también son importantes las condiciones de diseño e impresión.

Smart Materials no asume ninguna responsabilidad por cualquier daño, lesión o pérdida producida por el uso de sus filamentos en cualquier aplicación particular.



Balanced, stabilized woven fabric data sheet

Code # C201T2s

Characteristics			
		Nominal	Tolerance
Mass per unit of area	(gr/sqm)	206	± 5%
Weave		Twill 2x2	
Laminate thickness	(mm)	0,19*	± 2,5%

Warp – Weft ratio		
	Warp	Weft
Fiber description	3K T300 carbon fiber	3K T300 carbon fiber
Thread count (ends/cm)	5	5
Weight distribution (g/mq)	100	100
Weight distribution (%)	48.55	48.55
Binder description	Copolyamide non woven, heat treated	
Binder (g/mq)	6	
Binder (%)	2.9	

(*) Theoretical thickness of compressed epoxy laminate with 40% of reinforcement in volume.

Note: Technical information furnished is based on laboratory findings and believed to be correct. No warranties of any kind are made except that the materials supplied are of standard quality. All risk and liabilities arising from handling, storage and use of products, as well as compliance with applicable legal restrictions, rests with the user.

T300 DATA SHEET

Baseline carbon fiber used in aerospace applications. Has 30 year production history and is known for its balanced composite properties, high quality, consistency, reliability and supplyability.

FIBER PROPERTIES

		English	Metric	Test Method
Tensile Strength		512 ksi	3,530 MPa	TY-030B-01
Tensile Modulus		33.4 Msi	230 GPa	TY-030B-01
Strain		1.5 %	1.5 %	TY-030B-01
Density		0.064 lbs/in ³	1.76 g/cm ³	TY-030B-02
Filament Diameter		2.8E-04 in.	7 μm	
Yield	1K	22,568 ft/lbs	66 g/1000m	TY-030B-03
	3K	7,523 ft/lbs	198 g/1000m	TY-030B-03
	6K	3,761 ft/lbs	396 g/1000m	TY-030B-03
	12K	1,862 ft/lbs	800 g/1000m	TY-030B-03
Sizing Type & Amount	40A, 40B		1.0 %	TY-030B-05
	40D		0.7 %	TY-030B-05
	50A, 50B		1.0 %	TY-030B-05
	Twist	Twisted, Untwisted, or Never twisted		

FUNCTIONAL PROPERTIES

CTE	-0.41 $\alpha \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
Specific Heat	0.19 Cal/g $\cdot^{\circ}\text{C}$
Thermal Conductivity	0.025 Cal/cm $\cdot\text{s}\cdot^{\circ}\text{C}$
Electric Resistivity	$1.7 \times 10^{-3} \Omega\cdot\text{cm}$
Chemical Composition: Carbon	93 %
Na + K	<50 ppm

COMPOSITE PROPERTIES *

Tensile Strength	270 ksi	1,860 MPa	ASTM D-3039
Tensile Modulus	20.0 Msi	135 GPa	ASTM D-3039
Tensile Strain	1.3 %	1.3 %	ASTM D-3039
Compressive Strength	215 ksi	1,470 MPa	ASTM D-695
Flexural Strength	260 ksi	1,810 MPa	ASTM D-790
Flexural Modulus	18.0 Msi	125 GPa	ASTM D-790
ILSS	14 ksi	10 kgf/mm ²	ASTM D-2344
90° Tensile Strength	11.0 ksi	76 MPa	ASTM D-3039

* Toray 250°F Epoxy Resin. Normalized to 60% fiber volume.

T300

COMPOSITE PROPERTIES * *

Tensile Strength	255 ksi	1,760 MPa	ASTM D-3039
Tensile Modulus	19.5 Msi	130 GPa	ASTM D-3039
Tensile Strain	1.3 %	1.3 %	ASTM D-3039
Compressive Strength	230 ksi	1,570 MPa	ASTM D-695
Compressive Modulus	18.5 Msi	125 GPa	ASTM D-695
In-Plane Shear Strength	14 ksi	98 MPa	ASTM D-3518
ILSS	15.5 ksi	11 kgf/mm ²	ASTM D-2344
90° Tensile Strength	11.5 ksi	80 MPa	ASTM D-3039

** Toray Semi-Toughened 350°F Epoxy Resin. Normalized to 60% fiber volume.

See Section 4 for Safety & Handling information. The above properties do not constitute any warranty or guarantee of values.

These values are for material selection purposes only. For applications requiring guaranteed values, contact our sales and technical team to establish a material specification document.

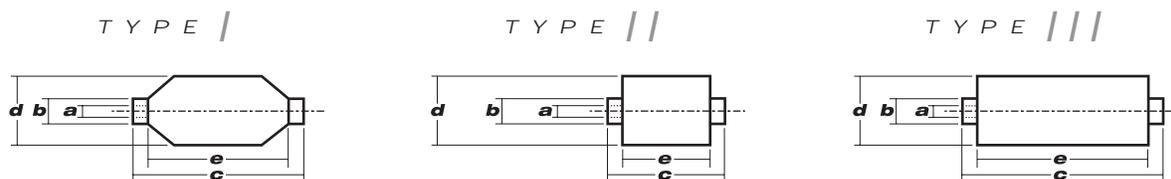
PACKAGING

The table below summarizes the tow sizes, twists, sizing types, and packaging available for standard material. Other bobbin sizes may be available on a limited basis.

Tow Sizes	Twist ¹	Sizing	Bobbin Net Weight (kg)	Bobbin Type ²	Bobbin Size (mm)					Spools per Case	Case Net Weight (kg)
					a	b	c	d	e		
1K	A	40A, 50A	1.0	I	94	99	320	135	260	15	15
	A	40A, 50A	1.0	II	76	82	192	132	156	16	16
	B	50B	1.0	II	76	82	192	132	156	16	16
3K	A	40A, 50A	2.0	II	76	82	192	157	156	12	24
	B	40B, 50B	2.0	II	76	82	192	157	156	12	24
6K	A	40D, 50A	2.0	II	76	82	192	157	156	12	24
	B	40D, 50B	2.0	II	76	82	192	157	156	12	24
12K	A	50A	4.0	II	76	82	192	204	156	6	24
	B	50B	4.0	II	76	82	192	204	156	6	24

¹ **Twist** A: Twisted yarn B: Untwisted yarn made from a twisted yarn through an untwisting process

² **Bobbin Type** See Diagram below



TORAY CARBON FIBERS AMERICA, INC.

6 Hutton Centre Drive, Suite #1270, Santa Ana, CA 92707 TEL: (714) 431-2320 FAX: (714) 424-0750

Sales@Toraycfa.com Technical@Toraycfa.com www.torayusa.com

Clear Laminating System

Clear, UV Stable Epoxy Resin for high colourwork laminations, coatings, and marine epoxy applications.

