

DISEÑO ESTRUCTURAL Y VALORACIÓN DE UNA PASARELA POLIMÉRICA ENTRE LOS TM DE BENIARRÉS Y GAYANES (ALICANTE)



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

Grado en Ingeniería Civil

Curso 2016/1017

Junio 2017

Autor: Fernando Gómez-Trénor Sobrino

Tutor: María José Pelufo Carbonell

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIEROS DE CAMINOS,
CANALES Y PUERTOS





- **DOCUMENTO Nº1: MEMORÍA Y ANEJOS**

MEMORÍA

Anejo nº1: ANEJO FOTOGRÁFICO

Anejo nº2: ESTUDIO GEOTÉCNICO

Anejo nº3: CÁLCULO ESTRUCTURAL

Anejo nº4: EQUIPAMIENTOS

Anejo nº5: PROGRAMA DE TRABAJOS

Anejo nº6: VALORACIÓN ECONÓMICA

Anejo nº7: REPRESENTACIÓN GRÁFICA 3D

CONTENIDOS ADICIONALES: Cálculos estructurales

- **DOCUMENTO Nº2 PLANOS**

1. Situación general

2. Topografía estribos

3. Definición general

4. Sección transversal

5. Alzado y definición de rigidizadores

6. Definición y laminado de elementos estructurales

7. Modelo estructural

8. Definición de estribos y junta de dilatación

9. Definición y laminado de unión

10. Equipamientos

Documento nº1

MEMORIA Y ANEJOS

**DISEÑO ESTRUCTURAL Y VALORACIÓN DE UNA PASARELA
POLIMÉRICA ENTRE LOS TM DE BENIARRÉS Y GAYANES
(ALICANTE)**

Autor:

Fernando Gómez-Trénor Sobrino

Tutor:

María José Pelufo Carbonell

JUNIO 2017

GRADO EN INGENIERÍA CIVIL

CURSO 2016/2017

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA



MEMORIA

DISEÑO ESTRUCTURAL Y VALORACIÓN DE UNA PASARELA POLIMÉRICA ENTRE LOS TM DE BENIARRÉS Y GAYANES (ALICANTE)

Autor:

Fernando Gómez-Trénor Sobrino

Tutor:

María José Pelufo Carbonell

JUNIO 2017

GRADO EN INGENIERÍA CIVIL

CURSO 2016/2017

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA





PRESENTACIÓN Y AGRADECIMIENTOS

Este documento es el resultado del trabajo realizado a lo largo del Grado de Ingeniería Civil y que se traduce en el diseño y valoración de una pasarela de materiales compuestos, que constituye el objeto de mi Trabajo Final de Grado.

La memoria se divide en dos partes: Bloque A, Introducción a los Materiales Compuestos y Bloque B, Diseño y valoración de la pasarela.

En la primera parte se proporciona a los lectores una visión general de los materiales compuestos, para familiarizarles con su uso en el campo de ingeniería civil, ya que, hasta ahora, no se han tenido en cuenta en la industria de la Construcción.

En la segunda parte, se concreta el proyecto eligiendo los materiales más idóneos, justificando el diseño realizado y elaborando una valoración estimativa del mismo.

Quiero comenzar expresando mi agradecimiento a mi tutora, Dr. Ing. María José Pelufo, por darme la oportunidad de realizar este trabajo, prestarme su apoyo y facilitarme mi labor con su enfoque. Igualmente, mi agradecimiento a Dr. Ing. Navrath Uwe de "RWTH Aachen", que me ha proporcionado las herramientas necesarias para llevarlo a cabo. Mi gratitud también va dirigida a la Dr. Nora Lardiés, de "Aimplas – Instituto Tecnológico del Plástico" por darme información y referencias en relación con este campo.

Quiero manifestar también mi reconocimiento a la empresa UNIFORT SL, a la que se hizo una consulta en relación a una fase del proyecto y nos facilitó una posible solución, al igual que a la empresa D.S. Brown, por el mismo motivo.

Por último, agradecer a mi familia por prestarme su apoyo y su comprensión durante el tiempo que ha durado la elaboración de este proyecto.



ÍNDICE

1 INTRODUCCIÓN	6	10 LOCALIZACIÓN.....	29
2 OBJETO.....	6	11 ESTUDIOS PREVIOS.....	30
BLOQUE A: INTRODUCCIÓN A LOS MATERIALES COMPUESTOS		11.1 Estudio topográfico.....	30
3 DEFINICIÓN	7	11.2 Estudio geotécnico-geológico	30
4 POLÍMEROS REFORZADOS CON FIBRAS.....	8	11.3 Estudio hidráulico	30
4.1 Propiedades generales	8	11.4 Estudio de soluciones.....	30
4.2. Fibras	10	12 DESCRIPCIÓN DE SOLUCIÓN ADOPTADA	32
4.3 Matriz.....	16	12.1 Geometría general	32
5 ESTRUCTURAS SANDWICH.....	17	12.2 Sección transversal	33
5.1 Espumas.....	18	12.3 Materiales empleados	33
5.2 Panel de abeja	18	12.5 Estribos.....	36
5.3 Sólidos.....	19	12.6 Equipamientos	37
6 PROCEDIMIENTOS DE PRODUCCIÓN	19	13 NORMATIVA LEGAL.....	37
6.1 Molde abierto	19	14 PROCESO CONSTRUCTIVO.....	37
6.2 Molde cerrado	21	15 PLAN DE OBRA.....	38
7 DURABILIDAD DE LOS MATERIALES COMPUESTOS	22	16 VALORACIÓN ECONÓMICA	38
7.1 Efectos ambientales	22	17 BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS	39
7.2 Efectos físicos	25		
8 UNIONES	26		
8.1 Uniones adhesivas	26		
8.2 Uniones mecánicas.....	26		
8.3 Comparación entre uniones adhesivas y mecánicas.....	27		
8.4 Uniones combinadas	27		
BLOQUE B: DISEÑO Y VALORACIÓN DE LA PASARELA			
9 ANTECEDENTES Y SITUACIÓN ACTUAL	28		
9.1 Antecedentes.....	28		
9.2 Situación actual	29		

1 INTRODUCCIÓN

Desde hace mucho tiempo el sector de la construcción ha estado dominado por el uso de materiales como el hormigón, acero y, en menor medida, la madera. Sin embargo, últimamente, viene apareciendo un nuevo material destinado a desplazar los anteriormente citados: Los materiales compuestos.

Antiguamente, el empleo de estos materiales estaba relegado en exclusiva a aplicaciones aeronáuticas y aeroespaciales, pero, cada vez más, se ha ido ampliando a otras áreas como pueden ser la ingeniería civil y la edificación.

Si bien no es muy frecuente, comienzan a diseñarse y a construirse, puentes en materiales compuestos, debido a su gran variedad de ventajas en comparación con otros materiales. Esto hace que sea, en ocasiones, el material ideal a la hora de diseñar estas estructuras.

Uno de los motivos se debe a su gran resistencia a la corrosión provocando que los costes de mantenimiento sean inferiores a puentes de materiales convencionales. Además, la ligereza de los materiales compuestos permite un montaje mucho más rápido en puentes fabricados íntegramente con estos materiales. No hay que olvidar las excelentes propiedades mecánicas que tienen, en muchos casos, superiores al acero estructural.

No obstante, el uso de los materiales compuestos como material estructural conlleva una serie de inconvenientes como la falta de información acerca del impacto de agentes externos en sus propiedades mecánicas a la vez que la falta de normativa de diseño aplicable a ingeniería civil. Asimismo, la naturaleza anisótropa del mismo hace complicado el diseño y ejecución de este tipo de estructuras. Estos inconvenientes provocan que la industria de la Construcción sea aún reticente en aceptar este material y que se muestren reacias a admitir nuevas tecnologías y cambios.

Es precisamente esta falta de información y desconocimiento sobre estos materiales en la ingeniería civil lo que me ha atraído a la hora de plantearme a hacer este proyecto. Ha supuesto un reto en todos los aspectos, no solo por investigar el material y su comportamiento, sino además por utilizar un software totalmente desconocido para mí y muy diferenciado de otros programas más conocidos para la ingeniería civil como son el SAP o el CYPE.

Uno de los motivos por los que acudí al programa de Vías Verdes es que su objetivo es el de adaptar vías abandonadas y obsoletas y darles nuevos usos. Así se percataron de que había una demanda de turismo ecológico y cicloturismo y vieron la posibilidad de utilizar estas antiguas vías creando auténticos caminos en la naturaleza para satisfacer estas demandas. Es precisamente esta visión de dar una nueva utilidad y nuevas perspectivas a algo ya anticuado lo que me llevo a plantearme el usar este material tan novedoso sustituyendo a otros materiales más tradicionales.

2 OBJETO

El estudio tiene como objeto la justificación y valoración del diseño de una pasarela polimérica en el viaducto número 3 de la Vía Verde del Serpis, Alicante, para permitir el paso de peatones y vehículos de emergencia.

Para la redacción del mismo, su desarrollo se realizó en dos fases:

- En una primera fase, desde octubre 2016 hasta marzo 2017, se procedió a investigar y seleccionar el programa de cálculo más adecuado al estudio. Una vez elegido, se invirtió mucho tiempo en familiarizarse con dicho programa hasta conseguir un nivel de conocimiento adecuado para el desarrollo del mismo. Al mismo tiempo, se realizó una investigación sobre los materiales compuestos y su empleo en pasarelas, buscando ejemplos reales de puentes de materiales compuestos. Posteriormente se empezaron a elaborar distintos bocetos en el software de posibles diseños de la pasarela.
- La segunda fase, desde marzo 2017 hasta la finalización del trabajo, tomando como base todo lo aprendido en los meses anteriores, se centró en el diseño definitivo de la pasarela utilizando el programa antes mencionado y en el desarrollo de cada una de las partes que componen este estudio, para finalizar con su redacción y, posterior, exposición.

3 DEFINICIÓN

Generalmente, se denomina material compuesto a aquel material que ha sido formado por la combinación de dos o más materiales de distinta naturaleza [1]. Este nuevo material se caracteriza porque posee unas características finales que son mejores a las que tiene sus componentes por separado.

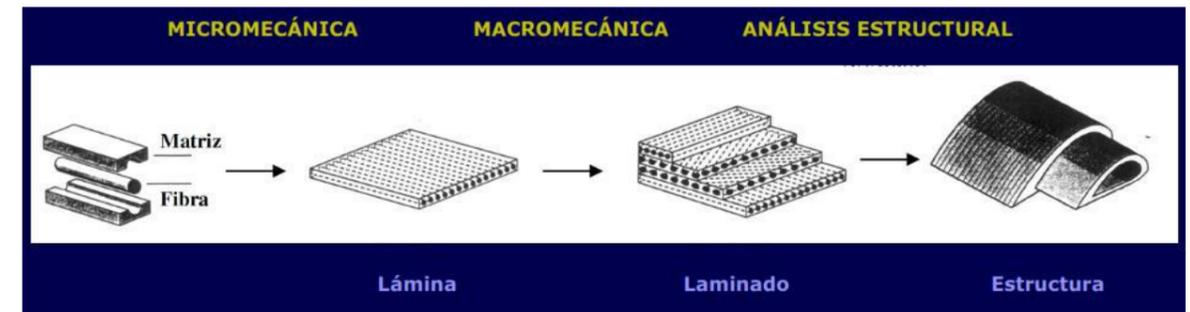


Figura 1 Niveles de toma de decisiones de los materiales compuestos [27]

Partiendo de esta definición, se podría considerar el hormigón estructural o el tapial como materiales compuestos empleados desde la antigüedad en la construcción, si bien actualmente se hace referencia a los nuevos materiales compuestos.

Estos nuevos materiales compuestos están constituidos por dos componentes muy diferenciados y con distintas funciones cada uno [3]:

- **Matriz:** Se encarga de aportar cohesión al material, configurarla geoméricamente y transmitir los esfuerzos. Normalmente es flexible y poco resistente.
- **Refuerzo:** Aporta rigidez y resistencia al material.

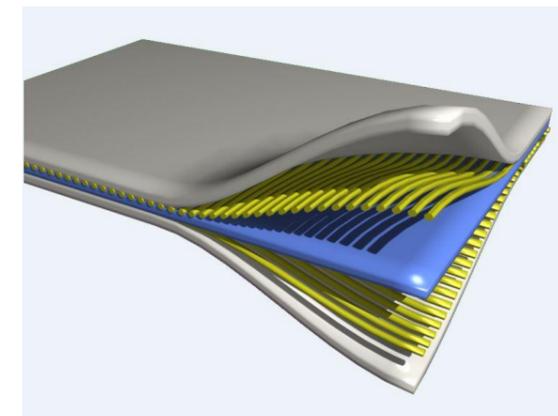


Figura 2 Esquema del material compuesto con sus dos componentes principales: Fibra y Matriz [16]

Bloque A: INTRODUCCIÓN A LOS MATERIALES COMPUESTOS

En función del tipo de matriz y de la forma que posea el refuerzo, existen una gran variedad de materiales compuestos, si bien los más comunes se dividen en tres grupos [2]:

- **Compuestos de matriz metálica (MMC).** Especialmente empleados en la industria de la automoción, estos materiales emplean metales como el aluminio para formar la matriz, y fibras o partículas como refuerzo.
- **Compuestos de matriz cerámica (CMC).** Se disponen para situaciones con altas temperaturas. Usan compuestos cerámicos para actuar como matriz y se refuerzan con fibras cortas.
- **Compuestos de matriz polimérica (PMC).** Se tratan de los materiales más comunes y empleados. También se les conoce como “fiber reinforced polymer” o “FRP” (conocido en español como polímeros reforzados con fibras), entendiendo estos materiales como aglomeraciones de series de fibras que funcionan como refuerzo, y de una resina polimérica como matriz.

Estos últimos son los empleados en la Construcción [3], por lo que este documento se centrará únicamente en su explicación.

4 POLÍMEROS REFORZADOS CON FIBRAS

Como se ha comentado anteriormente, estos materiales se componen de resinas poliméricas y de fibras de refuerzo.

Las primeras tienen un uso limitado en las estructuras por sí solas, ya que sus propiedades mecánicas no son muy altas, en comparación con, por ejemplo, el acero. Sin embargo, entre otras de sus propiedades, poseen la habilidad de formar fácilmente formas complejas.

El empleo de las segundas como refuerzo viene condicionado por el posible fallo por debajo de su límite teórico. Cuando el refuerzo está tensionado, se producen defectos aleatorios superficiales que hacen que el material se rompa y falle por debajo de su punto de rotura [2].



Figura 3 Filamentos de fibras de carbono [28]

Para solucionar este problema, el material de refuerzo se produce en forma de fibra, para que, cuando aparezcan estos defectos, estén limitados a un número pequeño de fibras y así asegurar la resistencia teórica del material. Sin embargo, esto hace que las fibras solo manifiesten propiedades a lo largo de la longitud de la fibra, del mismo modo que las fibras de una cuerda, haciendo que el material resultante sea anisotrópico, es decir, que tenga propiedades distintas según la dirección.

El material resultante tendrá unas propiedades resultado de la combinación de las de la resina y las de la fibra.

4.1 Propiedades generales

A pesar de que existe una amplia variedad en las diferentes disposiciones de elementos para la fibra y matriz, todos ellos comparten una serie de propiedades generales [4,5]:

- **Buenas propiedades mecánicas**

Los materiales compuestos son los materiales idóneos para conseguir altas propiedades mecánicas, de tal forma que los tableros de puentes de materiales compuestos tienen una capacidad de carga del orden de seis y siete veces comparado con uno de hormigón con solo el 20% del peso.

- **Baja densidad**

Dada su ligereza, en torno a 1,8 g/cm³, los materiales compuestos son muy empleados en la industria aeroespacial y automovilística. En el campo de la construcción, esto se traduce a una gran facilidad de transporte y montaje.

- **Buena resistencia a la corrosión y a agentes ambientales**

En función el tipo de matriz que se seleccione, se pueden obtener una alta resistencia ante cualquier agresivo químico. Hace que sea una opción muy viable en aplicaciones costeras o marinas. De hecho, viene siendo habitual emplear materiales compuestos en plantas químicas.

- **Flexibilidad de formas**

Se puede realizar una gran variedad de formas y acabados.

- **Alta resistencia dieléctrica y estabilidad dimensional**

Por su naturaleza los materiales compuestos son aislantes eléctricos. Además, normalmente, presentan un coeficiente de dilatación térmica muy reducido manteniendo su forma en condiciones ambientales o mecánicas muy severas.

- **Gran capacidad de consolidación de partes**

Los materiales compuestos permiten el ensamblaje de componentes disminuyendo el número de elementos que lo forman y, por lo tanto, el número de uniones. La disminución de partes y de uniones se traduce en reducciones de peso y de coste de material.

Algunas de estas características se manifiestan en los siguientes ejemplos:

- Módulos de habitaciones prefabricadas de materiales compuestos llamadas Spacebox. Son capaces de adosarse entre sí y llegar hasta tres alturas, configurando un edificio completo. Se realizan en taller y se transportan hasta la obra para ser apilados de manera rápida y sencilla.



Figura 4 Módulos habitables prefabricados de material compuesto [16]

- Las conexiones empleadas en los tableros de materiales compuestos, que permiten el ensamblaje de varias piezas para conformar el conjunto de la estructura.



