

**MATERIALES COMPUESTOS
DE MATRIZ POLIMÉRICA REFORZADOS CON
FIBRA DE VIDRIO
Y
FIBRA DE CARBONO
PARA APLICACIONES ESTRUCTURALES**

Alumnos

Jorge Faus Ferrer

Marta Marquina Contreras

Director PFG

José Ramón Albiol Ibáñez

Luis V. García Ballester

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DE
EDIFICACIÓN**

PROYECTO FINAL DE GRADO
MODALIDAD CIENTÍFICO TÉCNICO
GRADO EN ARQUITECTURA TÉCNICA



**UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA**



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
**INGENIERÍA DE
EDIFICACIÓN**

*“Siempre que te pregunten si puedes
hacer un trabajo, contesta que sí y ponte
enseguida a aprender cómo se hace”*

Franklin D. Roosevelt (1882-1945)

Parece que fue ayer cuando entramos por primera vez en la escuela, una vez llamada E.T.S.G.E. Lejos quedan muchos recuerdos, experiencias y vivencias inolvidables; lejos, pero muy vivos. Una etapa plagada de cambios y llena de incertidumbre, una etapa que, al escribir estas líneas, vemos como toca a su fin.

Son muchas las personas que hemos conocido a lo largo de estos maravillosos años, tantas como innombrables en una sola hoja, personas que han estado a tu lado en todo momento y que de bien seguro, estarán siempre. A toda esa gente, gracias.

Gracias José Ramón, por inculcarnos el “gusanillo” de los materiales avanzados, apareciendo en clase de Ejecución de Obras con alguna de tus últimas invenciones, cuando juramos y perjuramos que no volveríamos a pisar el laboratorio de materiales. Porque contigo hemos aprendido infinidad de cosas, tanto como profesor, como tutor del PFG. Gracias Albiol.

Agradecer también al profesor Luis Vicente García Ballester, por darnos siempre un punto de vista diferente y una visión más amplia durante este último cuatrimestre. No quisiéramos olvidarnos de los técnicos de laboratorio Jesús Martínez y Rafael Calabuig, por soportar los olores de nuestras resinas, con vuestro apoyo y ayuda en el día a día, ha sido mucho más fácil.

En más de un momento, pensamos en arrojar la toalla, en más de un momento de desánimo, que no son pocos, aparecía alguien querido que nos decía *“no pasa nada, ánimo, a la próxima seguro que sale mejor”*, cuántas veces habremos escuchado esa frase... Gracias Papá y Mamá, por habernos apoyado en todo momento, entendernos y respetarnos en todas nuestras decisiones, por la educación que no habéis dado y habernos dado la oportunidad de llegar a la universidad.

Carla, Elisa e Isabel. Tres nombres que lo representan todo, nuestras hermanas. Solo estando a nuestro lado todo este tiempo, hacíais más de lo que pensáis. Simplemente gracias. Gracias a todos nuestros familiares.

Hace ya dos años, emprendimos un viaje que cambió nuestras vidas, un viaje que marcó un punto de inflexión en nuestra andadura universitaria, New York, gran ciudad donde conocimos mejores personas. Joan, Natalia, Ferrús, Begoña y Mercé. Gracias New Yorkers, habéis conseguido hacer de estos años los mejores de nuestra vida.

Y qué decir de esas personas que nos han visto llegar a casa algún que otro día con cara de pocos amigos, Rafa, Alejandra, Laura, Sabina, Miguel, Adri, Paloma, Edu. Gracias por soportarnos cuando las cosas no salían como esperábamos y por hacer de un problema una solución.

Y para terminar, gracias a ti, Marta; y gracias a ti, Jorge, porque en más de un momento nos habríamos matado el uno al otro pero, de haber sido así, los dos sabemos que nada de esto habría sido posible.

No sabemos si seremos Ingenieros o Graduados, lo que sí sabemos es que siempre seremos “Arquitécnicos”. GRACIAS!