Product Overview

CLR is a clear, UV stabilised, general use, laminating resin for composites, coating and adhesive applications. It has an ideal viscosity for a wide range of applications that use hand layup techniques with fast room temperature cures. CLR is a USDA Certified BioPreferred® Product with 29% biobased content.

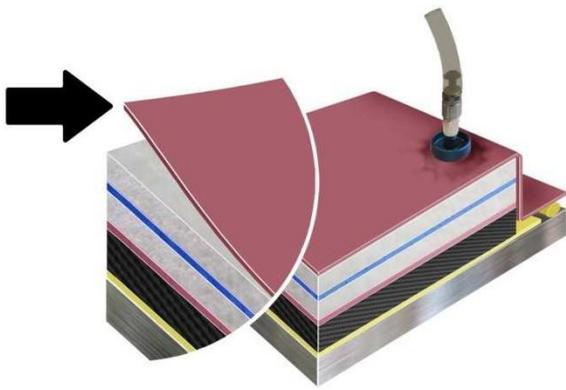
CLX
EXTRA FAST

CLF
FAST

CLS
SLOW

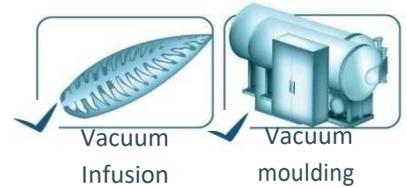
MECHANICAL DATA			
Tensile Modulus (ASTM D638)	3.1 GPa	3.0 GPa	3.2 GPa
Tensile Strength (ASTM D638)	65.5 MPa	65.5 MPa	67.6 MPa
Elongation (ASTM D638)	6%	5%	6%
Flexural Modulus (ASTM D790)	3.0 GPa	3.0 GPa	2.9 GPa
Flexural Strength (ASTM D790)	96.5 MPa	93.1 MPa	100.5 MPa
Compression Strength (ASTM D695)	78.1 MPa	78.1 MPa	86.3 MPa
Tg Ultimate (DSC, midpoint)	64°C	66°C	61°C
Hardness (Shore D)	70-80	70-80	70-80
PROCESSING DATA			
Mix Ratio (by volume)	2:1	2:1	2:1
Mix Ratio (by weight)	100:45	100:45	100:43
Viscosity (A/B/Mixed @ 25 °C)	2300/180/990 mPas	2300/280/1040 mPas	2300/140/700 mPas
Component Density (specific density @ 25°C)	1.14 (resin), 0.98 (hardener) gcm ⁻³	1.14 (resin), 1.01 (hardener) gcm ⁻³	1.14 (resin), 0.98 (hardener) gcm ⁻³
Mixed Density (specific density @ 25°C)	1.08 gcm ⁻³	1.09 gcm ⁻³	1.08 gcm ⁻³
Pot Life (@ 25°C)	18 min	21 min	43 min
Tack Free Time (@ 35°C)	2 hrs	4 hrs	8 hrs
Recommended Full Cure	7 days @ 25°C	7 days @ 25°C	7 days @ 25°C, Post cure recommended
ENVIRONMENT DATA			
VOC Content (ASTM D2369)	19.5 g/l	31.5 g/l	0.23 g/l
Biobased Carbon Content (ASTM D6866)	20%	20%	21%

These are typical properties and cannot be construed as a specification. The end users should test the products to ensure the products are suitable for the intended application. Any information, data, advice or recommendation published by Wessex Resins or obtained from Wessex Resins by other means and whether relating to Wessex Resins' materials or other materials, is given in good faith and believed to be reliable.



PO180

Copolymer Bagging Film



DESCRIPTION

PO180 is an advanced polyamide copolymer bagging film. **PO180** is a multilayer extruded polyamide film providing multiple layers of safety. **PO180** is strong, has a high elongation and is suitable for cure temperatures up to 180 °C (We recommend testing prior to use in autoclave).

I.e. could be used for either vacuum moulding or vacuum infusion technologies with epoxy or polyester (avoid direct contact with phenolic resin).

STORAGE

Keep this film at room temperature and normal hygrometry. Do not expose this film to the day light: **PO180** is UV sensitive.

CHARACTERISTICS

Colour	Width	Length	Thick.	Weight	Auto release	Styrene resistant	Max. Serv. Temp.
Pink	2, 4, 6, 8, 10 & 12 m	60 up to 400 m	50 μ	54 g/m ²	YES	YES	180 °C
Pink	5 m	60 up to 400 m	75 μ	81 g/m ²	YES	YES	180 °C

Packaging	Pressure	Elongation at break		Tensile Strength	
		MD	TD	MD	TD
Roll	7 bars (75μ)	410 %	420 %	43 MPa	40 MPa

Indices C Application date october 2012

Technical datasheet

non-binding values

Zetafelt
F 3653/150

color : 91
white

The following specification values are preliminarily, because they base on a non-representative amount of measurements !

product composition

fibremixture [%] : component 1 100 PET

bonding : needed

coating

Coating type: none

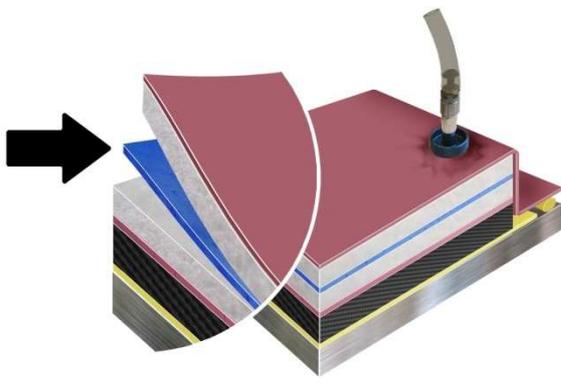
parameter

norm

unit

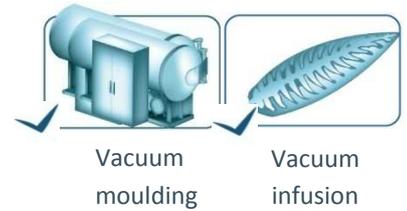
specification

parameter	norm	unit	specification
total weight	PV.001	[g/m ²]	150 135 - 165
total thickness	PV.002	[mm]	3,30 3,00 - 3,60
tensile strength md	PV.003	[N/5cm]	≥ 130
elongation md	PV.003	[%]	≥ 100
tensile strength cd	PV.003	[N/5cm]	≥ 100
elongation cd	PV.003	[%]	≥ 100
air permeability	PV.007	[l/m ² xsec]	4.000 3.000 - 5.000



ELA20 P1&P3

Perforated Polyolefin Release Film



DESCRIPTION

This perforated film belongs to the polyolefin family copolymer of polyethylene. **ELA20** perforated film allows the resin to drain the composite and the gasses to escape without mark off. This perforated film does not contaminate the composite. **ELA20** film is recommended for the vacuum molding (**ELA20P3**) or infusion technology (**ELA20P1**) with polyester or epoxy resins.

ELA20 is available in **P3** (Low Density Perforation) or **P1** (High Density Perforation).

ELA20 film is a release film.

STORAGE

Keep this film at room temperature and normal hygrometry.