Figura 5 Uniones tipo de tableros de material compuesto [23]

- El museo de Arte moderno de San Francisco, cuya fachada es el mayor ejemplo de empleo de materiales compuestos en la arquitectura en los Estados Unidos. Está formada por más de 700 paneles, algunos de 1,5 metros de ancho y 9 metros de altura, constituyendo cerca de 7804 m² de fachada. Con este ejemplo, se ilustra la flexibilidad de acabados de los materiales compuestos.



Figura 6 Museo de Arte Moderno de San Francisco [16]

- El nuevo faro de Valencia que es el primero del mundo construido íntegramente con materiales compuestos (fibra de carbono y fibra de vidrio en este caso). Su peso total es de 3 toneladas, completándose su colocación en solo 3 horas. El uso de los materiales compuestos garantiza una gran resistencia a la exposición de ambientes marinos a la estructura.



Figura 7 Nuevo faro de Valencia de materiales compuestos [16]

4.2. Fibras

La fibra se define como un filamento longitudinal formado por un solo material. Los diámetros de los filamentos oscilan generalmente entre los 6-15 μm , pero se pueden encontrar actualmente hasta los 30 μm . En caso de mayores diámetros, existe el riesgo de defectos en la superficie y reducción de resistencia.

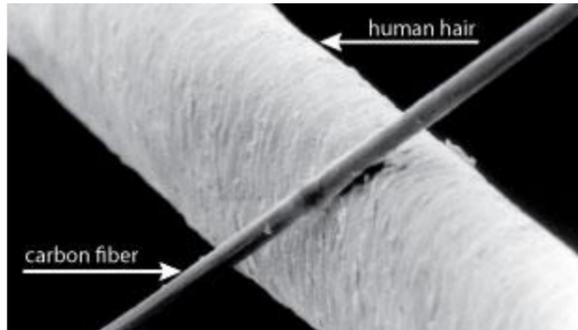


Figura 8 Comparación entre los diámetros del cabello humano y la fibra de carbono [28]

Para ello, la fibra debe disponer de un módulo de elasticidad y resistencia suficientemente alto, poca variación de resistencia, así como uniformidad en su diámetro [6].

Dentro de los materiales compuestos, las fibras más empleadas como refuerzo son las fibras de vidrio, carbono y aramida.



Fibra de vidrio

Fibra de carbono

Fibra de aramida

4.2.1 Fibras de vidrio

Debido a su precio más competitivo que otras fibras, la fibra de vidrio es el refuerzo más extendido en los materiales compuestos con cerca de un 90% del total. Se obtiene mediante la fundición de sus componentes, sílice (SiO_2) y óxidos (Al_2O_3 , MgO , etc) a 1400^a y su posterior estiramiento del material por una serie de hileras, formando los filamentos [5,6].

Distintas variaciones del proceso generan distintos tipos de fibras de vidrio. Los tipos más empleados en ingeniería civil son los siguientes:

- Vidrio E (electrical): Es el refuerzo más empleado en los materiales compuestos y el más económico.
- Vidrio C (chemical): Tiene la mejor resistencia a los ataques químicos de todas las fibras de vidrio.
- Vidrio ECR: Es muy similar al vidrio E pero con mejores propiedades químicas.
- Vidrio R: Tiene una alta resistencia estructural y a la corrosión.
- Vidrio S2: Su contenido de sílice es mayor al igual que su resistencia en todos los aspectos.

Componentes	E	C	ECR
Oxido de silicio	54	65	54
Óxido de aluminio	15	4	15
Óxido de calcio	17	13	21
Óxido de magnesio	5	3	5
Óxido de sodio	<1	8	<1
Óxido de potasio	1	2	<1
Óxido de boro	8	5	0
Óxido de bario	-	1	0

Tabla 1 Contenido de óxidos de distintas fibra de vidrio [11]

Propiedad	E	C	ECR	R & S
Densidad específica	2,54	2,5	2,71	2,53
Resistencia a tracción (N/mm ²)	3400	3000	3300	4400
Módulo elástico (KN/mm ²)	72	69	72	86
Deformación en rotura (%)	4,8	4,8	4,8	4,8
Coefficiente termal de expansión ($10^{-6}/\text{C}^\circ$)	5	7,2	5,9	1,6 - 3,3

Tabla 2 Propiedades mecánicas de distintas fibras de vidrio [11]

4.2.2 Fibras de carbono

Las fibras de carbono son fibras de alto rendimiento muy empleados en ingeniería civil. Inicialmente, fueron desarrolladas para aplicaciones aeroespaciales durante 1950-1960, pero gracias a su progresiva reducción de precio hasta los 20 €/kg, su uso se ha extendido a todos los ámbitos. Este tipo de fibras generalmente se usa cuando se requiere de alta rigidez y resistencia, para justificar su coste.

La obtención de la fibra de carbono se realiza mediante la pirolisis y cristalización controlada a temperaturas de 2000-2400° de diferentes tipos de materias primas [7]. Estas materias primas son: PAN (poliacrilonitrilo) y brea. Si bien la forma más económica es a partir de brea, es mucho más frecuente obtener la fibra de carbono a partir del PAN.

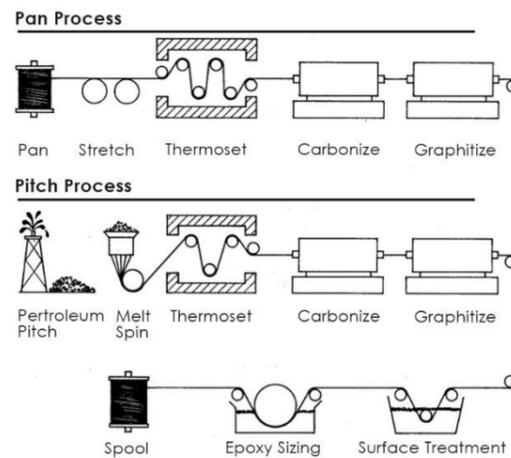


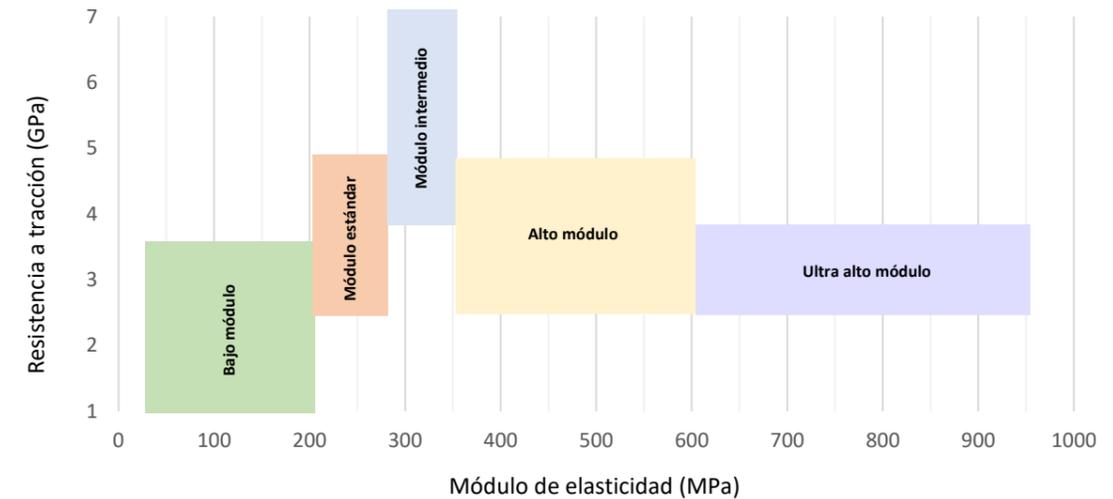
Figura 9 Distintos procedimientos de producción de la fibra de carbono [11]

Para el segundo caso, se produce una carbonización de las fibras de PAN en presencia de oxígeno. En función de la temperatura de tratamiento, se pueden obtener fibras con diferentes propiedades mecánicas: A mayor temperatura, mayor módulo elástico de la fibra y mayor coste de tratamiento [8].

La clasificación de las fibras de carbono se suele realizar en función de su módulo elástico. Siguiendo este método, se encuentran los siguientes tipos, de menor a mayor módulo elástico [9]:

- Bajo (LM)
- Estándar (HT)
- Intermedio (IM), también conocido como HS (Alta resistencia)
- Alto (HM)
- Ultra alto (UHM)

Las características de cada tipo se pueden observar en la siguiente tabla:



Gráfica 1 Propiedades mecánicas de las distintas fibras de carbono frente a sus módulos de elasticidad [29]

4.2.3 Fibra de aramida

Las fibras de aramida son una clase de fibras de altas prestaciones mecánicas muy extendidas en ingeniería civil. Esta fibra orgánica está constituida por carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno.

Se obtienen por hilado de poliamidas aromáticas. Previamente se ha extruido la disolución del polímero en un baño con agua fría al que se le añade un coagulante.

Varios tipos de fibra de aramida se distinguen como pueden ser el Kevlar, diferenciando entre el Kevlar 29 y 49, y Technora [6].

Respecto a sus características, se puede decir que las fibras de aramida tienen la ventaja de:

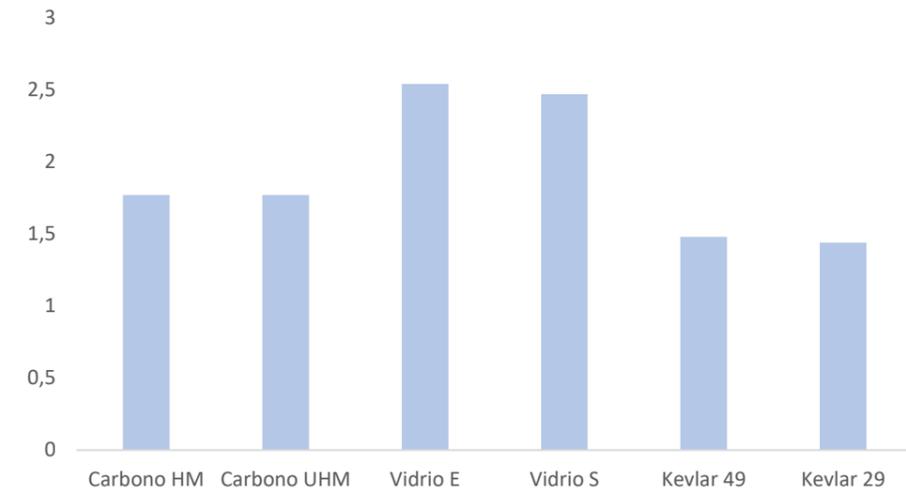
- Resistencia relativamente alta.
- Baja densidad.
- Módulo elástico intermedio.
- Buen comportamiento al impacto y frente al fuego.

Además, su precio competitivo, entre la fibra de vidrio y la de carbono, hace que se emplee como protección balística, y en la industria aeronáutica.

Sin embargo, estas fibras tienen la gran desventaja de tener una baja resistencia a la compresión (5000-1000 MPa). Además, son muy sensibles a la radiación ultravioleta [10].

Propiedad	Kevlar 29	Kevlar 49
Densidad específica	1,44	1,48
Resistencia a tracción (N/mm ²)	2750	2750
Módulo elástico (KN/mm ²)	83-100	115-130
Deformación en rotura (%)	2,4	4
Coefficiente termal de expansión (10 ⁻⁶ /C ^o)	-2	-2

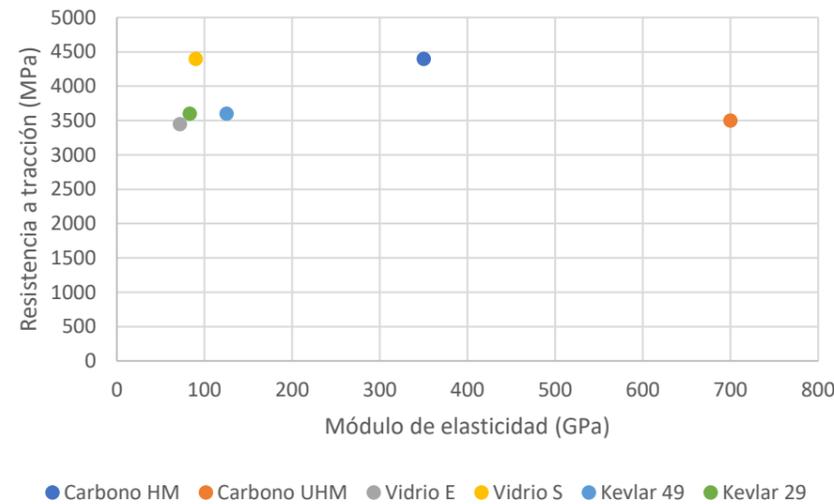
Tabla 3 Propiedades mecánicas de las distintas fibra de aramida [11]



Gráfica 3 Densidades específicas de distintos fibras de refuerzo [27]

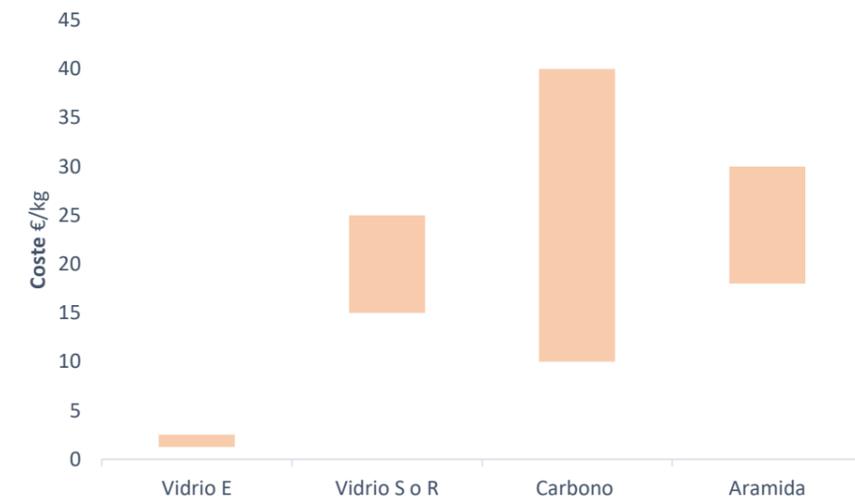
4.2.4 Comparación entre fibras

Los siguientes diagramas muestran la comparación entre las distintas propiedades mecánicas longitudinales de las fibras anteriormente mencionadas [6].



Gráfica 2 Resistencia a tracción frente a los módulos de elasticidad de los distintos fibras de refuerzo [11]

Además, se adjunta un gráfico comparativo del precio unitario de distintos tipos de fibra.



Gráfica 4 Precio unitario de distintos tipos de fibra de refuerzo [27]

4.2.5 Formas de presentación de fibra

Un aspecto muy importante en las fibras de refuerzo es la forma en la que están dispuestas y presentadas ya que va a influenciar en la elección del proceso de producción del material compuesto y las características mecánicas del mismo.

Habitualmente la clasificación de las formas de presentación de las fibras se realiza diferenciando según la disposición de las fibras. Partiendo de esta base, se pueden distinguir tres disposiciones distintas [6,11]:

- **Unidireccional** donde las fibras solo se disponen en una sola dirección.
- **Bidireccional** donde la disposición se realiza en dos direcciones, bien sea 0° y 90° , o $\pm 45^\circ$.
- **Multidireccional**. En este caso, las fibras son distribuidas en distintas direcciones de manera o no aleatoria.

La relación entre estas disposiciones y presentaciones de las fibras puede verse en la siguiente imagen, al igual algunos de los procesos de producción asociados a cada caso, que se comentarán más adelante.

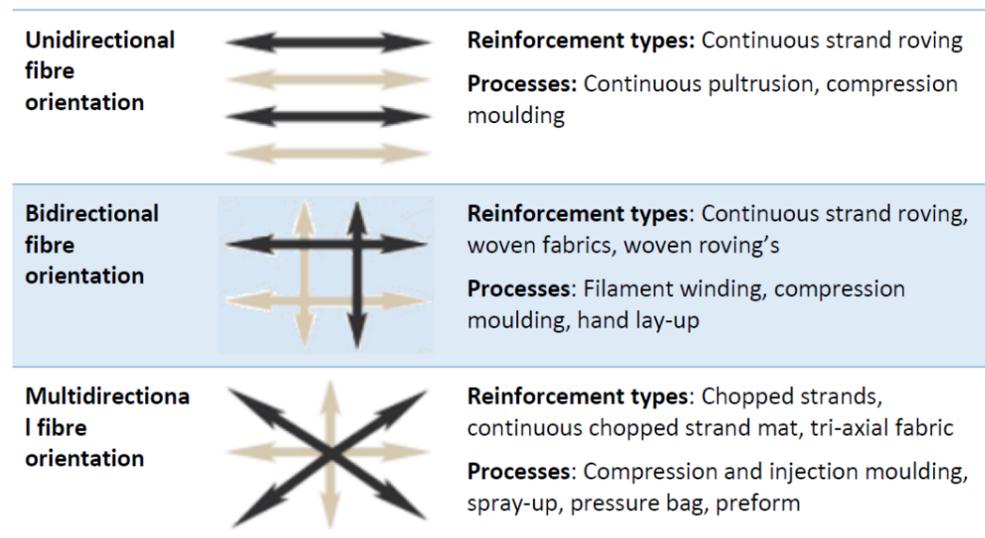


Figura 10 Distintas disposiciones de la fibras y las formas de presentación y proceso de producción correspondientes [11]

4.2.5.1 Rovings

Los “rovings” son un conjunto de fibras unidireccionales, similar a agrupaciones como la “ovilla” o “bobina”. Se emplea en procesos automáticos de formación de compuestos como pultrusión o enrollado de filamentos [6].