INDICE



1. OBJETIVOS.....	pag.7
2. ESTADO DEL ARTE.....	pag.9
2.1. Materiales compuestos.	
2.2. Componentes de los materiales compuestos	
2.3. Componentes de los materiales compuestos poliméricos	
2.3.1. Fibras	
2.3.1.1. Fibra de carbono	
2.3.1.2. Fibra de vidrio	
2.3.1.3. Fibra de aramida	
2.3.1.4. Fibra de boro	
2.3.1.5. Fibra de carburo de silicio	
2.3.1.6. Fibra de cuarzo	
2.3.2. Matrices	
2.3.2.1. Resina de poliéster	
2.3.2.2. Resina viniléster	
2.3.2.3. Resina fenólica	
2.3.2.4. Resina epoxi	
2.3.2.5. Resinas de bismaleimida, poliimida y ésteres cianato	
2.3.3. Procesos de fabricación	
2.3.3.1. Molde abierto	
2.3.3.2. Molde cerrado	
3. PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	pag.46
3.1. Programa	
3.1.1. Programa experimental inicial	
3.1.2. Programa experimental definitivo	
3.1.2.1. Caracterización del material	
3.1.2.2. Elemento constructivo	

**4. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....pag.64**

4.1. Materiales

4.2. Proceso de fabricación de probetas para ensayos previos

- 4.2.1. Preparación del molde
- 4.2.2. Preparación del refuerzo
- 4.2.3. Preparación de la resina
- 4.2.4. Realización del estratificado
- 4.2.5. Endurecimiento
- 4.2.6. Desmoldeo
- 4.2.7. Desbardado de la pieza
- 4.2.8. Control de calidad
- 4.2.9. Realización del ensayo

4.3. Proceso de fabricación de probetas con matriz de poliéster

- 4.3.1. Preparación del molde
- 4.3.2. Preparación del refuerzo
- 4.3.3. Preparación de la resina
- 4.3.4. Realización del estratificado
- 4.3.5. Endurecimiento y desmoldeo
- 4.3.6. Desbardado de la pieza
- 4.3.7. Control de calidad
- 4.3.8. Realización del ensayo

4.4. Proceso de fabricación de probetas con matriz epoxi

- 4.4.1. Preparación del molde
- 4.4.2. Preparación del refuerzo
- 4.4.3. Preparación de la resina
- 4.4.4. Realización del estratificado
- 4.4.5. Endurecimiento y desmoldeo
- 4.4.6. Desbardado de la pieza
- 4.4.7. Control de calidad
- 4.4.8. Realización del ensayo



4.5	Proceso de fabricación de una viga a partir de perfil pultrusionado	
4.5.1	Preparación del molde y materiales	
4.5.2	Fabricación de módulos	
4.5.3	Unión de módulos	
4.5.4	Conformación base de la viga	
4.5.5	Fabricación de los rigidizadores	
4.5.6	Laminado de la viga	
4.5.7	Capa de compresión hormigón alta resistencia	
4.5.8	Ensayo a flexión	
5.	ENSAYOS Y RESULTADOS	pag.134
6.	CONCLUSIONES	pag.167
7.	FUTURAS LÍNEAS DE ESTUDIO	pag.170
8.	BIBLIOGRAFÍA	pag.172
ANEXO A	(Índice de gráficas, figuras, fotografías y tablas)	pag.174



1. OBJETIVOS



1. OBJETIVOS

Actualmente, el mundo de los materiales compuestos, sigue siendo un universo con infinidad y amplias vías de investigación, que errónea o inconscientemente, se suele relacionar únicamente a industrias tecnológicamente muy avanzadas, como pueden ser la industria militar, la aeronáutica o el mundo de los deportes de alta competición. Quizás por lo mediático de estos campos, relacionados con grandes y costosas investigaciones, la sociedad se mantiene ignorante y con un concepto erróneo ante la cantidad de ventajosas aplicaciones que nos permiten los materiales compuestos.

Hoy en día, debido a las excelentes propiedades mecánicas que poseen, el uso de materiales compuestos con fibras en ingeniería estructural se ha visto incrementado sustancialmente frente a las convencionalmente usadas. Además, tanto su configuración como proceso de fabricación, influyen notablemente en el diseño de un elemento estructural. Sus características y efectivas soluciones, ante posibles imprevistos surgidos en el campo de la construcción e ingeniería civil, justifican el trabajo y el estudio de los materiales compuestos para su posterior aplicación estructural.

En este trabajo, se va a proceder a la fabricación de una serie de muestras analizando las respuestas mecánicas en función de la colocación de las fibras, el tipo de matriz que las conforma y diferentes tipos de curado:

- **Refuerzo de fibras.** Se plantearán distintas soluciones en las que se varían el tipo de fibras, gramaje, orden de colocación, cantidad y dirección angular de las fibras.
- **Matriz.** Realizaremos series de muestras con resina de poliéster ortoftálica y series de resina epoxi, con idéntica composición del refuerzo de fibras.
- **Tipos de curado.** Diferenciaremos entre curado a temperatura ambiente, en horno a 60°C y en horno a 90°C.