CHARACTERISTICS

Material Type	Color	Thickness	Weight	Max. Serv. Temp.	Packaging
Polyethylene	Blue (yellow & red on demand)	25 μ	24,3 g/m ²	125°C	Roll

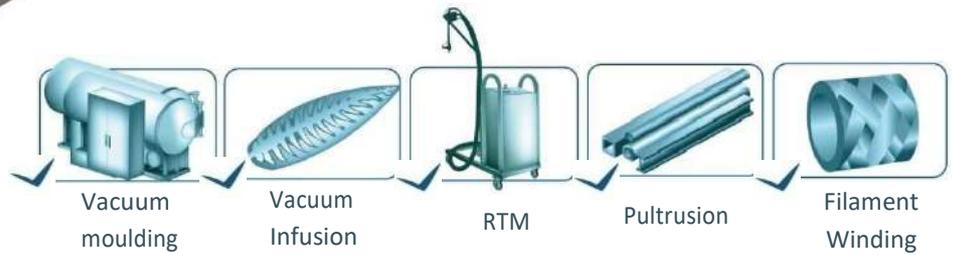
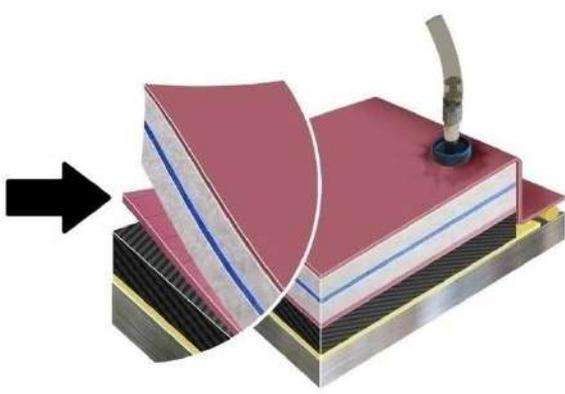
Perforation Types	Aspect	Standard Lengths	Standard widths	Elongation at break		Tensile strength	
				MD	TD	MD	TD
P1 or P3	Smooth surfaces	200 & 400 m	1m & 1,45m	300 %	300 %	30 N/mm ²	30 N/mm ²

Air porosity	P0 l/m ² /s +/-20%	P1 l/m ² /s +/-20%	P3 l/m ² /s +/-20%
100Pa	120	95.6	28.1
200Pa	180	117	34
Type of perforation			

Index D Application date october 2012

PA64

Polyamide Peel Ply Fabric



DESCRIPTION

PA64 is designed to be used on epoxy and polyester composite systems. This high tenacity fabric leaves a fine surface impression for **painting** and **secondary bonding**. There is no release agent or silicon in the fabric: **PA64** is made of synthetic polyamide fiber that offers a peel ply surface free from contamination: **PA64** is scoured and heat setting.

PA64 is not recommended for phenolic systems.

STORAGE

Keep this film at room temperature and normal hygrometry.

CHARACTERISTICS

Fiber Type	Color	Thick.	Weight	Use with Phenolic	Treatment	Max. Serv. Temp.	Packaging
Polyamide	White + red stripes	120 μ	64 g/m ²	NO	Scoured & Heat Set	190 °C	Roll

Weave	Extractable Materials	Length	Standard Width	Tape	Elasticity	Breaking Strength
-------	-----------------------	--------	----------------	------	------------	-------------------

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

Grado en Ingeniería Mecánica

PLANOS

TRABAJO FIN DE GRADO

DISEÑO DE INTERSECCIÓN TIPO K EN FIBRA DE
CARBONO PARA TUBOS

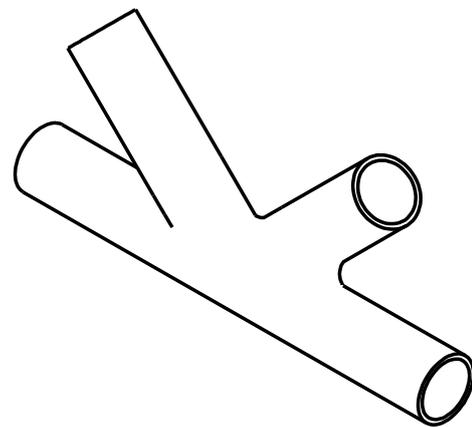
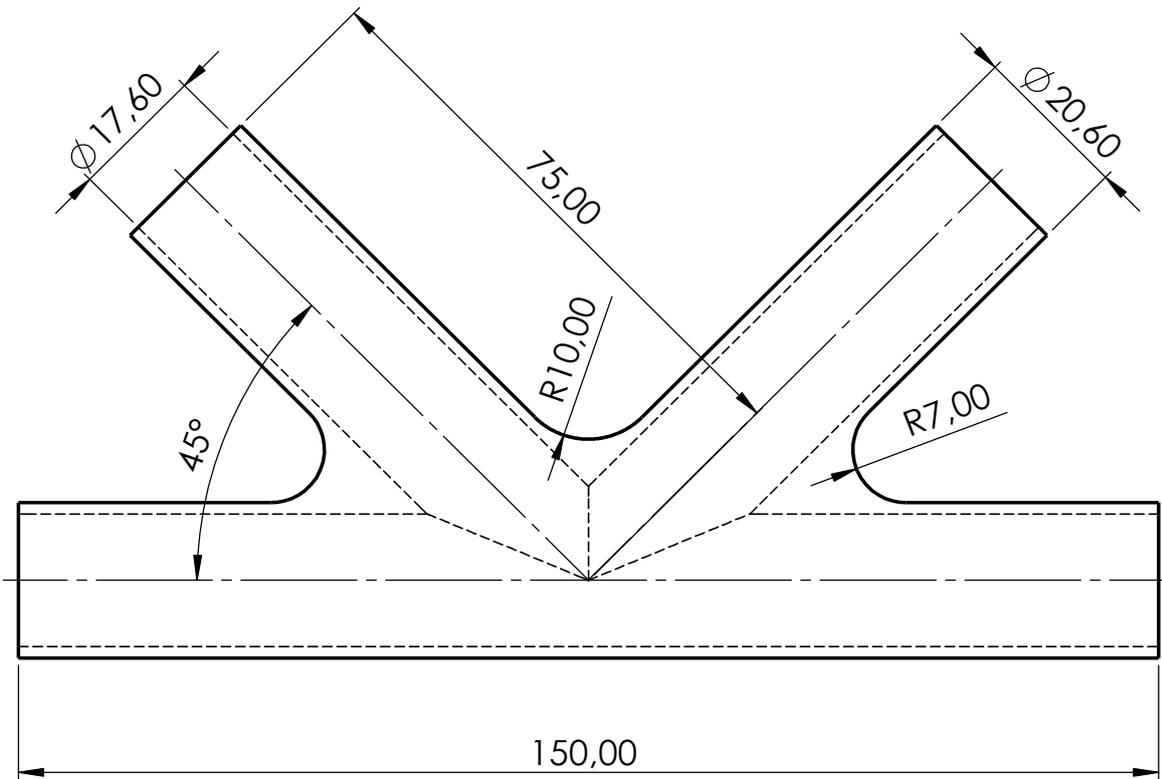
Autor:

Jehoshua González Perdomo

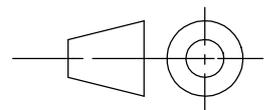
Tutores:

D. Carmelo Militello Militello

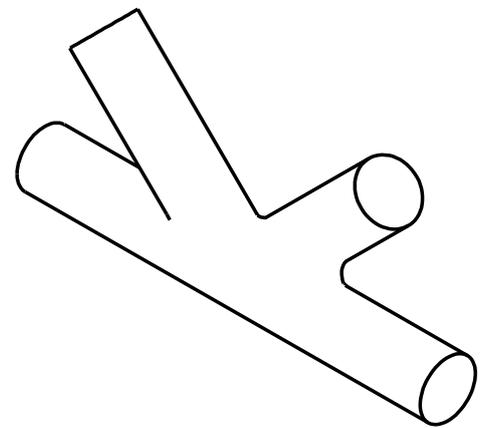
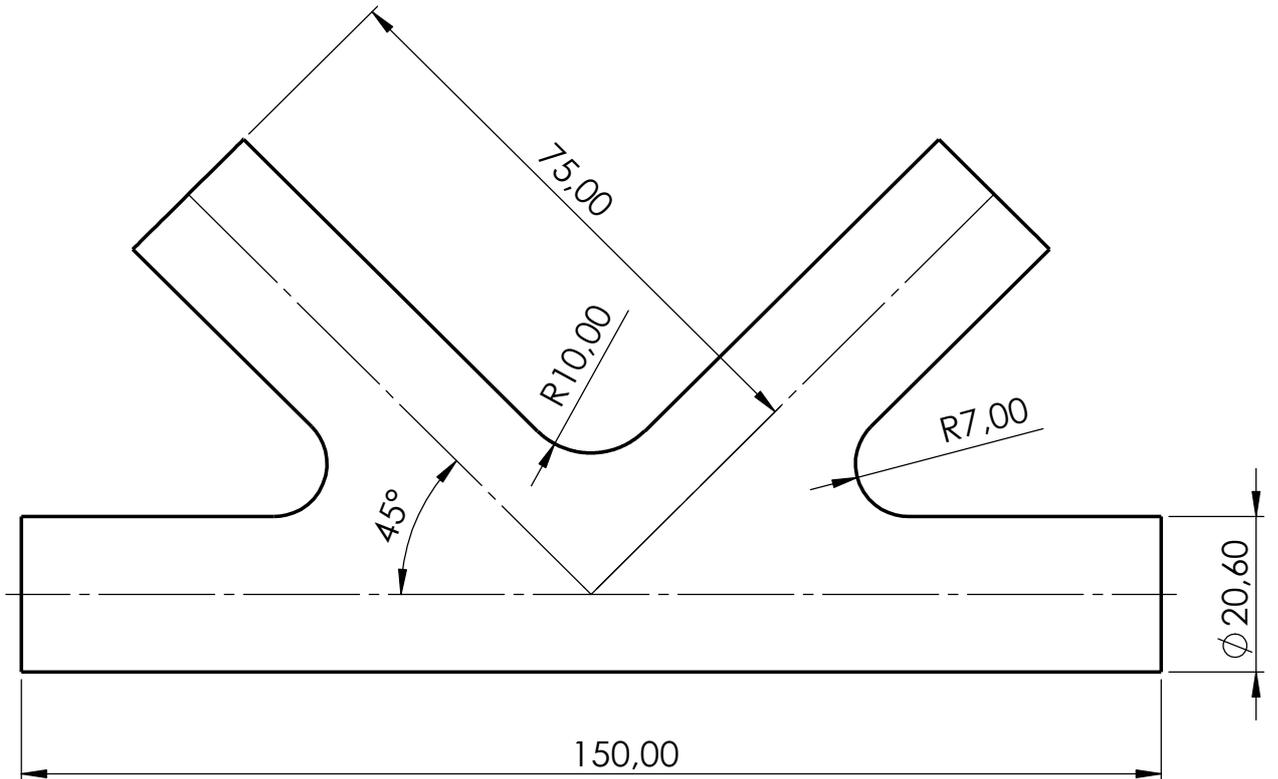
D. José Antonio Valido García