Se pueden distinguir dos tipos de rovings:

- **Rovings directos:** aquellos que están formados por fibras paralelas. Es empleado para procesos de producción de alto rendimiento que no desmerezcan al material por su capacidad para dar lugar a compuestos de mayor peso y volúmenes de fibra. Se llegan a alcanzar propiedades mecánicas diez veces superiores a otras agrupaciones, como el CSM.

- **Roving Unida.** Tienden a unas agrupaciones menos compactas y, por lo tanto, de menores propiedades que en el primer caso.



Figura 11 Bobina de fibra de vidrio, roving directo [11]

4.2.5.2 Tejidos

Un tejido o fabric se define como un refuerzo planar formado por láminas de fibras longitudinales de carbono, aramida o vidrio. Estas láminas se unen entre sí entrelazándose consigo mismas o con un material secundario que ata las fibras y las mantiene en su sitio [11].

A su vez, dependiendo de la orientación de las fibras empleadas y del sistema de unión de las mismas, se distinguen las siguientes categorías de tejidos: Unidireccionales, $0/90^\circ$ (Bidireccionales) y Multiaxiales [2].

1) Tejidos Unidireccionales

Son tejidos donde la mayoría de las fibras se disponen en una única dirección, llamados “warps”. Una pequeña parte de las fibras se disponen en otras direcciones, llamados “weft” o “fill” con el objetivo de mantener a las primeras en su posición, a la vez que confieren propiedades estructurales [6, 12].

Se consideran como tejidos unidireccionales a aquellos que tienen al menos el 90% de las fibras en una sola dirección, pudiendo ser 0° o 90° .

Estos tejidos dan la oportunidad de colocar la fibra en la posición requerida y en la cantidad óptima. De este modo, se consiguen las mejores propiedades de un tejido en un material compuesto.

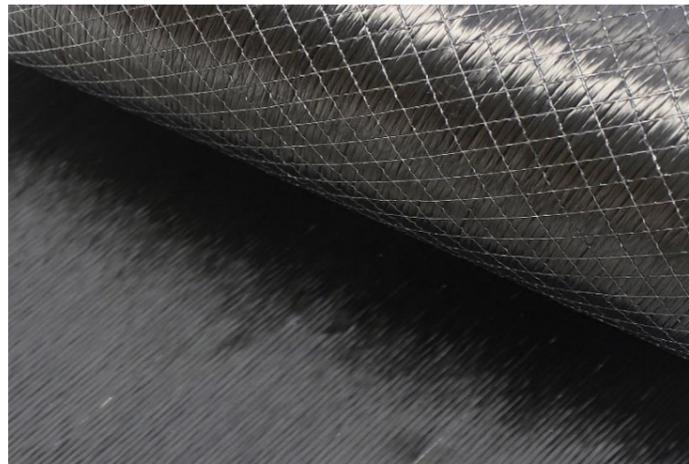


Figura 12 Tejido unidireccional de fibra de carbono [30]



Carbono-aramida



Vidrio-aramida



Vidrio-carbono

2) Tejidos 0/90°

Se trata de tejidos que combinan orientaciones de fibras de 0° y 90°. La gran mayoría de estos son conocidos como “Woven Fabrics”.

Estos se forman por el entrelazado de fibras a 0° y 90° en un patrón regular. La integridad del tejido se consigue gracias al entrelazado de las fibras.

La distinta posible configuración de warp y de weft da lugar a una amplia variedad de tejidos, siendo los más comunes [13]:

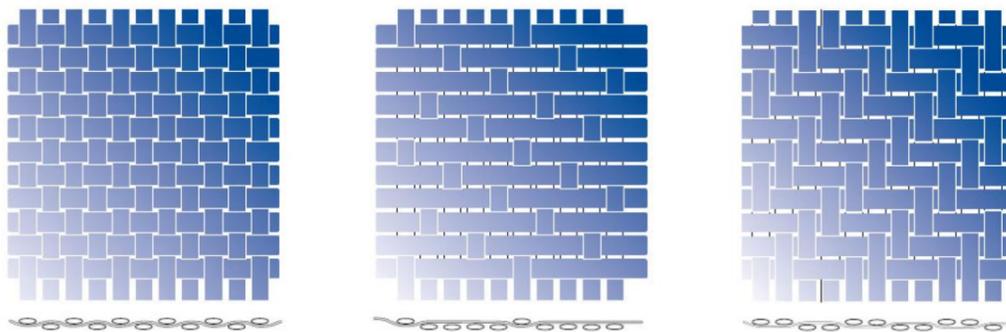


Figura 13 Tipos de tejidos de izquierda a derecha: Plain, satin y twill [13]

Dentro de este tipo de tejidos bidireccionales, se pueden encontrar otro grupo destacable como son los tejidos híbridos [2]. Estos hacen referencia a aquellos tejidos donde hay más de un tipo de fibra estructural en su disposición. Las combinaciones híbridas más habituales son:

Los woven roving son tejidos bidireccionales particulares de las fibras de vidrio. En comparación con los anteriores, son tejidos menos caros de producir y se impregnan con más facilidad. No obstante, dado el espesor mayor de sus láminas, solo son indicadas para laminados pesados y gruesos.



Figura 14 Woven roving de fibra de vidrio E [11]

3) Tejidos multiaxiales

Consisten en la apilación de láminas de fibras continuas, que se cosen con hilos secundarios. Este proceso permite una gran variedad de orientaciones de fibras, superior a los tejidos bidireccionales, que se combinan en un único tejido [6].

Los tejidos multiaxiales tienen las siguientes características:

Ventajas

Las dos grandes mejoras de estos tejidos sobre los tejidos bidireccionales son:

- **Mejores propiedades mecánicas**, ya que las fibras no se entrelazan y permite más orientaciones de fibra del mayor número de láminas del tejido.
- **Mejor velocidad de construcción**, dado que los tejidos se pueden hacer de mayor espesor y de múltiples orientaciones de fibra por lo que se requieren de menos capas en la secuencia de laminado.

Desventajas

El proceso de producción del tejido puede ser lento y el coste de la maquinaria alto [2]. Esto, con la mayor calidad final y, por lo tanto, mayor coste, hace que sea más costoso que los tejidos bidireccionales. Además, siempre existe la posibilidad de formación de bolsas de resina y otras zonas de bajas propiedades.



Figura 15 Tejido multiaxialno crimpado [30]

4) Mats

Se conoce como mats al conjunto de fibras dispuestas de manera aleatoria [6]. Existen varios tipos de mats: Mats de fibras cortadas, mats de fibras continuas y mats de superficie.

Mat de fibras cortadas (CSM)

El CSM es un material de refuerzo planar formado por rovings en el que los hilos de fibras aparecen cortados en pequeños trozos de aproximadamente 25-50 mm. Las fibras están distribuidas uniformemente y con una orientación aleatoria. La "unión" de las fibras se consigue con la aplicación de un binder, una resina capaz de unir los filamentos entre sí.

Este tipo de agrupación implica unos porcentajes de fibra muy reducidos, menor al 25 % y, generalmente, alrededor del 10%, donde se consigue el porcentaje efectivo para soportar un esfuerzo determinado.

El empleo de fibras cortas implica obtener peores propiedades mecánicas por lo que se termina limitando el uso de CSM a zonas con bajo compromiso estructural.



Figura 16 Mats de fibras cortadas de fibra de vidrio [30]

Mat de fibras continuas (CFM)

La producción de CFM es muy similar al CSM, pero las fibras son continuas, distribuidas uniformemente y orientadas aleatoriamente. El empleo de fibras continuas provoca obtener mejores propiedades que con el CSM. Es usado principalmente en pultrusión al igual que en otros procesos de producción continua y en el moldeo por presa caliente.



Figura 17 Mat de fibras continuas de fibra de vidrio [30]

Mats de superficie

También llamado velo de superficie, es un manto formado por vidrio tipo C con una densidad muy baja (30 gr/m²) que se coloca para dar mayor resistencia química, por ejemplo, en tanques de almacenamiento de químicos.



Figura 18 Velo de superficie [11]

4.2.5.3 Comparación entre presentaciones de los refuerzos

En función de la forma de presentación de los refuerzos, estos tendrán unas características u otras, al igual que mayor o menor precio. A continuación, se realiza una comparativa entre las distintas formas de presentación y su factor de coste [7]:

Forma de refuerzo	Factor de coste
Mats de fibras continuas	1,0 - 2,5
Tejidos 0°/90°	3,5 - 6,5
Mats de fibras discontinuas	1,0 - 1,5
Mats de superficie	5,0 - 6,0

Tabla 4 Comparativa del coste del refuerzo en función de la presentación del refuerzo [8]

4.3 Matriz

La matriz es la parte del material compuesto que aglomera las fibras, transmitiendo las cargas entre las mismas, además de aportar resistencia al conjunto en las direcciones donde no están las fibras. La forman principalmente resinas poliméricas, aunque también aparecen aditivos, catalizadores, etc.



Figura 19 Resina de poliéster [31]

Una característica muy importante de las resinas es su función de cohesión estructural, que la consigue con su módulo de elasticidad menor y una deformación en rotura superior a los de la fibra [10,11]. Atendiendo al efecto del calor en sus propiedades, las resinas se pueden diferenciar en dos grandes grupos: termoplásticas y termoestables.

Termoplásticas	Termoestables
Fuerzas de unión de baja intensidad	Fuerzas de unión muy intensas
Se funde al suministrar calor	Se descompone a elevadas temperaturas
Fácil de manejar, no pegajoso	Pegajoso
Remoldear es posible	Remoldear no es posible
Ciclos de curado cortos	Ciclos de curado largos
Se requiere altas temperaturas de fabricación	Temperaturas de fabricación más bajas

Tabla 5 Comparativa entre los dos grupos de resina [11]

Las resinas termoestables son las más empleadas en materiales compuestos de altas prestaciones. Estas resinas dan lugar a un producto rígido, insoluble e infusible mediante unas reacciones químicas, llamadas de curado. Entre las matrices termoestables, hay que destacar: Resina de poliéster, de viniléster, epoxy y fenólica.

4.3.1 Resina de poliéster

Está formado por la policondensación de uno o varios glicoles con uno o varios diácidos donde por lo menos uno de ellos contiene el doble enlace etilénico, provocando que el polímero se disuelva en estireno. Presenta un coste muy económico en relación a sus propiedades mecánicas y su ligereza.

Aunque es la primera resina a considerar en caso de emplear fibra de vidrio, hay que tener en cuenta su riesgo de combustión mediante cargas inorgánicas y su alteración por la radiación ultravioleta, hidrólisis y los ataques químicos.

4.3.2 Resina Viniléster

Se consigue gracias a la poliadición de resinas epoxy sobre el ácido insaturado acrílico o metacrílico. Se emplea de igual manera que las resinas de poliéster.

Su uso es recomendado cuando exista la necesidad de dar una protección química extra al material compuesto. Tiene una buena compatibilidad con la fibra de vidrio.

4.3.3 Resina Epoxi

La propiedad más destacable de las resinas epoxy es su buena capacidad de adhesión a una gran variedad de refuerzos lo que permite producir composites con un alto contenido en fibra. Son la primera elección para acompañar a la fibra de carbono.

Se caracterizan por mostrar una muy baja contracción durante el curado, así como por sus excelentes propiedades eléctricas, químicas y térmicas. Además, presenta una buena elongación a rotura, lo que permite transmitir adecuadamente la tensión en cualquier circunstancia, y una excelente resistencia a la hidrólisis.

4.3.4 Resina Fenólica

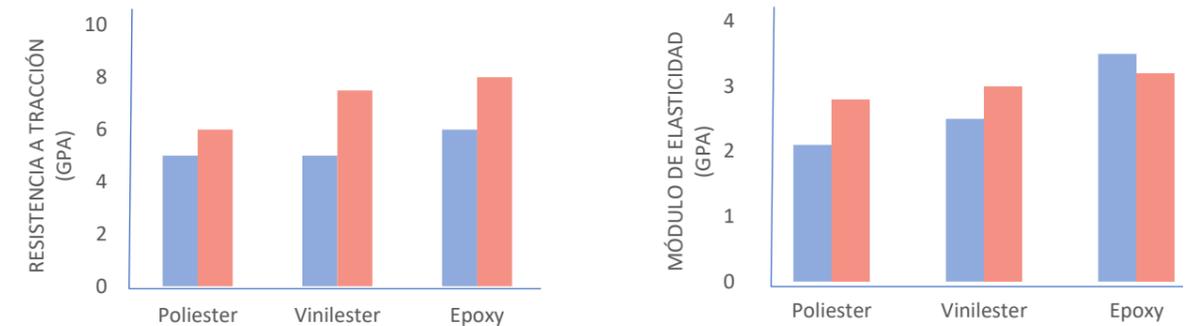
Es resultante de la reacción de un fenol y un aldehído. Desde el punto de vista químico existen dos grandes grupos:

- Novolac
- Resol: Más empleados

Dado su gran estabilidad térmica, se trata de una resina muy utilizada cuando hay estrictas exigencias de resistencia al fuego.

4.3.5 Comparación entre tipos de resina

Los siguientes gráficos muestran la comparación de resistencia y rigidez de las resinas termoestables más comunes [13].



Gráfica 5 Evolución de las propiedades mecánicas entre distintas fibras a lo largo del tiempo. Azul, resina a 20° durante 7 días; Rojo, resina a 80° durante 5 horas [27]

5 ESTRUCTURAS SANDWICH

Frecuentemente, se emplea estructuras tipo “sándwich” en los materiales compuestos. Este tipo de estructuras está compuesto de un núcleo (en inglés, “core”) de baja densidad, situada entre dos pieles, una a cada lado del núcleo. El objetivo de este núcleo es el de aportar inercia a la pieza, colaborar a la hora de producir una pieza concreta o incluso soportar esfuerzos de baja importancia. La unión entre las pieles y el núcleo se logra gracias a un adhesivo.

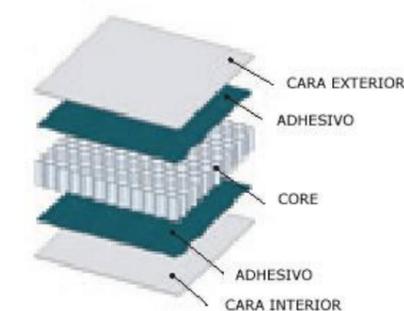


Figura 20 Esquema conceptual de la estructura tipo sándwich [16]

Las ventajas del empleo de esta estructura tipo sándwich son muy variadas [14]:

- Soportan altas cargas a tracción y a compresión en dirección normal al panel.
- Presentan excelente rigidez y resistencia específica.
- Presentan buena rigidez a torsión.
- Poseen una inmejorable relación rigidez / peso.
- Excelente capacidad para aislamiento térmico y acústico.

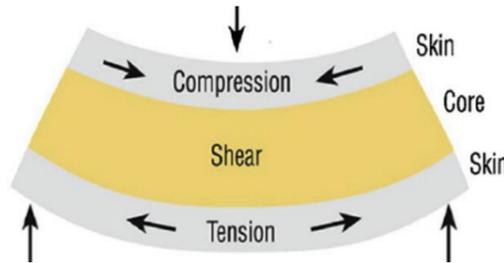


Figura 22 Funciones estructurales de cada parte que componen las estructuras tipo sándwich [2]

Los materiales que pueden ejercer la función de núcleo deben cumplir una serie de requisitos como pueden ser [6]:

1. Baja densidad
2. Resistencia en la dirección del espesor
3. Estabilidad térmica y dimensional
4. Resistencia al impacto, fatiga y humedad
5. Módulo de cizalladura alto
6. Resistencia a cortante alta
7. Fácilmente moldeables
8. Buena capacidad para generar un resistente pegado superficial

Aquellos materiales que cumplen estas condiciones se pueden encuadrar en tres grupos: espumas, paneles de abeja (“honeycombs”) y sólidos.

5.1 Espumas

Las espumas están formadas por materiales cuya macroestructura está constituida en celdillas cerradas o abiertas, y que pueden ser de diversos tipos de plásticos [6].

La forma de aplicación de las espumas puede ser por proyección in situ o por “slab stock”, esto es, la formación de estructuras sándwich con bloques de espumas previamente preparados. Con el slab stock se consigue unas propiedades más uniformes.



Figura 21 Tipos de espumas empleadas como núcleo de izquierda a derecha: PVC, PU, y espumas reforzadas con fibras [31]

En aplicaciones de ingeniería civil los materiales más empleados como núcleos son poliuretanos, polivinilos rígidos, y polimetra-crilamidas (PMI).

No obstante, hay que indicar que dentro de las espumas existen distintos grados de densidad, y que las propiedades mecánicas dependen de su densidad. A mayor densidad de la espuma, se consigue mejores resistencias de compresión y cortante. Para algunos usos estructurales, existen espumas a las que se incluyen refuerzos, normalmente fibras cortas, para mejorar sus propiedades.

5.2 Panel de abeja

Los núcleos de paneles de abeja son estructuras reticulares formadas a partir de la repetición de polígonos, normalmente hexágonos, cuyo uso queda restringido para estructuras ligeras por su alto coste.