Todos los resultados que se obtengan, serán analizados y aplicados coherentemente para la fabricación de una viga a partir de un perfil pultrusionado, como molde, por el método de contacto a mano. Se detallarán todos los materiales a utilizar y sus descripciones técnicas, dosificaciones, preparación y forma de proceder, método de fabricación, realización de ensayos, análisis y estudio de los resultados obtenidos, con el fin de extraer conclusiones que permitan definir posibles aplicaciones en edificación y futuras líneas de estudio.



2. ESTADO DEL ARTE



2. ESTADO DEL ARTE

2.1 MATERIALES COMPUESTOS

Se entiende por material compuesto aquel formado a partir de la unión no química entre dos o más materiales, compuesto por una fase discontinua (refuerzo) y una fase continua (matriz), de las que se dependerán las propiedades mecánicas y la resistencia térmica y ambiental, respectivamente.

En general, estos materiales se fabrican con el fin de mejorar las propiedades que presentan sus componentes por separado, consiguiendo de este modo, unas propiedades finales superiores, tales como rigidez, tenacidad y resistencia a la tracción, tanto a temperatura ambiente como a elevadas.

Habría que tener en cuenta y excluir de esta lista todos aquellos materiales que no hayan sido fabricados expresamente por la mano del hombre, los que tengan continuidad fenomenológica y el hormigón armado, que a pesar de estar constituido expresamente por el hombre y tener discontinuidad fenomenológica, no se considera porque este sistema es un material clásico en la Ingeniería Civil.

2.2 COMPONENTES DE LOS MATERIALES COMPUESTOS

Este tipo de materiales se encuentran constituidos por una fase discontinua, también llamada refuerzo, que aporta resistencia mecánica, rigidez y dureza y va a ser determinante para obtener las principales propiedades mecánicas del material, es decir, son las encargadas de proporcionar las propiedades estructurales al conjunto, y por una fase continua o matriz, responsable de la resistencia térmica y ambiental del material, que engloba al refuerzo y hace del material una estructura monolítica.

Las características de los compuestos, son función de las propiedades de las fases constituyentes, de sus proporciones relativas y de la geometría de las fases dispersas.



Esta “Geometría de la fase dispersa” (ver figura 2.1) significa, en este contexto, la forma, el tamaño, la distribución y la orientación de las partículas.

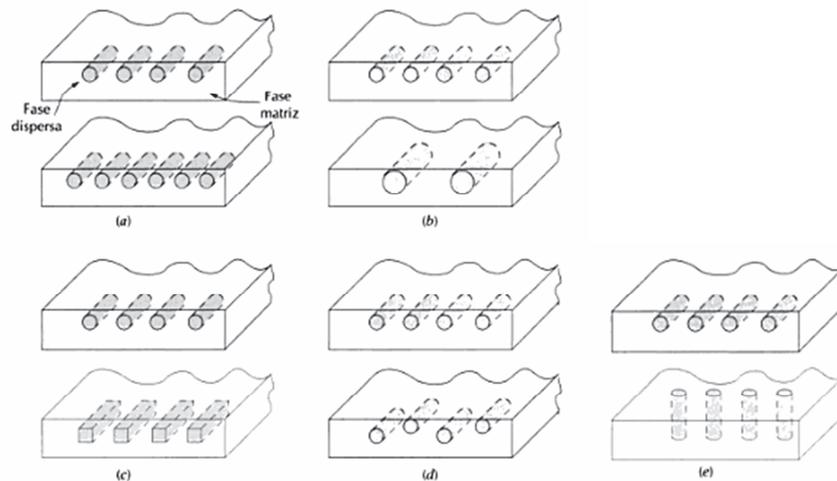


Figura 2.1. Representaciones esquemáticas de varias características geométricas y espaciales de partículas de fase dispersa que repercuten en las propiedades de los materiales compuestos: (a) concentración, (b) tamaño, (c) forma, (d) distribución y (e) orientación.

La clasificación del **refuerzo o fibra** se puede realizar según su origen o según su forma de refuerzo.