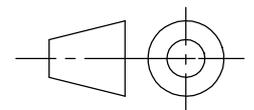
Vista perspectiva isométrica



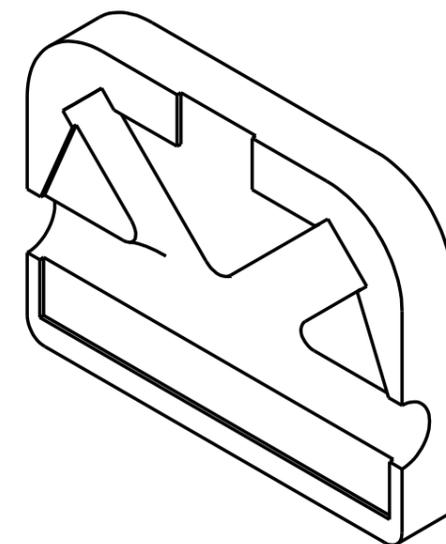
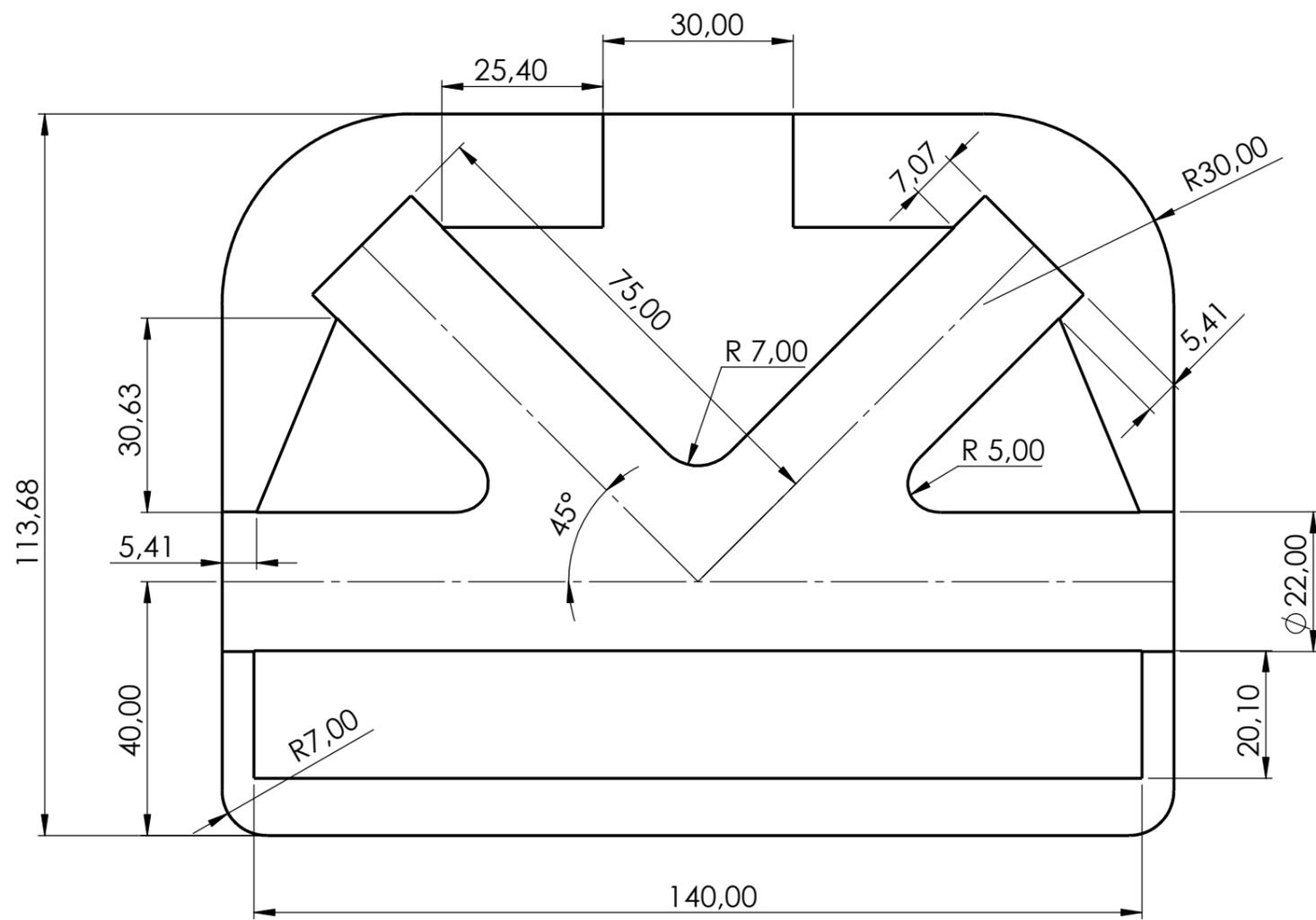
	Fecha	Autor	 Universidad de La Laguna	ESCUELA SUPERIOR INGENIERÍA Y TECNOLOGIA Grado en Ingeniería Mecánica Universidad de La Laguna
<i>Nombre</i>	20/07/2022	Jehoshua		
<i>Apellidos</i>		González		
<i>Id. s. normas</i>	UNE-EN-DIN			
ESCALA: 1:1	TÍTULO DEL PLANO NÚCLEO HIDROSOLUBE HUECO			Nº DE CONJUNTO: -
				Nº DE PLANO: 1.00



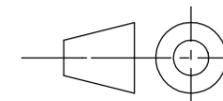
Vista perspectiva isométrica



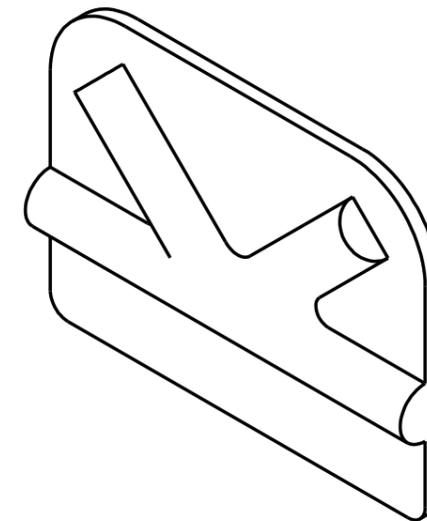
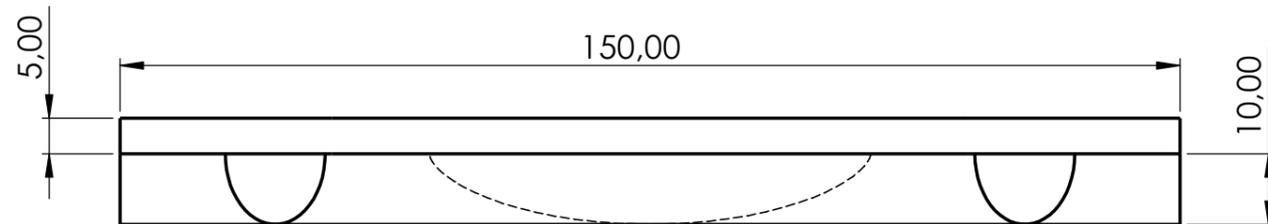
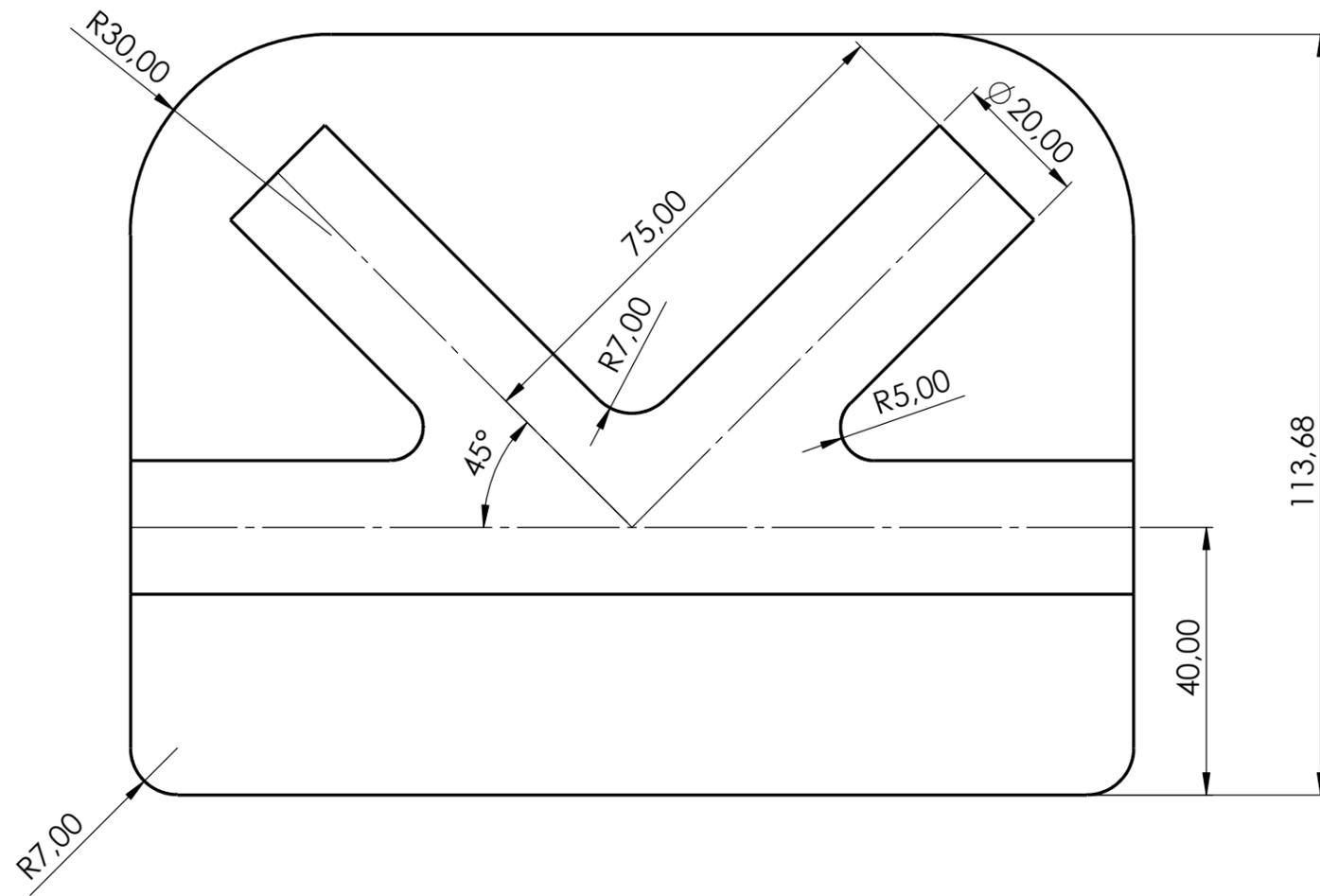
	Fecha	Autor	 Universidad de La Laguna	ESCUELA SUPERIOR INGENIERÍA Y TECNOLOGIA Grado en Ingeniería Mecánica Universidad de La Laguna	
<i>Nombre</i>	19/07/2022	Jehoshua			
<i>Apellidos</i>		González			
<i>Id. s. normas</i>	UNE-EN-DIN				
ESCALA: 1:1	TÍTULO DEL PLANO: NÚCLEO HIDROSOLUBLE MACIZO			Nº DE CONJUNTO:	-
				Nº DE PLANO:	2.00