Figura 23 Estructura hexagonal de los paneles de abeja [2]

Dentro de los núcleos de honeycomb, se pueden clasificar en función de:

- Tipo de celdilla
- Material empleado

Respecto al tipo de celdilla, se pueden identificar distintos tipos de núcleos [2,6]: Hexagonales, sobre expandido y flex-core.



En cuanto al material empleado, se distingue dos grupos: metálicos y no metálicos. En los primeros, se suele emplear aluminio, acero, titanio y aleaciones de alta resistencia. Los núcleos fabricados suelen estar fabricados en “papel” de aramida (Núcleo Nomex), vidrio, etc impregnados con resina fenólica.

5.3 Sólidos

Consiste en la aplicación de sólidos de baja densidad en elementos tipo sándwich. Generalmente el uso de sólidos, normalmente madera y especialmente madera de balsa, se limita a particiones y puertas.



Figura 24 Madera de balsa empleada como núcleo [31]

6 PROCEDIMIENTOS DE PRODUCCIÓN

El aumento del uso de plásticos y, especialmente, de plásticos avanzados para mayores compromisos estructurales ha hecho indispensable el desarrollo de diversos procedimientos de fabricación que permitan una reducción del coste y del ciclo de producción.

No obstante, hay que destacar que, a pesar de esta amplia variedad de métodos, el objetivo de todos ellos es el de impregnar la fibra con la resina y polimerizarla en un molde. Se consigue de esta manera que:

- Se elimine totalmente el aire remplazándolo por resina
- La polimerización se produzca en la forma y momento adecuado

La clasificación más ampliamente usada de los distintos métodos de producción es en función de la forma del molde, diferenciando entre molde abierto y molde cerrado [6,15]. Así pues, se distinguen los siguientes sistemas:

- **Molde Abierto**
 - Laminado manual (“Hand-lay-up”)
 - Moldeo por proyección
 - Bolsa de vacío
 - Enrollado de filamentos (“Filament Winding”)
- **Molde Cerrado**
 - Moldeo mediante transferencia de energía (RTM)
 - Pultrusión
 - Sheet Moulding Compound (SMC)
 - Bulk Moulding Compound (BMC)
 - Moldeo mediante Infusión de Resina (RIM)

6.1 Molde abierto

6.1.1 Laminado manual

El laminado manual es la técnica más sencilla que consiste en la colocación manual de las capas de fibras que son “humedecidas” por rodillos o cepillos al aplicar la resina (también conocido por laminado húmedo o “wet lay-up”). Una vez se ha colocado el número deseado de capas de fibras, se deja curar en condiciones atmosféricas (presión y temperatura ambiente) [6,15].

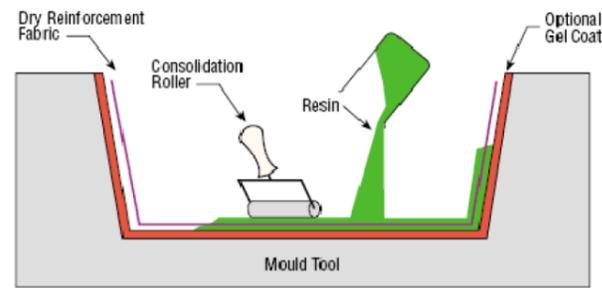


Figura 25 Proceso del laminado manual [2]

Con este proceso se puede emplear cualquiera de las materias primas habituales:

- Resinas de poliéster, epoxy, viniléster, fenólicas.
- Fibras de vidrio y naturales. Para fibras de altas prestaciones es preferible emplear otros métodos.
- Núcleos: PVC, Honeycomb, etc.

Este proceso es muy empleado para materiales compuestos por resina poliéster y fibra de vidrio, aunque también es utilizado para la resina fenólica en piezas de interiorismo con requerimientos frente a fuego [16].

Tiene la ventaja de que se trata de un método sin limitaciones en cuanto a las dimensiones y formas deseadas. Sin embargo, su gran dependencia de la mano de obra hace que, desde un punto industrial, se aplique solo a series relativamente pequeñas.

6.1.2 Moldeo por proyección

El moldeo por proyección es un proceso más industrial en el que la fibra es cortada por una pistola de proyección y proyectada junto con la resina directamente contra el molde. Los materiales depositados se compactan y se les dejan curar bajo condiciones atmosféricas. Dado que las resinas son proyectadas junto con las fibras, se utilizan resinas de menor viscosidad [16].

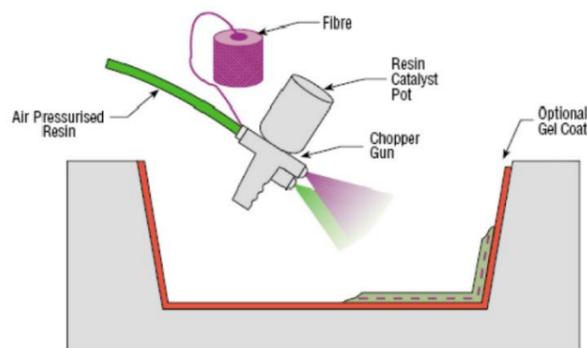


Figura 26 Proceso del moldeo por proyección [2]

La calidad del compuesto mediante este método es menor debido al uso de fibras cortas y de una mayor fracción de resina, provocando que adquiera más densidad. Además, aunque, en comparación el proceso mediante laminado manual, su ciclo de producción es menor, sigue existiendo una influencia importante de la mano de obra.

6.1.3 Moldeo por bolsa de vacío

Es una mejora al proceso de contacto a mano, donde posteriormente a la realización del estratificado, se hace el vacío sobre el laminado para conseguir una mejor compactación [6].

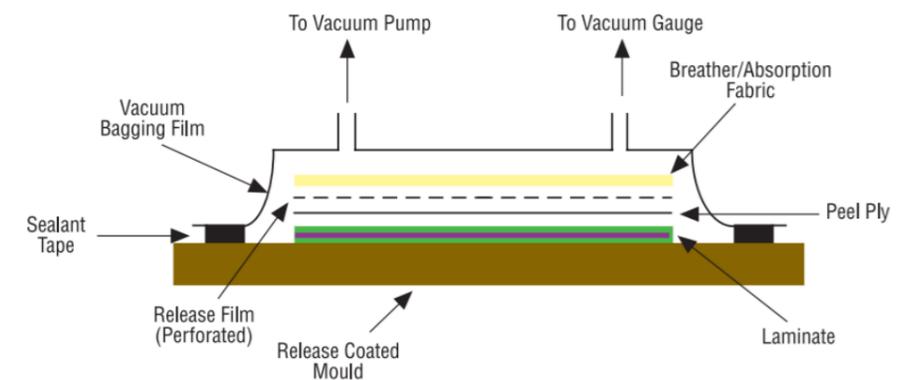


Figura 27 Moldeo de laminado manual ayudado por bolsa de vacío [2]

En comparación con los anteriores, presenta las siguientes ventajas:

- Mayores porcentajes de refuerzo y mejor calidad del compuesto.
- Mejor impregnación de la fibra eliminando el exceso de fibra.
- Reducción de las burbujas (aire atrapado).
- Reducción de los volátiles emitidos durante el curado.

Sin embargo, supone un mayor coste de producción, ya que la mano de obra tendrá que ser cualificada, a lo que hay que sumar el material de vacío. Además, como no termina de ser un proceso automatizado, la mezcla y control de la cantidad de resina sigue dependiendo del operador [16].

6.1.4 Enrollado de filamentos

Permite obtener piezas huecas por bobinado de diferentes refuerzos impregnados en continuo por una resina termoestable, sobre un molde o mandril.

Dado que se consigue unas buenas características mecánicas, la producción está muy mecanizada con posibilidad de hacerla continua y requiere de poca mano de obra, este procedimiento compite

directamente con otros materiales destinados a la fabricación de cuerpos huecos como por ejemplo el acero [16].

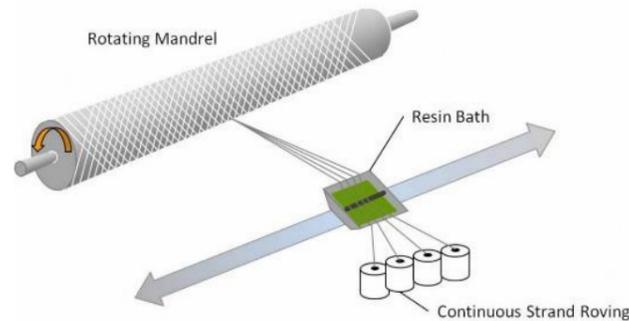


Figura 28 Enrollado de filamentos [2]

6.2 Molde cerrado

6.2.1 RTM

Se trata de un proceso de fabricación de alta calidad que consiste en el moldeo por transferencia de la resina desde un depósito hasta el interior del molde, donde impregna el refuerzo. El refuerzo “seco” se coloca en el interior del molde y posteriormente la resina se transfiere al interior del molde e impregna a la fibra. Según como se realiza la transferencia de resina, se distinguen 3 tipos [16]:

- RTM: La resina impregna el refuerzo gracias a la acción de una bomba.
- RTM-Light: Se realiza vacío en la cavidad del molde, quien realiza el cierre y ayuda a la bomba de inyección.
- Infusión o VARTM: En este caso, se coloca un plástico en la parte superior, en vez de un molde, y se emplea solo el vacío en la cavidad sin ayuda de a bomba.

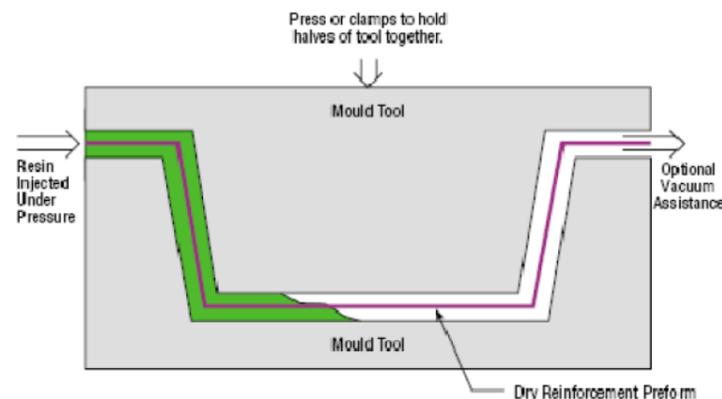


Figura 29 Moldeo por transferencia de resina (RTM) [2]

Con este método se logran conseguir dos buenas superficies el compuesto, además de ser capaz de fabricar piezas grandes, aumentando, eso sí, los costes de los aparatos. Se trata de un procedimiento mucho más automatizado que los casos anteriores con velocidades de producción mayores.

6.2.2 Pultrusión

La pultrusión es un proceso de fabricación automático, continuo y muy versátil de perfiles de sección constante de materiales compuestos. Estas secciones pueden ser en forma de barra, tubo, angular, viga cajón, placa o en formas más complejas [8].

Las fibras continuas se toman de las bobinas, y son impregnados, y dados forma por las guías. Se pueden incorporar tejidos para incrementar la resistencia y rigidez transversales.

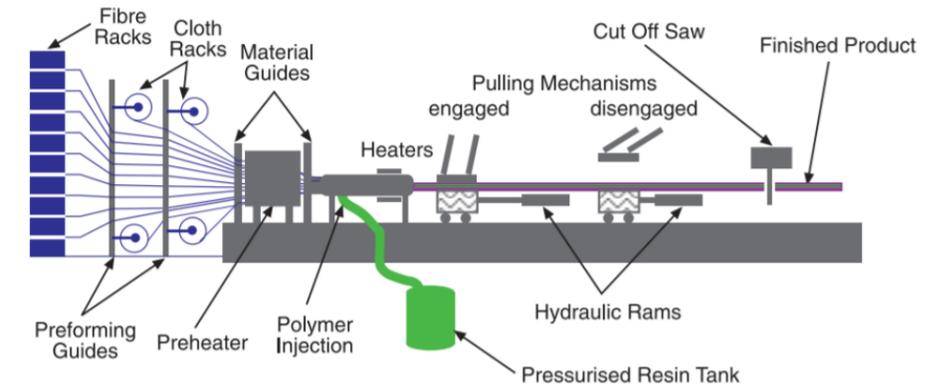
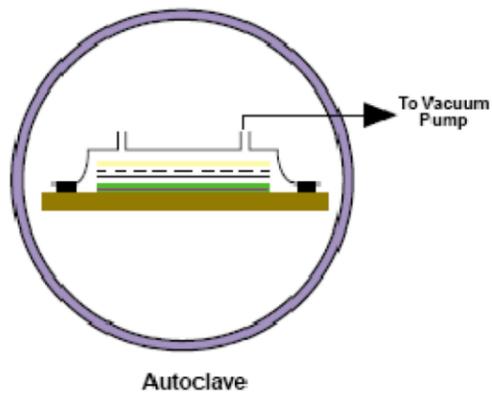


Figura 30 Pultrusión [2]

6.2.3 SMC

El moldeo por compresión de preimpregnados (“prepegs”) o semielaborados (SMC), consiste en un método similar al de laminación manual, pero aplicando un proceso combinado de presión y temperatura para obtener la pieza final [16].

Los prepegs representan otra forma de presentación de las fibras, las cuales están dispuestas en forma de láminas encontrándose ya preimpregnadas de resinas. Las láminas de prepegs presentan un mayor grado del aprovechamiento del material y producen piezas de mayores características ya que esta impregnación se realiza en fábrica.



Autoclave

Figura 31 Moldeo con autoclave [2]

Tras la aplicación de los prepegs, se somete a la pieza a un proceso de presión y curado. La aplicación de mayor presión se consigue con una bolsa de vacío, y la de mayor temperatura con hornos o mantas de calor. En caso de realizar ambos simultáneamente, se emplea el autoclave. Debido al tamaño de los elementos estructurales de las obras civiles, se tiende a preferir las bolsas de vacío y mantas térmicas, para cubrir más superficie.

6.2.4 BMC

Es una variedad del SMC para reducir costes en la mano de obra. Se emplea una pasta que contiene resina (30%), fibra corta de vidrio (20%) y cargas (50%). Tiene la gran ventaja de que permite fácilmente la automatización para altos volúmenes de producción.

6.2.5 RIM

Es un proceso de moldeo por inyección en el que dos reactivos de baja densidad (poliol e isocianato) se mezclan previamente y son inyectados a baja presión en un molde previamente cerrado.

Dentro del molde se produce la polimerización y el curado final de la pieza al producirse la reacción de los reactivos. Debido a que la polimerización es exotérmica, se consiguen unos tiempos de curado muy cortos y una buena calidad de los productos (homogéneos y sin burbujas). Además, permite producir piezas de todo tipo y tamaño.

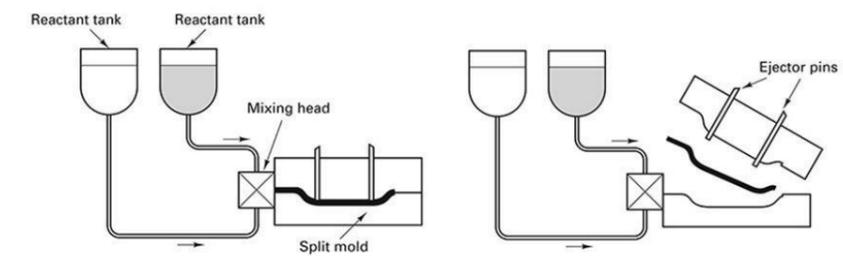


Figura 32 Moldeo por inyección [16]

7 DURABILIDAD DE LOS MATERIALES COMPUESTOS

Las infraestructuras están siempre expuestas a efectos del ambiente como pueden ser la humedad, ciclos de carga, etc. por lo que es importante conocer el comportamiento a corto y largo plazo de los materiales compuestos. Es de sobra conocido la durabilidad y rendimiento a largo plazo de los materiales compuestos en las industrias navales y aeronáuticas, pero es necesario establecer como son esos comportamientos en aplicaciones estructurales, donde no se puede asumir que sean los mismos [17].

Se distinguen dos grupos de efectos que ejercen una gran influencia en la evolución del material compuesto [11]: Efectos ambientales y efectos físicos.

7.1 Efectos ambientales

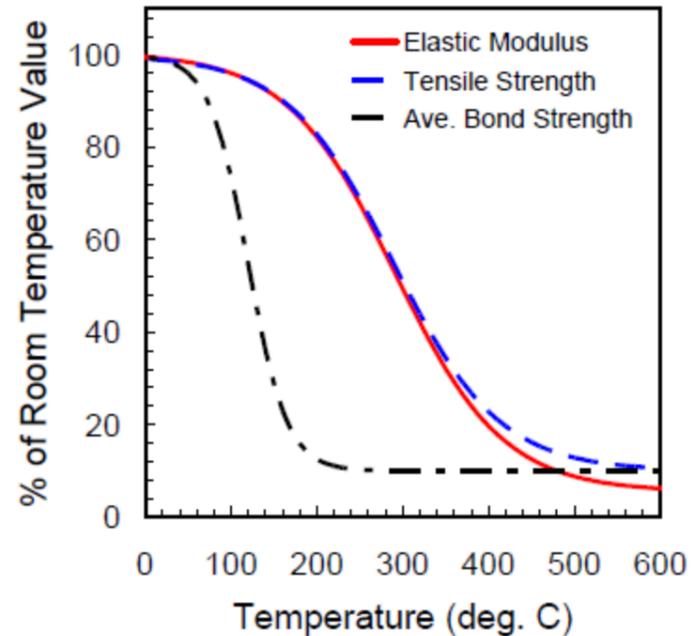
Los materiales compuestos tienen el beneficio de ser resistentes a la corrosión electro-química. Esto hace que sean ideales para aplicaciones como armadura y refuerzo de estructuras en ambientes marinos o húmedos. Sin embargo, si estos materiales son empleados en ambientes agresivos puede provocar fallos inesperados del material. Efectos que son potencialmente dañinos para los materiales compuestos son: temperatura, humedad, agentes químicos y radiación UV.