Según su origen podemos diferenciar:

FIBRAS DE ORIGEN MINERAL	Fibras Cerámicas (Carburo de Silicio, Aramida)
	Fibras Metálicas
	Fibras de origen inorgánico (Carbono, Vidrio, Boro)
FIBRAS DE ORIGEN ORGÁNICO	Aramida, Polietileno

Tabla 2.1. Clasificación de las fibras en función de su origen

Por otro lado, los materiales compuestos se pueden catalogar según la forma del refuerzo utilizado (ver figura 2.2), entre los que podemos diferenciar los compuestos reforzados con partículas, compuestos reforzados con fibras y compuestos reforzados estructuralmente.

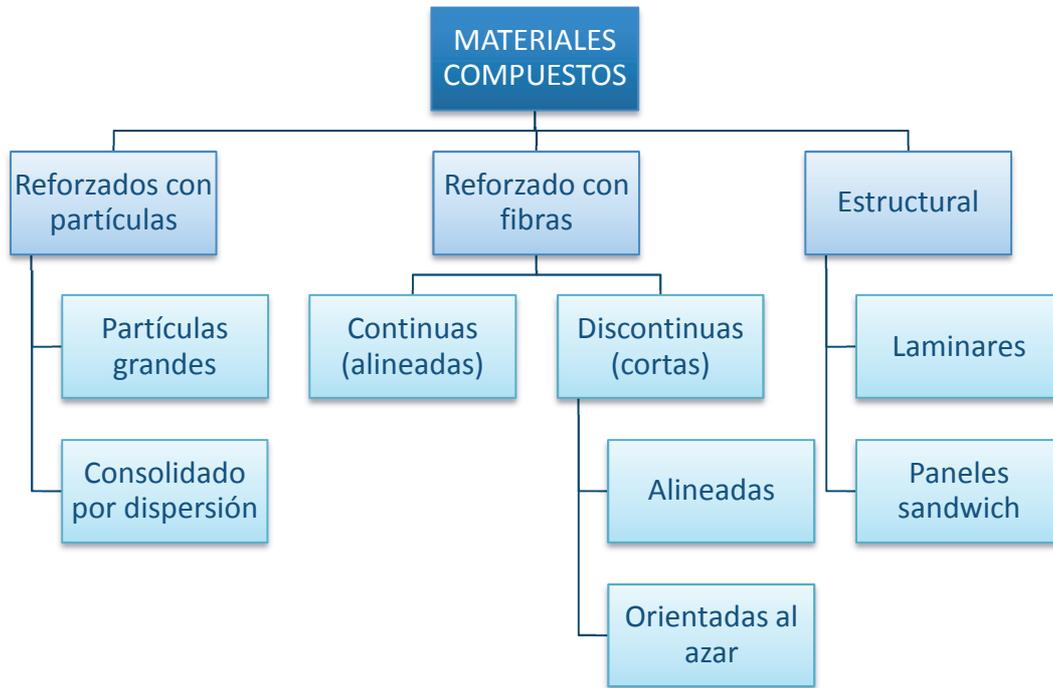


Figura 2.2. Clasificación materiales compuestos según forma de refuerzo

La gran diferencia entre estos materiales será que las partículas de la fase dispersa de los materiales compuestos reforzados con partículas, presentan dimensiones de las partículas aproximadamente iguales en todas las direcciones; la fase dispersa de los materiales compuestos reforzados con fibras tienen la geometría de una fibra, una relación longitud-diámetro muy alta; y los materiales compuestos estructurales son materiales compuestos combinados con materiales homogéneos.



Figura 2.3. Reforzados con partículas

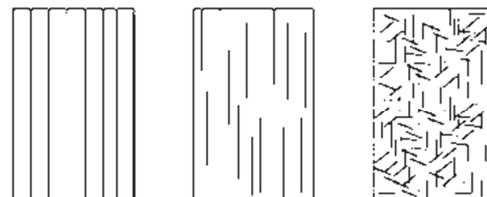


Figura 2.4. Fibras continuas y alineadas/
discontinuas y alineadas/ discontinuas y al azar

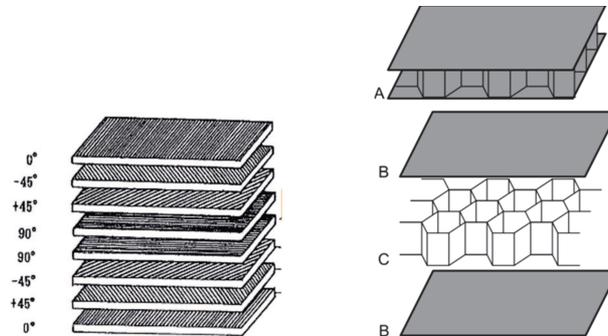


Figura 2.5. Materiales compuestos estructurales. Laminares/panel sandwich

Respecto a los materiales compuestos reforzados con fibras, que son objeto de estudio de este proyecto, se diseñan con la finalidad de conseguir elevada resistencia y rigidez a baja densidad.