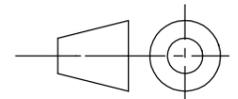
Vista perspectiva isométrica



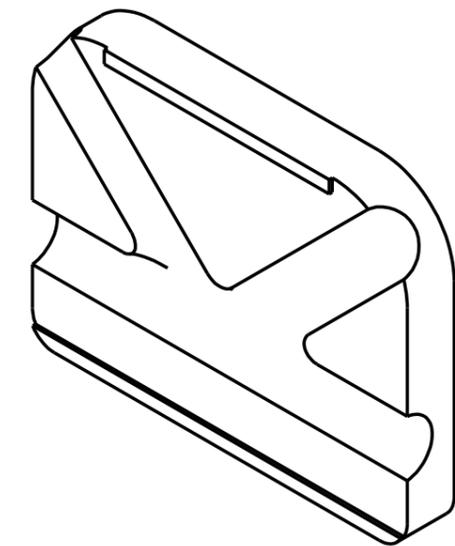
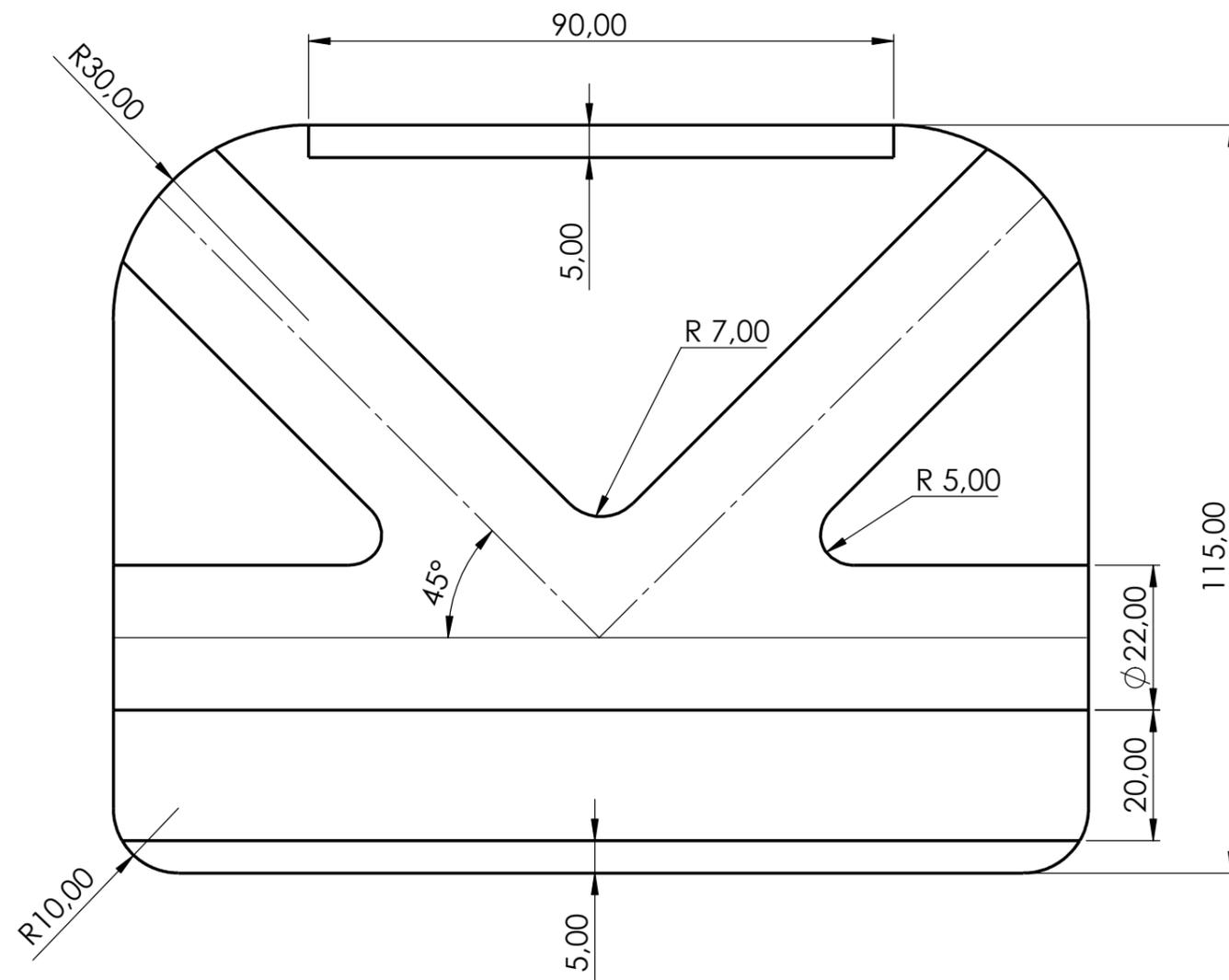
	Fecha	Autor	 Universidad de La Laguna	ESCUELA SUPERIOR INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA Grado en Ingeniería Mecánica Universidad de La Laguna		
<i>Nombre</i>	20/07/2022	Jehoshua				
<i>Apellidos</i>		González				
<i>Id. s. normas</i>	UNE-EN-DIN					
ESCALA:	TÍTULO DEL PLANO MOLDE NEGATIVO V1			Nº DE CONJUNTO: 3.00		
1:1				Nº DE PLANO: 3.01		