7.1.1 Efectos de la temperatura

Es bien sabido que la temperatura influye en las propiedades mecánicas del material compuesto [6,18]. A elevadas temperaturas todas las resinas se reblandecen a un punto en el que el polímero pasa de un estado vítreo a uno gomoso. Esta es la temperatura de transición vítrea (T_g) y es muy dependiente del tipo de resina y procedimiento de producción situándose en un rango entre 50° y 160° [6].

Cuando la temperatura excede la temperatura de transición vítrea T_g , las propiedades mecánicas de la matriz se reducen y, con ello, las del conjunto pudiendo llegar a reducciones de resistencia del 80%.

A la hora del diseño, viene siendo muy habitual limitar el uso de los materiales compuestos a temperaturas 10° - 20° menores que T_g .



Gráfica 6 Evolución de las propiedades mecánicas y capacidad adhesiva de armaduras de fibra de vidrio [11]

7.1.1.1 Coeficientes térmicos de expansión

Para las matrices termoestables, las más utilizadas, los coeficientes térmicos de expansión suelen estar entre 50×10^{-6} y 110×10^{-6} $^\circ\text{C}$. Las fibras de refuerzo, en cambio, presentan valores mucho más pequeños. Para la fibra de vidrio E, este es alrededor de 5×10^{-6} $^\circ\text{C}$, mientras que las fibras de carbono y aramida pueden llegar a tener coeficientes negativos [6,11].

El coeficiente térmico de expansión de los materiales compuestos no depende únicamente del tipo de refuerzo y de matriz, sino también de la geometría del refuerzo y su fracción del volumen total. Como es función de la orientación de la fibra, existirá un coeficiente de expansión para cada dirección considerada.

	Uni-Dir. 0°	Uni-Dir. 90°	Bi-Dir. Fibre	Mat + Roving
Vf	65%	65%	65%	37%
Coeficiente térmico de expansión 10^{-6}	8,6	14,1	9,8	11

Tabla 6 Coeficientes térmicos y volúmenes de fibra para compuestos de fibra de vidrio E y resina poliéster [6]

7.1.1.2 Temperaturas bajas y ciclos de congelación y descongelación

Los ciclos de congelación y descongelación pueden provocar microrroturas de la matriz, endurecimiento de la misma y degradación de la unión entre fibra y matriz. Esto se debe a la combinación de tensiones residuales por la rigidización de la matriz debido a temperaturas bajas y al distinto coeficiente térmico de expansión entre fibras y matrices [7,11].

La exposición de materiales compuestos a temperaturas entre -10°C y -40°C provoca, además, la reducción de la resistencia a tracción en la dirección de la fibra si bien aumenta la resistencia transversal debido al endurecimiento de la matriz.

Respecto a los efectos de ciclos de congelación y descongelación en las propiedades mecánicas del compuesto, estas se ven muy poco afectadas, si bien, en combinación con ambientes marinos, pueden ser muy perjudicadas.

7.1.1.3 Comportamiento frente al fuego

El comportamiento frente al fuego de los materiales compuestos varía considerablemente entre incombustible y altamente inflamable [6]. Por un lado, las fibras de refuerzo son incombustibles, a excepción de la fibra de aramida, y no contribuyen a la propagación del fuego con su combustión. Por otro lado, las resinas son compuestos orgánicos y, por lo tanto, combustibles.

Se puede concluir que el mayor condicionante es la resina empleada, si bien existen otros factores a tener en cuenta:

- **Tipo de matriz.** En función de la resina empleada, el comportamiento frente al fuego será completamente distinto. Las resinas de poliéster y vinilester tienen un comportamiento muy bajo ardiendo de inmediato. Con las resinas epoxy, el comportamiento es mejor y, por último, las resinas fenólicas tienen la mejor resistencia al fuego de todas considerándose como incombustibles.
- **Empleo de aditivos retardantes del fuego.** Si bien estos incrementan la resistencia, generalmente emiten gases tóxicos.
- **Tipo de refuerzos.** Todas las fibras son incombustibles exceptuando el caso de la fibra de aramida que contribuye a la propagación del fuego. Más detalladamente, las fibras de carbono muestran reducciones resistencia y rigidez a temperaturas superiores a 1000° . Las de vidrio y aramida a 600° y 300° respectivamente con reducciones de resistencia entre 20% y 60%.
- **Volumen de refuerzos.** En compuestos con volúmenes de fibra altos, hay menor material combustible (resinas) por lo que su comportamiento frente al fuego es muy superior. Por tanto,

disposiciones del refuerzo uni- y bidireccionales, que permitirán mayor volumen de este, presentarán mejor comportamiento al fuego que disposiciones aleatorias del refuerzo.

7.1.2 Respuesta frente a agentes químicos

Los compuestos de fibras de vidrio son comúnmente empleados en plantas químicas por su alta resistencia a ambientes básicos y ácidos. No obstante, dado su contenido de sílice, muestran susceptibilidad a agentes básicos y ácidos pudiendo llegar a la degradación y microrotura de las fibras. Además, debido a su mayor densidad, requieren de mayor relación de área y, por lo tanto, mayor zona de ataque químico. Estas desventajas desaparecen con el empleo de otras fibras de vidrio como ECR.

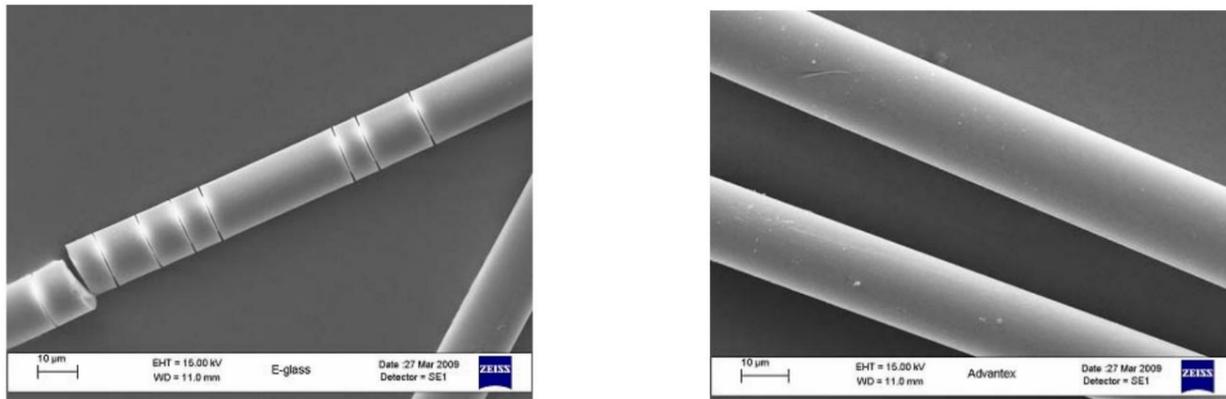


Figura 33 Comparación entre distintos tipos de fibra de vidrio tras 4 horas en una disolución con un 5% de HCl y a 95º: Izquierda: fibra de vidrio E; derecha: fibra de vidrio E-CR [11]

El impacto de agentes químicos en fibras de vidrio es mínimo, pero, en combinación con distintos niveles de carga y temperatura se puede llegar a reducir la resistencia a tracción entre un 0% y 75%. Las fibras de carbono, por el contrario, presentan un buen comportamiento a los agentes químicos (entre 0% y 20% de reducción de la resistencia en ambientes básicos), mientras que las propiedades de las fibras de aramida son más afectadas; entre un 10% y 50% de reducción de la resistencia y 0% hasta un 20% de la rigidez [6].

Respecto a las resinas, estas no son afectadas por ningún tipo de ácido, ya sea ácidos sulfúricos o nítricos, aunque estos pueden causar la oxidación de la matriz. Las consecuencias de los agentes básicos resultan en el reblandecimiento de la matriz siendo el más indicado para emplear, la resina de vinilester.

7.1.3 Humedad

Uno de los grandes problemas de los materiales compuestos es la influencia de la humedad. Todas las matrices orgánicas poliméricas absorben humedad a través de la absorción y difusión. Esto afecta a las propiedades térmicas, mecánicas y químicas de manera reversible o irreversible [6,18].

La absorción de la humedad conlleva la plastificación de la matriz reduciendo su resistencia, deformación en rotura, módulo de elasticidad y Tg. Un cambio entre un ambiente seco y un contenido de humedad del 1,5% puede resultar en una reducción del 50% de resistencia a flexión, y un contenido de humedad del 4%, una reducción del 75% de Tg para compuestos de fibra de vidrio.

Las características de la absorción estarán influenciadas por el tipo de matriz, calidad del laminado, espesor del mismo, condiciones de curado, proceso de fabricación, temperatura ambiental al igual que la interface entre fibra y matriz. Generalmente para todos los polímeros la velocidad de absorción de la humedad se reduce con el tiempo, al igual que la reducción en resistencia. Al principio tiene lugar un incremento fuerte hasta llegar al punto de saturación, donde se empieza a estabilizar.

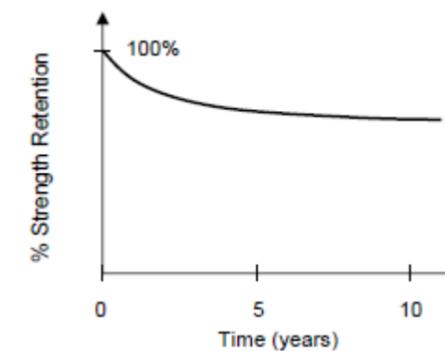


Figura 34 Reducción de la resistencia de los materiales compuestos debido a la absorción de la humedad [6]

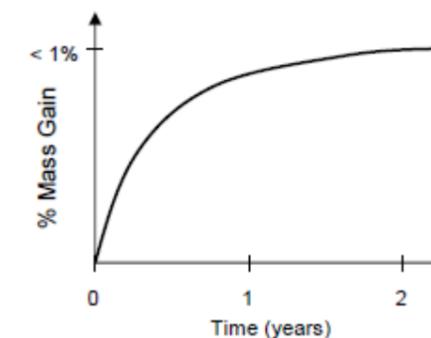


Figura 35 Absorción típica de los materiales compuestos [6]

En relación a la influencia de la tipología de la matriz, se ha comprobado mediante ensayos, que las resinas de vinilester y la epoxy son las matrices que se comportan mejor con la humedad y, por tanto, recomendables para su uso en aplicaciones de ingeniería civil. La resina de poliéster tiene un comportamiento muy pobre y se desaconseja su uso.

Con respecto al refuerzo empleado, las fibras de carbono apenas absorben agua mientras que en las de vidrio se aprecia un mayor nivel de absorción. Las fibras de aramida requieren de protección por un sistema apropiado de resinas, dado que estas absorben agua.

7.1.4 Radiación Ultravioleta

Todas las matrices son susceptibles a la prolongada radiación UV pudiendo llegar a descolorarse y endurecer. Esto se puede solventar en parte mediante el uso de capas resistentes a los rayos UV, como gel coat, o bien mediante el empleo de resinas y pinturas resistentes.

Hay que añadir que, aunque tanto la fibra de vidrio como la de carbono se mantienen inalterados bajo la exposición de radiación UV, las fibras de aramida son muy sensibles a la radiación UV. Diversos estudios han constatado una reducción de la resistencia del 50% para compuestos de fibra de aramida bajo la exposición de radiación UV durante cinco semanas.

Para el material compuesto en sí, se ha comprobado que el mayor daño posible se consigue con una combinación de radiación UV con humedad. Para la acción conjunta de estos dos factores, las resistencias a tracción se reducen:

- Entre 0% y 20% para compuestos de fibra de carbono.
- Entre 0% y 30% para compuestos de fibra de vidrio.
- Entre 0% y 40% para compuestos de fibra de aramida.

7.2 Efectos físicos

A continuación, se comenta brevemente el comportamiento de los materiales compuestos frente a efectos físicos, como el impacto, fatiga y fluencia.

7.2.1 Impacto

Existe una gran variabilidad de respuesta según el tipo de fibra que se tenga. Las fibras de vidrio tienen una buena resistencia al impacto dado su alta deformación en rotura. Las fibras de aramida son ampliamente usadas como protección balística por su excelente resistencia al impacto. Por último, las

fibras de carbono son las que peor se comportan en comparación con el resto de fibras por su baja deformación en rotura (alrededor de 1,5%).

7.2.2 Fatiga

La fatiga se suele definir como la reducción de las propiedades mecánicas del material en el tiempo debido a la alternancia de la carga. En función del tipo de refuerzo que tenga, las respuestas del material compuesto serán distintas.

Para el caso de la fibra de vidrio, su relativo bajo módulo elástico provoca que el material trabaje a deformaciones altas. Esto hace que sea más susceptible a la fatiga y se reduzca su vida útil. Generalmente, los compuestos de fibras de vidrio son más sensibles a la fatiga que otros con mayor módulo.

Para compuestos de fibra de carbono, estos tienen un comportamiento excelente frente a la fatiga incluso para tensiones muy altas. Esta resistencia es superior a la de otros materiales como el acero o el aluminio.

Los compuestos de fibra de aramida tienen un comportamiento bueno, siendo superior al de compuestos de fibra S y E.

7.2.3 Fluencia

Se suele definir la fluencia como el fenómeno donde el material experimenta un incremento de deformación bajo una carga constante. Esa deformación del material determina el módulo de fluencia, que hace referencia a la reducción del módulo elástico durante el tiempo. A mayor módulo de fluencia, mejor comportamiento del material a fluencia.

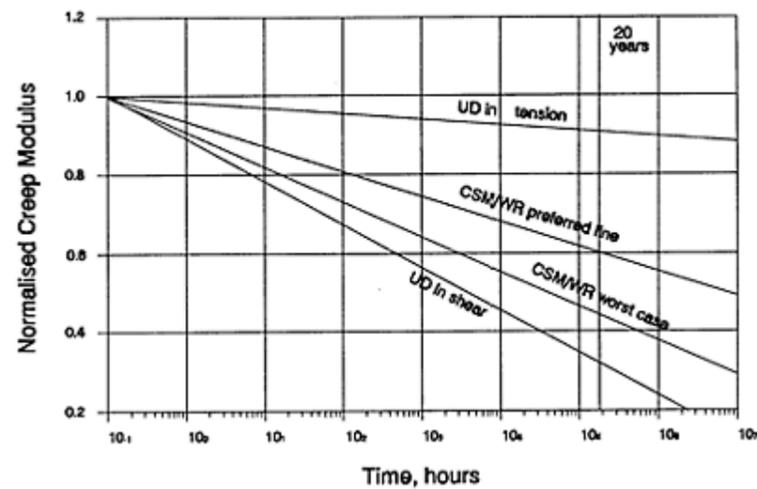
Generalmente, el comportamiento de la fluencia en materiales compuestos es bueno, pero varía mucho dependiendo del proceso de producción y de los materiales constituyentes. La parte más afectada por la fluencia es la resina si bien aquellas que sean dúctiles presentarán mayor fluencia que aquellas frágiles. De esta manera, las resinas termoestables como la epoxy no son tan susceptibles como lo son las matrices termoplásticas. Por el contrario, las fibras de refuerzo (fibra de vidrio, carbono y aramida) son muy resistentes a la fluencia.

El módulo de fluencia está influenciado principalmente por: Los componentes del material como el tipo de resina, volumen de fibra o forma de refuerzo y su orientación entre otros y los factores externos, como son la temperatura ambiente y la carga aplicada.

Generalmente un mayor módulo de fluencia se puede conseguir gracias a:

- Volúmenes altos de refuerzo.
- Unión fuerte entre la fibra y la matriz.
- Mayor margen entre el ambiente y la susceptibilidad de la resina a la temperatura.
- Resinas con alta temperatura de distorsión del calor (HDT) o temperatura de transición vítrea (Tg) suelen presentar mayor módulo.
- La presencia de humedad incrementa el efecto debilitando la matriz y degradando la unión entre la fibra y la matriz.

La evolución del módulo de fluencia en el tiempo puede verse en el siguiente gráfico.



Gráfica 7 Evolución del módulo de fluencia respecto al tiempo [6]

8 UNIONES

Las piezas de materiales compuestos son difíciles de conectar debido al carácter anisótropo y fibroso de sus componentes. Muchos factores, como la sensibilidad a la radiación UV o la influencia de la temperatura se tienen que considerar a la hora de seleccionar las conexiones [13].

Los dos tipos de conexiones empleadas en estas estructuras son las uniones adhesivas (o “bonded”) y las uniones mecánicas, al igual que su combinación.

8.1 Uniones adhesivas

Se llaman así porque las dos o más piezas se unen mediante un adhesivo. Los más comúnmente empleados son adhesivos epoxy, acrílicos y poliéster, que son escogidos según el tipo de resina empleada en la matriz del material compuesto.

En general, las cargas se transmiten de una pieza a otra por esfuerzos cortantes. Sin embargo, a veces, debido a la excentricidad de la carga, se generan esfuerzos normales en la unión. Esto se soluciona empleando uniones dobles.

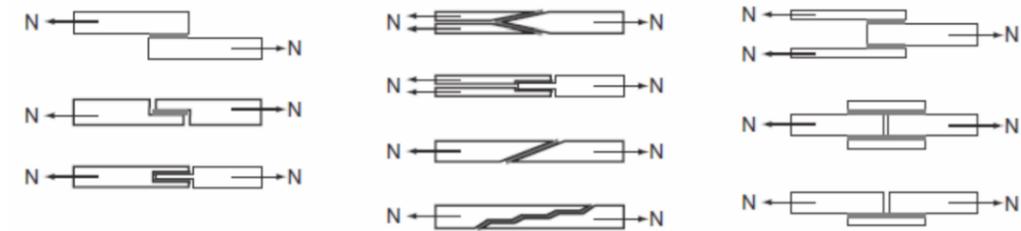


Figura 36 Tipos de conexiones adhesivas [8]

Los modos de fallo de estas uniones se reducen a: fallo del adhesivo, fallo de la cohesión del adhesivo o una combinación de las dos anteriores [8].

8.2 Uniones mecánicas

El diseño de las uniones mecánicas en materiales compuestos está basado en las soluciones empleadas para el acero. Sin embargo, este se caracteriza por ser homogéneo e isótropo mientras que los materiales compuestos son heterogéneos y anisótropos. Por lo tanto, cualquier discontinuidad en las fibras del composite, por ejemplo, agujeros para pernos en elementos pultruidos, reducirá la capacidad de carga del elemento. La gran ventaja de las uniones mecánicas sobre las adhesivas es la existencia de reglas de diseño que permiten diseñarlas con facilidad. Sin embargo, como no hay una normativa global de estas uniones, cada gran fabricante de compuestos dispone de un código propio.

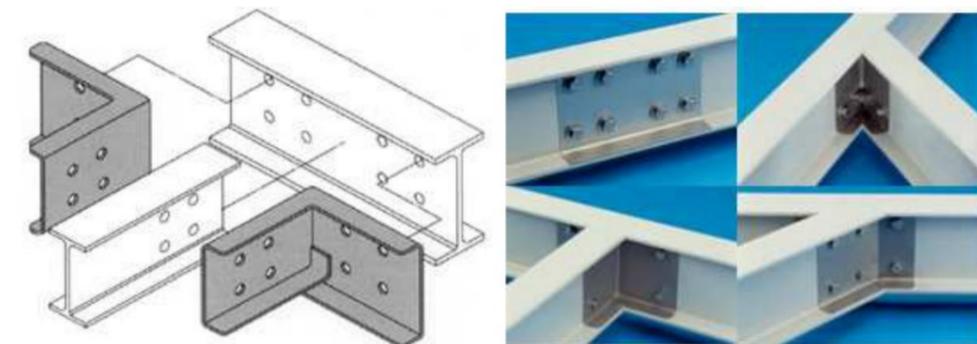


Figura 37 Uniones mecánicas para perfiles de Fiberline Composites [8]

El fallo en las uniones mecánicas depende de la ubicación del agujero en relación a los extremos y la dirección de las fibras de refuerzo. Algunos de estos fallos se pueden ver en la siguiente figura.



Figura 38 Fallos típicos de las uniones mecánicas resultado de, de izquierda a derecha, cortante, tracción, compresión y splitting [8]

Un aspecto muy importante es que las uniones mecánicas permiten la unión con elementos de materiales distintos como el acero u hormigón. El diseño en estas ocasiones está enfocado a tableros de composite unidos a vigas de hormigón o acero.

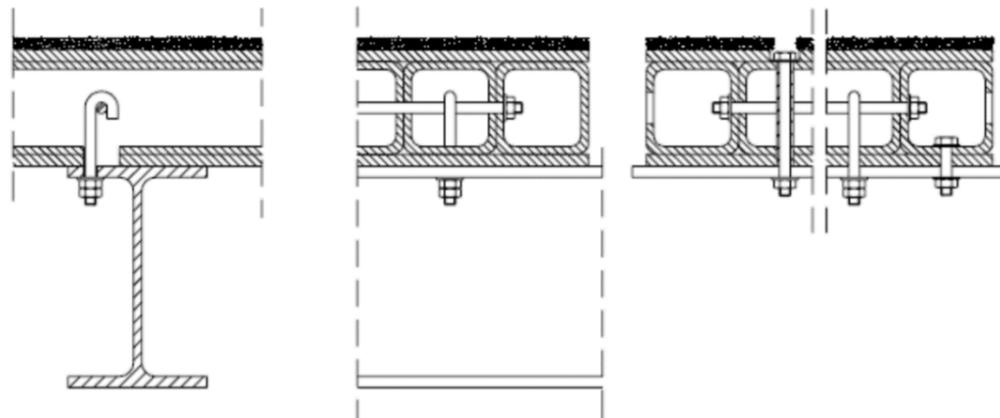


Figura 39 Ejemplo de conexiones entre un tablero de materiales compuestos y vigas de acero [8]

8.3 Comparación entre uniones adhesivas y mecánicas

La comparación entre las uniones adhesivas y mecánicas puede verse en las siguientes tablas [11]:

Uniones mecánicas

Ventajas	Desventajas
No requiere de una preparación especial de la superficie	Concentraciones de tensiones y baja resistencia
Se puede desmontar	Prácticas especiales requeridas durante el ensamblaje
Fácil inspección	Proceso de ensamblaje lento
	Para lograr la estanqueidad, se requieren de juntas especiales o selladores
	Riesgo de corrosión de las partes metálicas

Uniones adhesivas

Ventajas	Desventajas
Alta resistencia de la unión	No son desmontables
Uniones baratas, ligeras y rápidas de realizar	Requiere de una preparación especial de la superficie
Alta estanqueidad	Difícil de inspeccionar
Menos riesgo de problemas de corrosión	Temperatura y humedad puede afectar a la resistencia de la unión
Acabado estético	Falta de criterios de diseño

Tabla 7 Características típicas de los distintos tipos de uniones entre piezas de materiales compuestos

8.4 Uniones combinadas

Se tratan de uniones interesantes desde el punto de vista estructural, ya que los tornillos y pernos pueden prevenir la propagación de grietas que llevan al fallo a la unión adhesiva. Sin embargo, es frecuente que las uniones mecánicas funcionen como un seguro de las uniones adhesivas en caso de que estas fallen.

En las siguientes figuras, se presenta un ejemplo de unión adhesiva en combinación con tornillos del manual "Fiberline Design Manual".

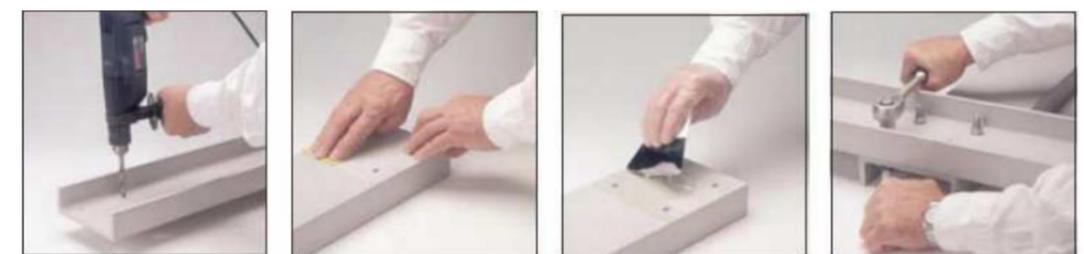


Tabla 8 Aplicación de uniones adhesivas y mecánicas por Fiberline [8]

Bloque B: DISEÑO Y VALORACIÓN DE LA PASARELA

9 ANTECEDENTES Y SITUACIÓN ACTUAL

9.1 Antecedentes

A finales del S.XIX, la ciudad de Alcoy disponía de una prospera industria, basada en la energía hidráulica de los ríos Barxell, Molinar y Riquer, que necesitaba adaptarse a la nueva energía del carbón, proveniente de Reino Unido. No obstante, por aquel entonces, esta no disponía de unos medios de transportes adecuados dado su compleja orografía [19].

Con este fin, se estudiaron distintas soluciones para el paso del carbón como el uso del puerto de Denia como puerto de entrada del carbón y posteriormente transportarlo en ferrocarril por la Vall de Gallinera. Esta solución se descartó por la baja profundidad del puerto. Barajando otras opciones, se llegó a la conclusión de que lo más rentable sería la entrada del carbón importado por el puerto de Gandía y desde ahí mediante ferrocarril hasta Alcoy.

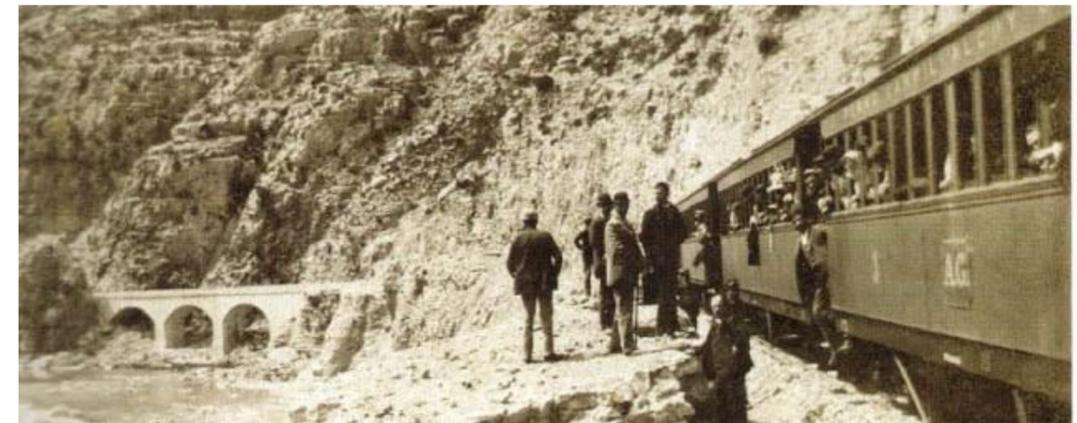


Figura 40 Ferrocarril entre Gandía y Alcoy [19]

En 1887 se autorizó mediante una Real Orden la construcción de las obras ferroviarias debiéndose realizar en un plazo de cinco años. El presupuesto de las obras se cifró en casi 6 millones de pesetas. Para realizar la explotación de la vía ferroviaria y del puerto de Gandía, se fundó la compañía "Railway Alcoy and Gandía Arbour Company LTD." en 1889. Las obras concluyeron en 1892 por los contratistas, la compañía inglesa "Lucien, Rável y Cia.", y, a partir del 17 de enero de 1893, se comenzó su explotación.

El trayecto entre ambas ciudades contaba con 12 estaciones repartidas a lo largo de 53,355 km de longitud con un desnivel de 530. Además, el trayecto atravesaba 7 túneles y también discurría sobre 12 puentes, de ellos 6 metálicos.

En 1942, la línea fue absorbida por Renfe y explotada por FEVE. 27 años más tarde, en 1969, se clausuran las vías a pesar de haber presentado un plan de modernización, que fue rechazado, en 1965.

Todos los puentes metálicos de los viaductos, ante su alto coste de mantenimiento y la negativa de las autoridades a hacerse cargo de conservación, fueron desmantelados dejando únicamente los estribos.

9.2 Situación actual

Para evitar la desaparición de la red de ferrocarril entre Alcoy y Gandía se reacondicionó el trazado como Vía Verde. A esta Vía se le conoce como la Vía Verde del Serpis, por seguir el curso del río Serpis, de este nombre, en su camino al mar.

El Programa de Vías Verdes fue desarrollado, a escala nacional, en 1993 para proporcionar nuevos usos a antiguos trazados ferroviarios que estaban abandonados [20]. Por aquel entonces, existían en España más de 7600 kilómetros de líneas ferroviarias que no tenían servicio de trenes o bien simplemente que su construcción no llegó a finalizar. Para rescatar todo este patrimonio de su desaparición, se planteó reacondicionar estos antiguos trazados como nuevas vías de ecoturismo para ciclo turistas, caminantes y personas de movilidad reducida, que permiten promocionar una nueva cultura del ocio y del deporte al aire libre. Actualmente más de 2400 km han sido ya recuperados como Vías Verdes.



Figura 41 Mapa de Vías Verdes de España [20]

En relación a la Vía Verde del Serpis, todavía existen ciertos tramos del trazado ferroviario que no se han reconvertido a Vía Verde. Es el caso del tramo de estudio, encontrándose entre las estaciones de Gayanes (kilómetro 34) y Beniarrés (kilómetro 37), donde se plantea la ejecución de una pasarela en el viaducto nº3 para rehabilitarlo.

10 LOCALIZACIÓN

La pasarela proyectada tiene como objetivo permitir el paso entre los municipios de Beniarrés y Gayanes.

Ambos municipios están situados en la comarca del Condado de Cocentaina, en el norte de la provincia de Alicante. Se encuentran en el valle de Perpuchente, por el que cruza el río Serpis, y limitan, por un lado, con los términos municipales de Alcocer de Planes, Muro de Alcoy, Beniarrés, Planes y Beniatjar (Gayanes), y, por otro lado, con Lorcha, Gayanes, Planes, Salem y Beniatjar (Beniarrés).

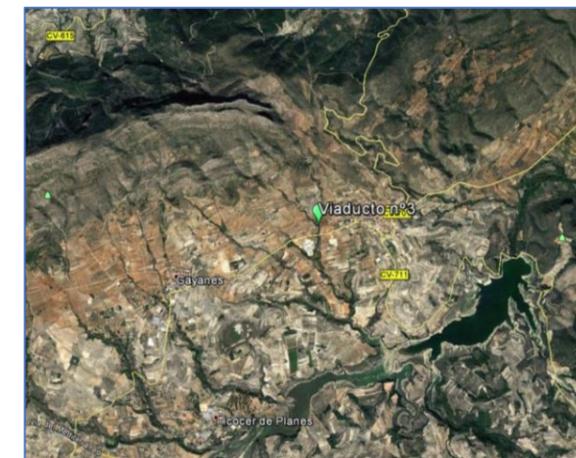


Figura 42 Ubicación de la pasarela proyectada

El acceso más sencillo a la localización del proyecto se realiza a través de la CV-705 que conecta directamente con la A-7 en la salida de Muro de Alcoy.

La estructura proyectada unirá ambos márgenes del llamado “Barranc del Bassa Ciment” permitiendo el paso entre Beniarrés y Gayanes y continuando el camino hasta Alcoy.

Los estribos tienen las siguientes coordenadas. El estribo situado al este se sitúa en las coordenadas 38º 49' 7,76" N; 0º 23' 13,56", mientras que el situado al oeste 38º 49' 7,69"; 0º 23' 13,27"



Figura 43 Situación de la pasarela proyectada

11 ESTUDIOS PREVIOS

11.1 Estudio topográfico

Para definir completamente la zona de actuación, se ha empleado un estudio topográfico existente de los dos estribos realizado por Don Juan Camilo Restrepo Aguilar.

La topografía de ambos estribos se puede observar en la siguiente imagen, si bien se aprecia mejor en el Documento N°2: PLANOS.

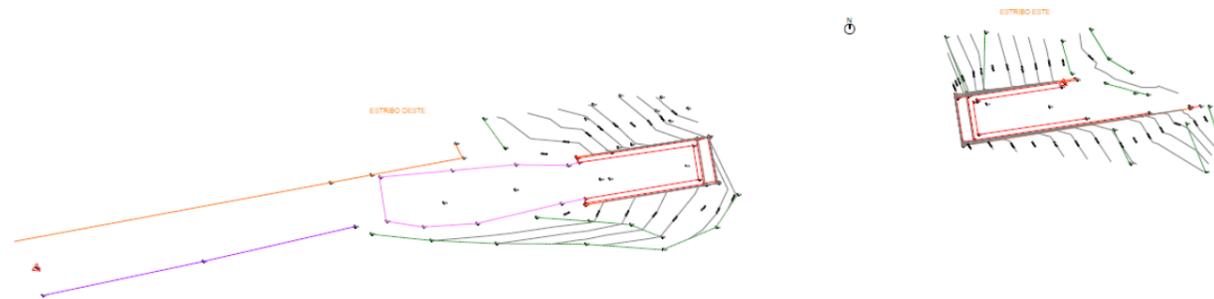


Figura 44 Topografía de los estribos

Del estudio topográfico, se puede concluir lo siguiente:

- La distancia total entre los estribos es de 21,24 metros
- El ancho de cada estribo es de 3,7 metros
- La cota de coronación de ambos se encuentra a 380,65 metros
- El antiguo apoyo del puente ferroviario se encuentra 2,4 metros por debajo de la cota de coronación y sobresale un total de 0,80 metros.
- La coronación del estribo se sitúa a más de 10 metros por encima del barranco.

11.2 Estudio geotécnico-geológico

Ha sido necesario determinar si los estribos eran aptos para su reutilización por lo que se ha realizado un estudio geotécnico para determinar las características del terreno.

El estudio realizado en el Anejo 2: ESTUDIO GEOTÉCNICO se ha basado en información proveniente de organismos como el IGME (serie MAGNA) al igual que otros informes geológicos ya existentes. Se ha contado también con una visita de campo para determinar visualmente el estado de los estribos.