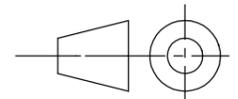
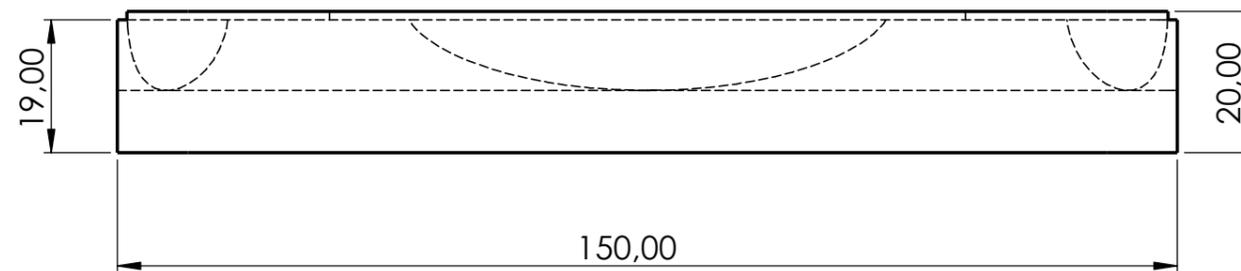
Vista perspectiva isométrica



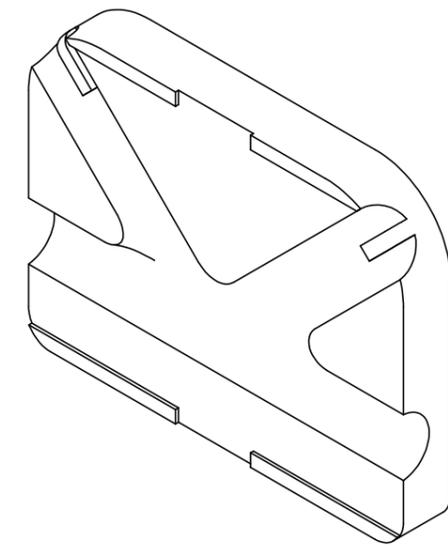
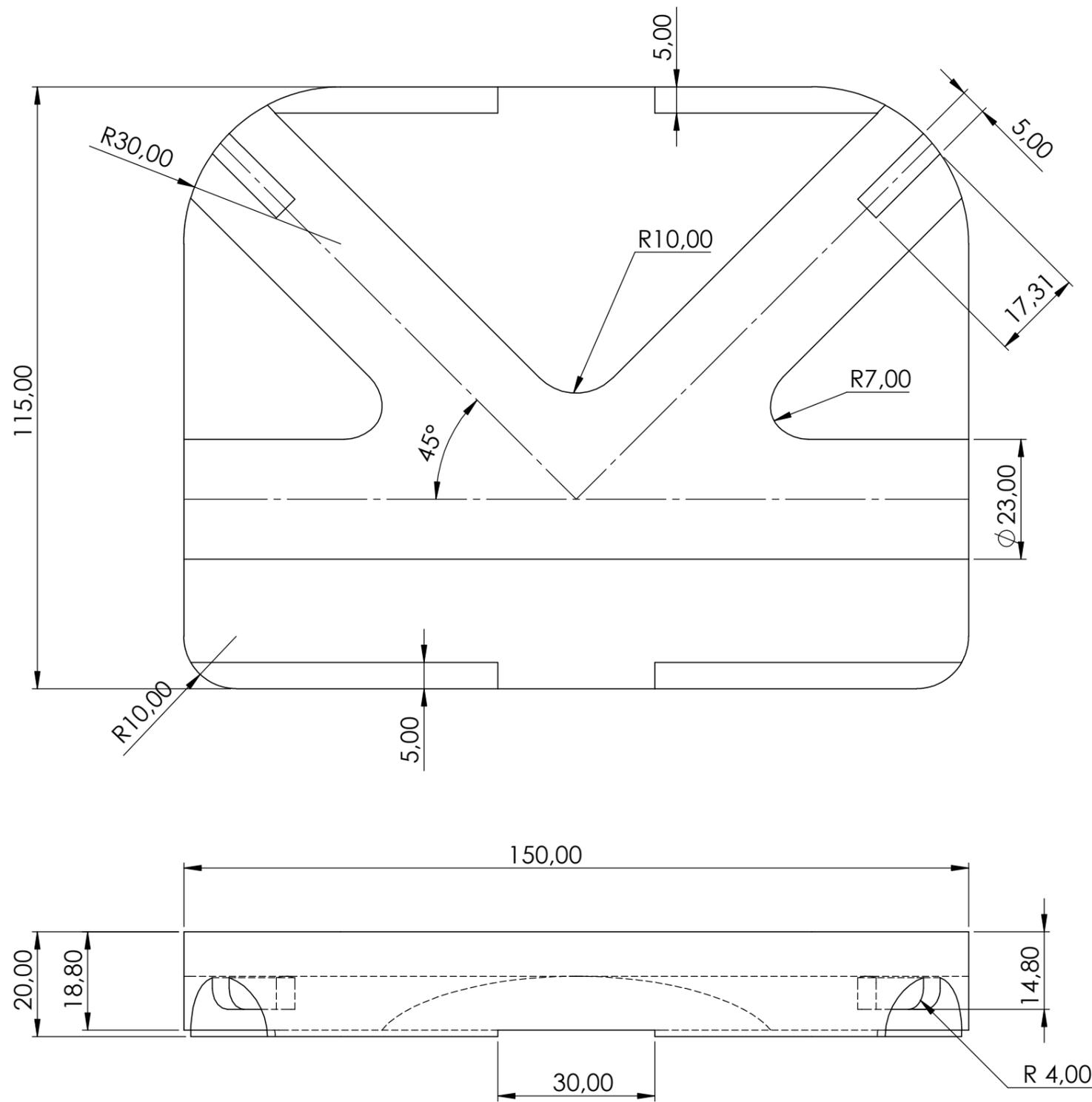
	Fecha	Autor	 Universidad de La Laguna	ESCUELA SUPERIOR INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA Grado en Ingeniería Mecánica Universidad de La Laguna	
<i>Nombre</i>	20/07/2022	Jehoshua			
<i>Apellidos</i>		González			
<i>Id. s. normas</i>	UNE-EN-DIN				
ESCALA:	TÍTULO DEL PLANO			Nº DE CONJUNTO: 3.00	
1:1					



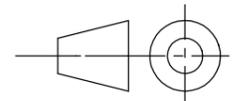
Vista perspectiva isométrica



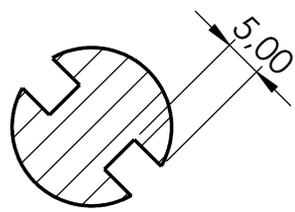
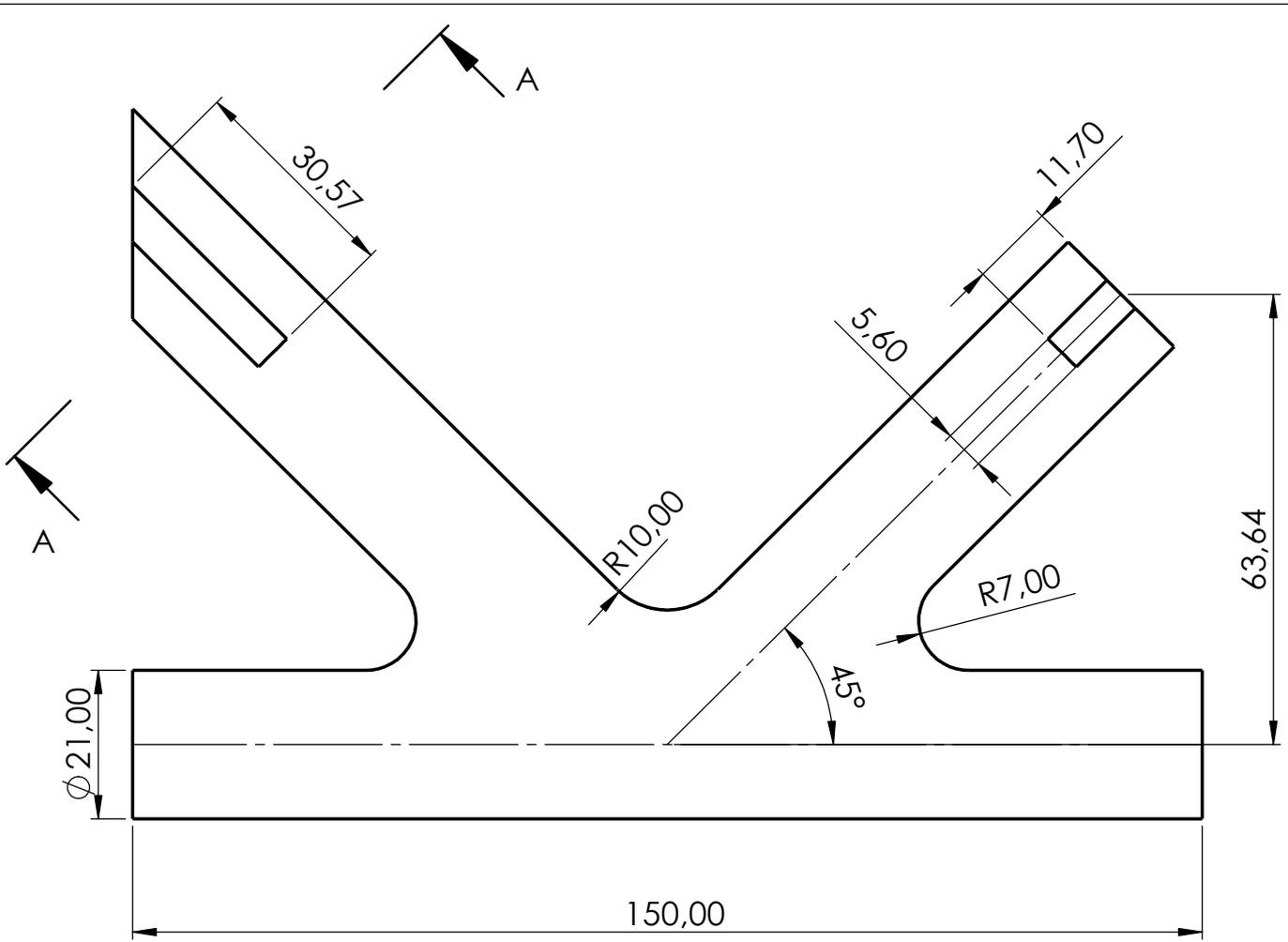
	Fecha	Autor	 Universidad de La Laguna	ESCUELA SUPERIOR INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA Grado en Ingeniería Mecánica Universidad de La Laguna		
<i>Nombre</i>	20/07/2022	Jehoshua				
<i>Apellidos</i>		González				
<i>Id. s. normas</i>	UNE-EN-DIN					
ESCALA:	TÍTULO DEL PLANO MOLDE NEGATIVO V2			Nº DE CONJUNTO: -		
1:1				Nº DE PLANO: 4.00		



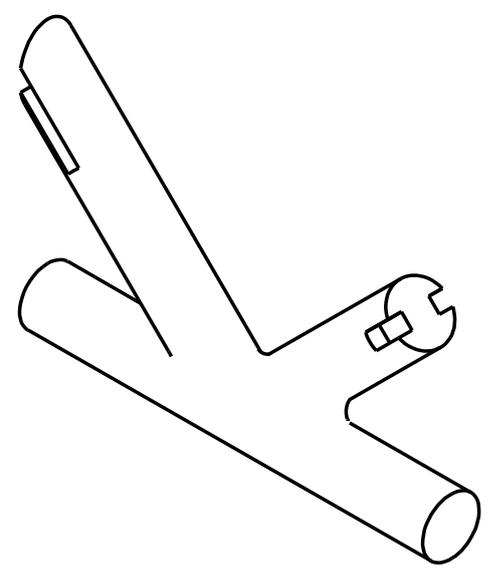
Vista perspectiva isométrica



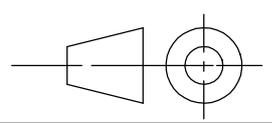
	Fecha	Autor	 Universidad de La Laguna	ESCUELA SUPERIOR INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA <i>Grado en Ingeniería Mecánica</i> <i>Universidad de La Laguna</i>		
<i>Nombre</i>	20/07/2022	Jehoshua				
<i>Apellidos</i>		González				
<i>Id. s. normas</i>	UNE-EN-DIN					
ESCALA:	TÍTULO DEL PLANO MOLDE PARA NÚCLEO HIDROSOLUBLE			Nº DE CONJUNTO: 5.00		
1:1				Nº DE PLANO: 5.01		



SECCIÓN A-A



Vista perspectiva isométrica



	Fecha	Autor	 Universidad de La Laguna	ESCUELA SUPERIOR INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA Grado en Ingeniería Mecánica Universidad de La Laguna	
<i>Nombre</i>	20/07/2022	Jehoshua			
<i>Apellidos</i>		González			
<i>Id. s. normas</i>	UNE-EN-DIN				
ESCALA: 1:1	TÍTULO DEL PLANO MACHO INTERIOR HIDROSOLUBLE			Nº DE CONJUNTO: 5.00	
				Nº DE PLANO: 5.02	