Según los resultados de este estudio, el terreno se puede caracterizar como suelo con abundancia de margas medianamente compactadas, con presencia de materiales sueltos y arcillas sobre margas. El nivel freático se encuentra a una alta profundidad y el terreno presenta capacidades de cargas medias.

De la visita de campo, se destaca el buen estado de ambos estribos permitiendo, junto al terreno, conservarlos y acondicionarlos para el puente nº 3 de la Vía Verde del Serpis.

11.3 Estudio hidráulico

No se contempla la realización de un Estudio Hidrológico e Hidráulico para determinar el resguardo que ha de tener la pasarela proyectada respecto a la cota absoluta de la lámina de agua.

11.4 Estudio de soluciones

Se ha procedido a seleccionar la tipología estructural de puentes de materiales compuestos más adecuada para este caso.

Entre los puentes y/o pasarelas elaboradas con material compuesto se tiende a clasificar de acuerdo a la presencia estructural del composite [12, 21]. Se suele diferenciar entre:

- Reparación y refuerzo de puentes existentes. Se emplean principalmente laminados de fibra de carbono y resina epoxy de dos formas: Laminas prefabricadas que se adhieren a la estructura o tejidos de fibra que, junto con la resina, se aplican *in situ* a la estructura.
- Empleo de material compuesto en elementos estructurales auxiliares como pueden ser redondos para armar hormigón, cables tensores y tendones de pretensado para reducir costes de mantenimiento entre otros motivos.
- Estructuras híbridas, cuando se trata de superestructuras de puentes que combinan materiales compuestos con materiales más tradicionales.
- All-composite, donde todos los elementos estructurales que aparecen son formados por material compuesto.

No es objeto de este trabajo la reparación de un puente existente ni el empleo de material compuesto como elemento estructural auxiliar por lo que se realiza una breve explicación y elección únicamente entre puentes híbridos y puentes all-composite.

11.4.1 Puentes híbridos

Se definen los puentes híbridos como aquellos construidos combinando materiales tradicionales con elementos de materiales compuestos. Si bien, existen una gran variedad tipologías, se pueden diferenciar dos claramente: Tableros de material compuesto y vigas de materiales compuestos.

- Tableros de composite

El ejemplo más común de puentes híbridos es un sistema estructural formado por unas vigas de acero o hormigón que soportan un tablero de material compuesto [22, 23]. Estos tableros de composite son elementos estructurales reticulares formado por celdillas y se forman mediante ensamblaje. Son tableros muy ligeros (alrededor de un 20% del peso de un tablero de hormigón) y tienen una alta resistencia a la fatiga y a la corrosión.



Figura 46 Construcción del puente de Friedberg, Alemania formado por un tablero de materiales compuestos sobre vigas de acero [23]

- Vigas de materiales compuestos

Se emplea vigas con un sistema mixto donde el hormigón se encuentra en la parte a compresión de la viga mientras que la parte del compuesto se ubica por debajo del eje neutro [11]. En función de las dimensiones y de la carga a soportar, estas vigas son:

- Abiertas
- Cerradas
- En forma de U

Este sistema, vigas de material compuesto y losa de compresión de hormigón, se empleó para el puente sobre la autovía del Cantábrico, primer puente en España de esta tipología, construido en 2004. La instalación de las vigas y el hormigonado de la cubierta se llevó a cabo en menos de dos días.



Figura 45 Puente sobre la autovía del Cantábrico. Izquierda, esquema estructural; derecha, puente [11]

11.4.2 Puentes all-composite

Estos son los puentes cuyas superestructuras están compuestas enteramente por material compuesto. La subestructura, estribos y pilares principalmente, normalmente están constituidos por materiales tradicionales. El primer puente de esta categoría es el puente Miyun, construido en China en 1982. Un ejemplo destacable es el puente en Aberfeldy, Escocia, en 1992 que es el puente de FRP más largo del mundo con 113 metros de longitud.

Existen multitud de tipologías de estos puentes encontrándose sistemas estructurales idénticos respecto a materiales convencionales, como pueden ser, entre otros:

- Reticulados empleando perfiles de material compuesto. Esta pasarela fue la primera de estas características construida en España en 2001, sobre la línea del AVE cerca de Lérida. Consiste en un arco biapoyado de 38 metros de luz y 3 metros de ancho.



Figura 47 Pasarela de Lleida, España [11]

- En arco, como el puente de Ooypoort, Holanda. Esta pasarela tiene una longitud de 56 metros, encontrándose entre los puentes de un solo vano de materiales compuestos más largos del mundo. Permite el paso de casas flotantes por debajo del mismo y está diseñado para no sufrir daños en su estructura, en caso de estar parcialmente sumergido por agua.



Figura 48 Pasarela de Ooypoort, Holanda [32]

- Atirantados, como el puente de Aberfeldy, Escocia, que fue la primera pasarela all-composite en Europa construida en 1992. Todos sus componentes (pilas, cables, vigas, tablero) son de material compuesto. Gran parte de las uniones son adhesivas, relegando a las uniones mecánicas a las conexiones entre los cables y las vigas transversales.

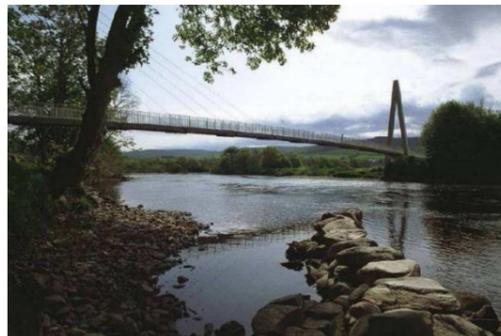


Figura 49 Puente de Aberfeldy, Escocia [8]

Estos sistemas presentan las mismas ventajas e inconvenientes que con otros materiales y se tendrán en cuenta individualmente a la hora de elegir tipología estructural.

11.4.3 Solución adoptada

La idea original de este estudio es la de diseñar una pasarela compuesta enteramente de materiales compuestos o, en caso de ser necesario, con el menor uso de materiales tradicionales en la misma. La razón de dicho planteamiento es el de emplear lo máximo posible este material tan desconocido actualmente en ingeniería civil y dar a conocer sus ventajas respecto al resto.

Con este planteamiento inicial, no se han considerado los puentes híbridos como opción a elegir tipología estructural. Partiendo ya de los puentes all composite, se han tenido en cuenta el resto de condicionantes:

- El ancho de la pasarela, definido por los estribos, debe ser de 3,7 metros
- La longitud entre ambos estribos, de acuerdo al estudio topográfico, es de 21,24 metros.
- La baja carga que deberá soportar la pasarela, es decir, peatonal con paso ocasional de vehículos de emergencia
- El impacto visual de la pasarela y su integración con el paisaje

Cabe decir que quedan descartadas aquellas soluciones que involucren la división de la pasarela en dos vanos, buscándose alternativas de un único vano.

Teniendo en cuenta todos estos condicionantes, se ha escogido un sistema all-composite en arco.

12 DESCRIPCIÓN DE SOLUCIÓN ADOPTADA

Se describe a continuación los aspectos de la pasarela necesarios para la total definición de la misma.

12.1 Geometría general

La solución adoptada consiste en una viga en arco biapoyada con un canto de 0,6 metros y con una longitud horizontal de 21,24 metros. El alzado simétrico de la pasarela se ajusta a la de una parábola de segundo grado, apreciándose la variación de la cota en el Documento nº2: PLANOS.

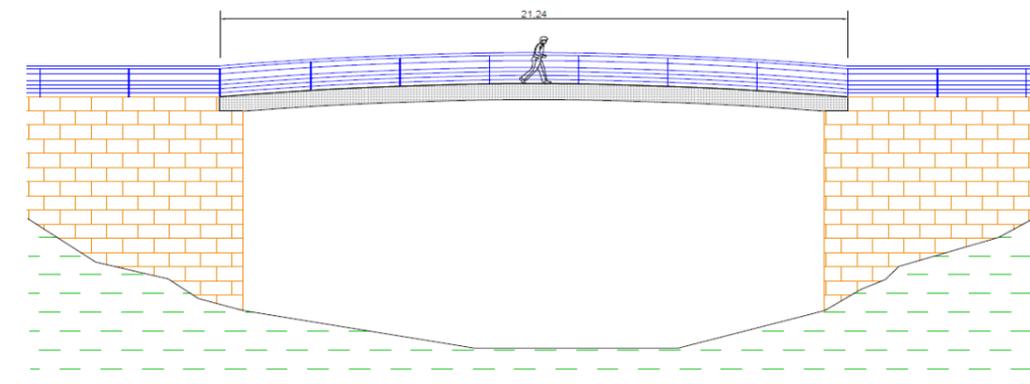


Figura 50 Alzado de la solución adoptada

La anchura de los estribos condiciona a la anchura de la propia pasarela resultando en un ancho total de 3,7 metros, de los cuales 2,8 metros son útiles.

12.2 Sección transversal

La sección transversal se puede definir como una viga en forma de cajón simétrico, haciendo la comparación con vigas de hormigón.

Dicha sección posee una anchura en su parte superior de 3,7 metros, coincidiendo con la anchura de los estribos. En la parte inferior, esta se reduce a 2,6 metros.

Se pueden diferenciar distintos elementos estructurales que forman la sección, como son:

- Alas superior e inferior
- Almas interiores y exteriores

En total, se disponen de dos almas exteriores situadas a los lados de la sección, y dos almas interiores centradas y separadas entre sí 1,4 metros. La sección transversal planteada se muestra en la siguiente figura.

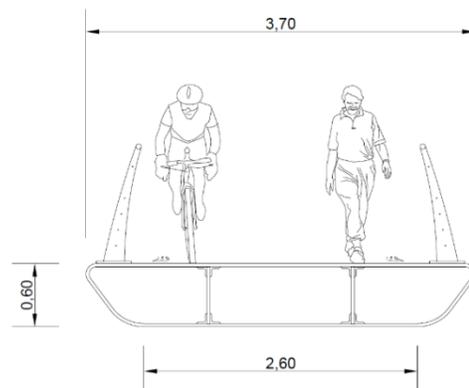


Figura 51 Sección de la pasarela proyectada

Con el fin de rigidizar la estructura, se han incluido unos rigidizadores ubicados en los extremos de la pasarela y cada 3 metros que servirán de relleno de la sección transversal. De esta manera, la forma que adoptarán estos rigidizadores será la de la sección transversal de la estructura. Transversalmente, se ha optado por una sección rectangular.

El espesor de cada elemento empleado será de 3 cm, si bien se empleará un laminado distinto para cada caso.

12.3 Materiales empleados

En este apartado se exponen cuáles son los materiales que conformarán la pasarela, así como los criterios que se han seguido para justificar su elección. Las características mecánicas de los mismos se pueden encontrar en el Anejo nº3: CÁLCULO ESTRUCTURAL.

12.3.1 Refuerzo

Se ha decidido el empleo de *fibra de vidrio E*, al tratarse de la fibra más económica y que aporta suficientes características mecánicas para la pasarela. Además, se puede emplear con cualquier tipo de resina y no tiene ninguna restricción con ningún procedimiento de producción [16].

12.3.2 Matriz

Como material de la matriz, se empleará la *resina epoxy* para buscar un material con excelentes propiedades mecánicas que compenetre a la fibra.

A pesar de ser tener un mayor coste en comparación con otras resinas, presenta el mejor comportamiento al fuego y a las altas temperaturas de todas ellas. Esto ha sido un factor muy determinante debido a la localización de la pasarela (Beniarrés). Además, su comportamiento frente a la humedad y a la radiación solar es muy notable [6].

Es importante comentar que, debido al tamaño de las piezas que conforman la pasarela, es necesario de procedimientos de construcción que cuenten con bolsas de vacío y mantas térmicas. Debido a que las propiedades de la resina epoxy dependen según sea la temperatura de curado, al emplear estos procedimientos de alto rendimiento, se conseguirán resinas epoxy de muy alta calidad y propiedades mecánicas, como es el caso.

12.3.3 Núcleo

Como material de núcleo se ha optado por una espuma de *PVC H10*, que posee una capacidad estructural aceptable al igual que un reducido coste y densidad. El empleo de paneles de abeja se ha descartado ya que, para este proyecto, sus propiedades no justifican su elevado precio.

12.3.4 Material compuesto

El cálculo de las propiedades mecánicas del material compuesto resultante se muestra en el Anejo nº3: CÁLCULO ESTRUCTURAL.

Para dicho cálculo, se ha optado por el método propuesto por la normativa de compuestos empleada y se han escogido volúmenes de fibra altos (60%).

12.3.5 Procedimientos de producción

Se pasará a seleccionar el procedimiento de producción del material compuesto más adecuado. La elección del procedimiento de producción es muy importante ya que, no solo condiciona el coste y la duración de la fabricación, sino que las mismas propiedades del material compuesto dependen del método de producción.

Se exponen primero las características que se deben cumplir:

- Se requiere de un proceso que permita la producción de compuestos de alto volumen de fibra (60%) con altas características mecánicas.
- Se busca un procedimiento capaz de producir piezas de grandes dimensiones y con libertad de formas.
- Se debe considerar el aspecto económico buscando procedimientos que sean competitivos.

Según estos condicionantes, se llega a la conclusión que el procedimiento más adecuado es el VARTM, es decir, el moldeo por transferencia de resina, en este caso, ayudado por bolsa de vacío [24]. Con este procedimiento, se consiguen temperaturas de curado relativamente altas; aspecto que venía impuesto de la selección de la resina epoxy. Además, se trata de un procedimiento de producción muy común en la construcción de puentes [11].

Proceso de producción	Nº de puentes
Pultrusión	56
VARTM	37
Laminado manual	18
Otro	10
Total	121

Tabla 9 Número de puentes construidos de materiales compuestos en función de su proceso de producción actualizado al año 2009 [11]

12.3.6 Diseño del laminado

Una de las grandes ventajas de los materiales compuestos es que permite aprovechar al máximo el material orientándolo en la dirección de mayor carga y así soportar mayores esfuerzos.

Esto se traduce en el diseño de un laminado “a medida” para cada zona de la sección. A pesar de que no existe ninguna normativa en relación al laminado de los materiales compuestos, se pueden extraer de muchas fuentes [6, 25], algunos principios a tener en cuenta en el diseño.

Los principios considerados para el diseño del laminado serán los siguientes:

- Un laminado simétrico es indispensable para evitar el acoplamiento entre los efectos de flexión y membrana de las placas. Esto hace que se impida la aparición de problemas derivados del proceso de curado.
- Excepto cuando se usen tejidos, el ángulo entre láminas consecutivas no debe exceder (a ser posible) los 60º.
- En caso de ser posible, evitar agrupar láminas con orientaciones de 0º y 90º separándolas mediante láminas a +45/- 45º. Se minimizan los efectos de acoplamiento.
- Minimizar el agrupamiento de láminas con la misma orientación. Con esto, se evita, en caso de que ocurra una grieta, que esta se corra y expanda rápidamente. Por norma general se recomienda evitar 0,5 – 0,6 mm iguales.
- Colocación en las capas externas de láminas de +45/-45 para evitar pequeñas roturas.
- Para mejorar el comportamiento a cortante, se colocan láminas en direcciones de +45/-45.
- Se debe asegurar que al menos un 10% de las fibras deben aparecer orientadas en las direcciones 0º, 45º, 90º y -45º. Esto supone un resguardo para las fibras en caso de soportar cargas secundarias no contempladas en el proyecto. Para este proyecto, se tomará un porcentaje más conservador, como viene siendo habitual en aplicaciones civiles, en torno al 30 y 40%.

Se plantea un laminado distinto para cada parte de la sección (almas, alas y rigidizadores) teniendo en cuenta las distintas funciones estructurales de cada parte. Así pues, se han supuesto las siguientes funciones estructurales para cada parte:

- Las alas, que absorben fundamentalmente los esfuerzos longitudinales de flexión.
- Las almas, que absorben los esfuerzos cortantes.
- Los rigidizadores, que se encargan de aportar rigidez a la estructura.

Los laminados de cada una de las partes se discuten a continuación. Las características de cada uno de ellos se pueden ver en el Anejo nº3: CÁLCULO ESTRUCTURAL.

- Laminado de las alas

En las alas se encuentran principalmente esfuerzos de flexión longitudinal y transversal. Para conformar los 3 cm de espesor de las alas, se han dispuesto 120 láminas de 0,25 mm siguiendo el siguiente criterio de laminado:

- 60 % en la dirección longitudinal de la viga (0°).
- 20 % orientadas a 90° .
- 10 % orientadas a 45° .
- 10% orientadas a -45° .

Se ha considerado que la flexión longitudinal es más importante que la transversal.

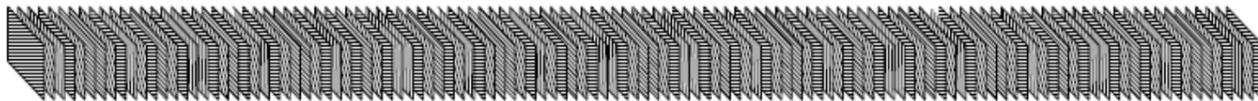


Figura 52 Disposición de las láminas en las alas

- Laminado de las almas

Las almas se encargan de soportar esfuerzos de cortante principalmente. El laminado de las 120 láminas se dispone de la siguiente manera:

- 35 % orientadas a 45° .
- 35% orientadas a -45° .
- 15% orientadas a 0° .
- 15 % orientadas a 90° .

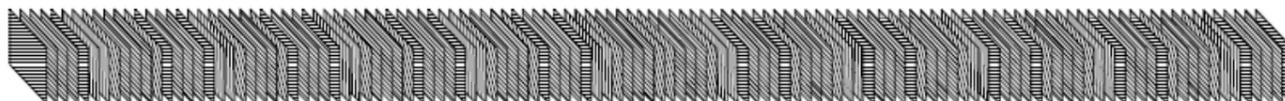


Figura 53 Disposición de las láminas en las almas

La mayor disposición a $\pm 45^\circ$ se debe a la orientación de las tensiones principales al estar sometido para el caso de tensión tangencial pura.

- Laminado de rigidizadores

Las funciones de los rigidizadores se pueden resumir en:

- Aumentar la rigidez de la estructura.
- Favorecer una deformación conjunta de las láminas que forman la sección transversal

Por ello, se ha optado por una estructura tipo sándwich compuesto por 25 mm de núcleo y 2,5 mm de material compuesto en cada extremo.

El laminado de cada extremo se dispone en un 70 % en las direcciones $\pm 45^\circ$ y el restante 30 % repartido de igual manera entre 0° y 90° .

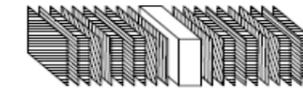


Figura 54 Disposición de las láminas en los rigidizadores

12.4 Uniones

Para el diseño de las uniones entre las almas interiores, rigidizadores y alas se han empleado uniones adhesivas, concretamente las uniones en articulaciones en T.

Este tipo de uniones se forman por el laminado de tejidos de refuerzo a cada lado de la articulación para formar una doble conexión de ángulo. Se consigue que la transmisión de la carga se realice principalmente a través de estas láminas de refuerzo [6]. Un esquema tipo de estas uniones puede verse en la siguiente figura.

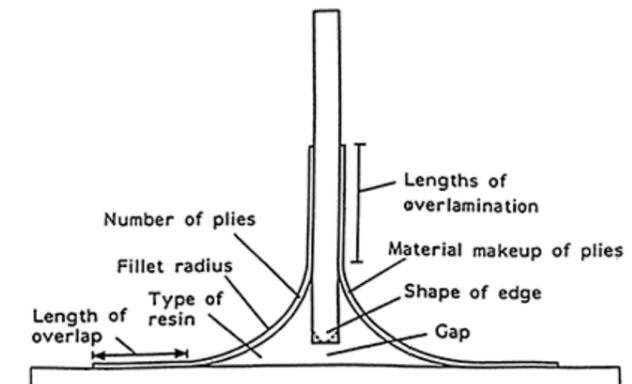


Figura 55 Variables de diseño en las uniones adhesivas en T [6]

Tiene la ventaja que el material empleado en el “solapamiento” de las láminas es el mismo que se usa en la estructura al igual que conseguir una distribución más uniforme de tensiones.

De acuerdo a la normativa de compuestos empleada, estas uniones deben cumplir las siguientes variables de diseño como pueden ser:

- El radio de curvatura (r) debe ser superior a 5 mm para espesores de piezas (t) menores a 5 mm, y superior a 10 mm para $t \geq 5 \text{ mm}$.
- La longitud de solapamiento, a cada lado, debe tomarse ser como mínimo 100 mm.
- El espesor del laminado de refuerzo debe ser mínimo $0,5 \cdot t$ a cada lado.

Con estas condiciones, se ha diseñado la siguiente unión como puede verse en la imagen. Se dispone de un laminado parecido al del alma, con un 70 % de las láminas a $\pm 45^\circ$ y el 30% restante distribuido a partes iguales entre 0° y 90° .

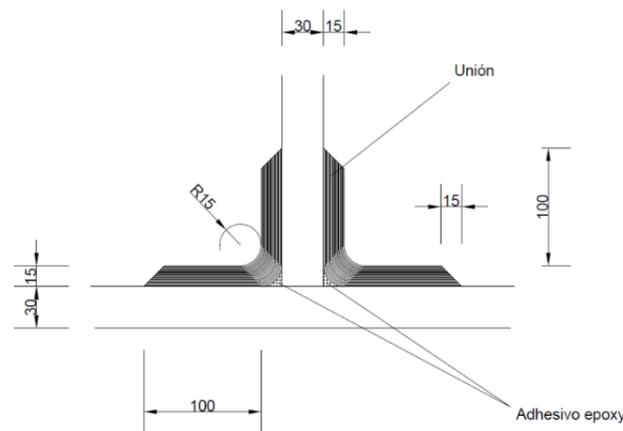


Figura 56 Unión adhesiva en T diseñada. Cotas en milímetros

12.5 Estribos

De acuerdo al estudio geotécnico, no se requiere de ningún refuerzo en ambos estribos al encontrarse ambos en perfecto estado. No obstante, dado que el apoyo de la pasarela es distinto al que estaban diseñados inicialmente los estribos, se ha optado por la siguiente solución:

- La pasarela apoyará en el estribo un total de 80 cm en cada extremo, encontrándose en sus extremos con un canto de 0,53 metros.
- Se dispondrán de láminas de neopreno en todos los apoyos de la pasarela.

- Las zonas de los estribos, que antiguamente constituían en apoyo de los puentes metálicos, se elevan hasta quedar a 0,53 metros de la altura de coronación del estribo coincidiendo con el canto de la pasarela. La elevación se lleva a cabo a partir de sillares de piedra caliza de 40-50 cm de espesor con juntas amortiguadas (mortero sin retracción).
- Se colocará una junta de dilatación del tipo JP-100 en cada extremo formada por un perfil elastomérico extruido y un adhesivo estructural con base de epoxy de dos componentes de alta resistencia [25]. Dicha junta se aprecia en el Documento nº2: PLANOS.

La solución se puede ver representada en la siguiente imagen. Es importante decir que, en este estudio, no se ha realizado la comprobación de la elevación proyectada en los estribos.

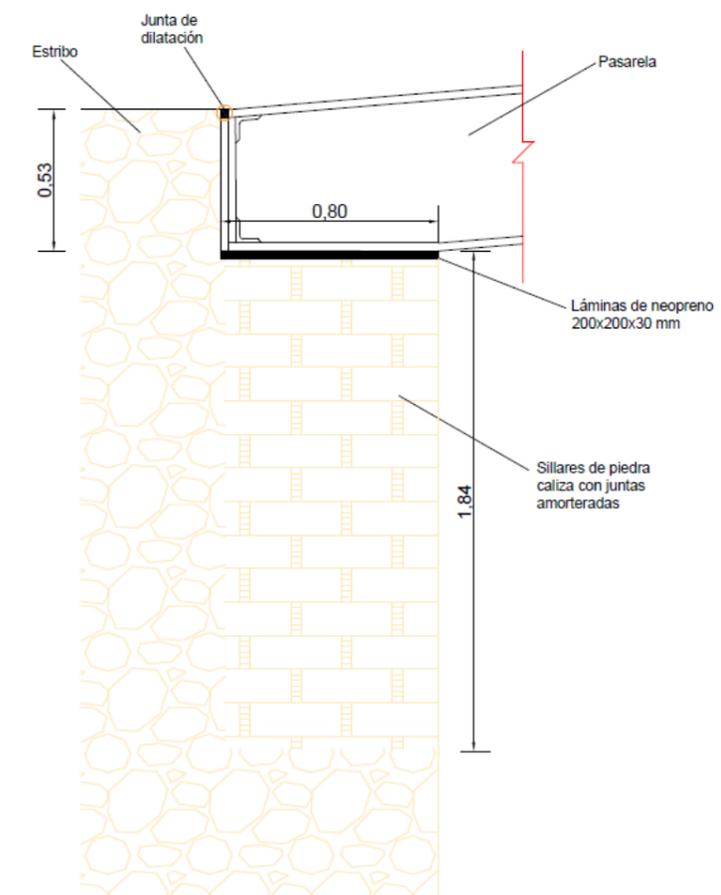


Figura 57 Estribo, apoyos y junta de dilatación

12.6 Equipamientos

12.6.1 Barandilla

Se empleará una barandilla de 1,1 metros de altura formada por pasamanos de 50 mm de diámetro, largueros situados a alturas variables y montantes ubicados cada 3,00 metros.

Se dispone de la misma barandilla tanto para la estructura como para ambos estribos.

En el Anejo nº4: EQUIPAMIENTOS se explica más detalladamente el diseño de la barandilla

12.6.2 Pavimento

Se dispone de un sistema de pavimento formado por pintura de clorocaucho y un agregado de áridos de cuarzo de diámetro 0,2 mm. La aplicación del mismo se realizará en dos capas: En la primera se extenderán los áridos y una capa de clorocaucho, y en la segunda únicamente se aplicará otra capa de pintura de clorocaucho.

Previamente a la aplicación de la primera capa, se dispone de un riego de imprimación formado por pintura de clorocaucho con disolvente clorocaucho.

El espesor total del pavimento es de 0,2 mm. Con ello, se consigue una superficie antideslizante e impermeable con buenas resistencias químicas y mecánicas.

El pavimento queda mejor definido en el Anejo nº6: EQUIPAMIENTOS y se encuentra detallado en el Documento nº2: PLANOS.

13 NORMATIVA LEGAL

En este estudio, no se contempla la realización de:

- Estudio de Impacto Ambiental.
- Estudio de Seguridad y Salud.
- Control de Calidad.
- Gestión de Residuos.
- Reposición de servicios afectados.

No obstante, se incluyen partidas destinadas al Estudio de Seguridad y Salud, Control de Calidad y Gestión de Residuos en la valoración económica detallado en el Anejo nº6: VALORACIÓN ECONÓMICA,

14 PROCESO CONSTRUCTIVO

Se establece una división en tres grupos de las actuaciones principales presentes en la obra proyectada, como son:

- Actuaciones previas
- Estructura
- Equipamientos

El primer grupo corresponden a todas aquellas tareas que tienen como objetivo reacondicionar los estribos y sus accesos para la colocación de la pasarela. Se distinguen las siguientes actuaciones:

- Primeramente, se procederá al acondicionamiento de los caminos de acceso a los estribos.
- A continuación, se realizará la limpieza y desbroce de la zona de actuación y, después, de ambos estribos con especial cuidado de no producir daños.
- Se continuará con la excavación y retirada del material sobrante en los accesos a los estribos, y, más tarde, la extensión de un relleno de zahorra y su compactación en la zona de los accesos.
- Se ejecutará la elevación de ambos estribos mediante sillares de caliza.

Una vez terminados los estribos, se procede a la colocación de la estructura y de sus equipamientos. Se diferencian las siguientes actuaciones:

- Nada más comenzar la obra, se encargará la construcción de la pasarela de acuerdo al diseño establecido. Una vez ejecutadas las uniones diseñadas y aplicado el acabado final de la misma, se transportará hasta su ubicación final mediante un transporte especial.
- Posteriormente, se colocará la estructura en su posición definitiva con cuidado de no producir desperfectos durante su izado. Previamente se han colocado las láminas de neopreno.
- Al mismo tiempo, se ejecutarán las juntas de dilatación.

La última parte corresponde con los trabajos de colocación de las barandillas y del pavimento.



15 PLAN DE OBRA

Se estima un plazo de ejecución de la obra proyectada de 46 días.

Todas las actuaciones previas, que engloban el desbroce, movimiento de tierras y acondicionamiento de estribos, finalizan al cabo de 35 días de empezar las obras. Para la evaluación del tiempo de construcción de la pasarela, se ha partido de información proveniente de fabricantes, y se estima una duración de 37 días. El transporte y colocación de la misma en su posición definitiva, se ha fijado en un día, al igual que la colocación de los apoyos y de las juntas de dilatación. Por último, se consideran 8 días para ejecutar los equipamientos, esto es, barandilla y pavimento.

El plan de obra previsto se detalla en el Anejo nº5: PROGRAMA DE TRABAJOS.

16 VALORACIÓN ECONÓMICA

La estimación de los costes de la obra se realiza en el Anejo nº6: VALORACIÓN ECONÓMICA desglosando las mediciones y precios unitarios de las unidades de obra más relevantes.

De dicha estimación, se establece que la valoración económica de la obra asciende a la cantidad de 135589,89 euros.

En Valencia, día 8 de junio de 2017.

Autor del proyecto:

Fernando Gómez-Trénor Sobrino

17 BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

- [1] Barbero J. E., 2011. *Introduction to composite materials design*. Boca Raton, 2nd ed.
- [2] Gurit. Guide to composites.
- [3] Bisby L.A., 2006. ISIS Educational Module 8: Durability of FRP Composites for Construction. ISIS Canada. Department of Civil Engineering, Queen's University, 2006.
- [4] Matthews F.L. & Rawlings Reed D., 1999. *Composite materials: engineering and science*. Cambridge etc: CRC Press : Woodhead
- [5] Kendall D., 2014. *Fibre reinforced polymer footbridges spanning 300m*. Footbridge 2014 5th International conference footbridges: past, present & future. London, United Kingdom.
- [6] Clarke J.L., 1996. *Structural Design of Polymer Composites-Eurocomp Design Code and Handbook*. Londres: E&FN SPON.
- [7] Chlosta M., 2012. *Feasibility study on fiber reinforced polymer cylindrical truss bridges for heavy traffic*, Master Thesis. Delft University of Technology, Netherlands.
- [8] Potyrala P.B., 2011. *Use of Fibre Reinforced Polymer Composites in Bridge Construction. State of the Art in Hybrid and All-Composite Structures*. Master Thesis, Universitat Politècnica de Catalunya.
- [9] McCrum N.G., Buckley C.P. & Bucknall C.B., 1999. *Engineering design with polymers and composites*. Oxford University Press.
- [10] Kaw A.K., 2005: *Mechanics of Composite Materials, Second Edition*. CRC Press, 2005.
- [11] Friberg E. & Olsson J., 2014. *Application of fiber reinforced polymer materials in road bridges-general requirements and design consideration*. Master's Thesis. Department of Civil and Environmental Engineering. Division of Structural Engineering. Chalmers University of Technology.. Göteborg, Sweden.
- [12] Zhou A. & Lesko J., 2006. *Polymers and Adhesives for the infrastructure*. Virginia Fiber-Reinforced Polymer Composites: Materials, Design, and Construction, Bristol Virginia.
- [13] Van Stormbroek J., 2008. *Development of a FRP-floor with integrated installations*.
- [14] Canales M.M., 2009. *Análisis de viabilidad del uso de materiales compuestos en un puente peatonal tipo viga*. Proyecto Final de Carrera. Departamento de mecánica de medios continuos y teoría de estructuras. Ingeniería Industrial. Universidad Carlos III de Madrid.
- [15] Halpin D.W., Hastak M. & Hong T., 2004. *Constructability, Maintainability, and Operability of Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bridge Deck Panels*. West Lafayette, Indiana: Purdue University
- [16] AIMPLAS (Instituto Tecnológico del Plástico), 2016. *Composites en Edificación y Obra Civil*. Presentación PowerPoint. Universidad Politécnica de Valencia.
- [17] Bank L.C., 2006. *Composites For Construction-Structural Design with FRP*. New Jersey: Wiley
- [18] Muniz J. & Bansal A., 2009. *Assessment of the performance of FRP materials for construction applications*. New Industrialised Construction Process for transport infrastructures based on polymer composite components (Trans-IND)
- [19] Alcoy and Gandia Railway and Harbour Company Limited. Disponible en: www.trenag.com.
- [20] Vías Verdes. Disponible en: www.viasverdes.com.
- [21] Zoghi M., 2013. *The international handbook for FRP composite in civil engineering*. CRC Press Taylor & Francis Group, U.S.
- [22] Mara V., 2011. *A feasibility study on upgrading existing concrete-steel bridges*. Master of Science Thesis. Department of Civil and Environmental Engineering, Division of Structural Engineering, Chalmers University of Technology, Publication no 11:76, Gothenburg, Sweden.
- [23] Mara V., 2014. *Fibre reinforced polymer bridges decks: Sustainability and a novel panel level connection*. Ph.D. Thesis. Department of Civil and Environmental Engineering, Division of Structural Engineering, Chalmers University of Technology, Publication no 14:01, Gothenburg, Sweden.
- [24] Areiza M., Primi S. & Paulotto C., 2011. *Diseño y fabricación de una pasarela de fibra de carbono sobre el río Manzanares*. V Congreso ACHE, Barcelona.
- [25] Kasapoglou C., 2010. *Design and Analysis of Composite Structures*. S.I.: John Wiley and Sons.
- [26] D.S. Brown. Sistemas de juntas de expansion.
- [27] García F., 2015. *Diseño de una pasarela peatonal mediante solución híbrida con materiales compuestos*. Trabajo Final de Grado. Departamento de Mecánica de Medio
- [28] Tohotenax. Disponible en: <http://www.tohotenax.com/products/what-is-carbon-fiber/>.
- [29] Japan Carbon Fiber Manufacturers Association. Disponible en: <http://www.carbonfiber.gr.jp/english/index.html>.
- [30] Hexcel. Disponible en: <http://www.hexcel.com/>.
- [31] BM Composites structural and cosmetic solutions. Disponible en: <http://bmcomposites.com/>
- [32] Nijmegen. Disponible en: <http://www2.nijmegen.nl/wonen/ontwikkeling/Waalkade/Wandelbrug>.