Se estudian las relaciones entre la resistencia a la tracción y el peso específico, y entre el módulo de elasticidad y el peso específico, expresándose mediante los parámetros de resistencia específica y módulo específico.

Este tipo de compuestos se subdividirán a su vez según la longitud de la fibra, que influirá no sólo en las características mecánicas del compuesto, sino también en la forma de transmisión de las cargas aplicadas a la fibra por medio de la fase matriz. En este proceso de transmisión de cargas es muy importante la magnitud de la unión en la intercara de la fase matriz y fibra.

La **interfase o intercara**, conseguirá la interacción de la superficie de la fibra y la resina revistiendo los filamentos de la fibra con una fina película (ensimaje), que en general estará constituida por una dispersión acuosa de diversos compuestos químicos. Además de permitir la unión entre fibra-resina, conseguirá dar cohesión entre los filamentos, aumentar o disminuir la rigidez, prevenir la penetración de humedad, etc.



Al igual que la longitud de la fibra, otro factor importante es el diámetro de las fibras. Con menores diámetros, se conseguirá una mejor distribución de las cargas en la interfase, al presentar una mayor área superficial.

También hay que tener en cuenta, desde el punto de vista de propiedades mecánicas, la orientación y disposición de las fibras. Podrán estar orientadas en una única dirección o conformando tejidos con diferentes disposiciones según la orientación de los mazos de fibras. Las propiedades mecánicas aumentarán al utilizar fibras continuas en la dirección del esfuerzo aplicado (unidireccional), sin embargo, al utilizar fibras cortas y partículas, debido a la isotropía en el material, el incremento en resistencia no se apreciará apenas. Por lo tanto, este último tipo de fibras se emplearán en elementos que no requieran grandes solicitaciones de carga ni altas prestaciones estructurales.

Se dividirán, por tanto, en cuatro grupos según la orientación de las fibras: unidireccional (a), tejido (c), multiaxial (d) y aleatorio (b). Las primeras serán las que presenten mejores propiedades si las fibras están alineadas en la dirección del eje longitudinal. Cuando se entrelazan fibras de urdimbre (0°) y tramas (90°) regularmente se forman los tejidos; uno de los tejidos más utilizados es el tafetán, donde cada fibra de la urdimbre pasa alternadamente por debajo y por encima de cada fibra de la trama, conformando un tejido simétrico. El tejido multiaxial consiste en una o más capas de fibras largas que son mantenidas en su lugar por un sistema de tejido secundario sin funciones estructurales.

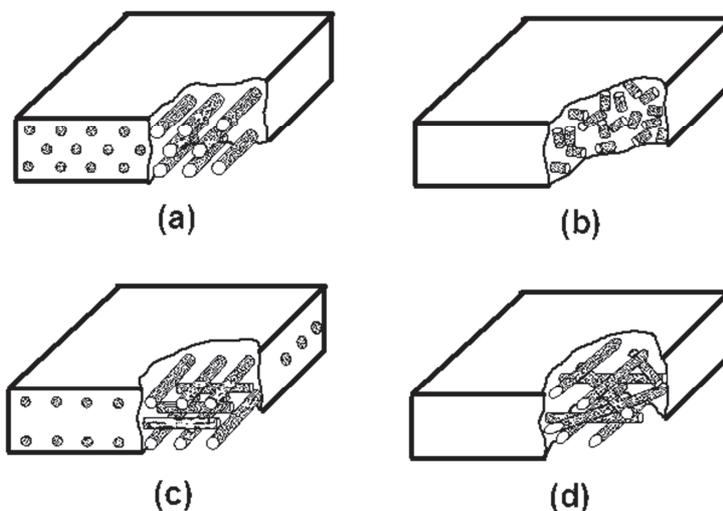


Figura 2.6. Unidireccional (a), Tejido (c), Multiaxial (d), Aleatorio (b)



Así mismo, la fracción en volumen de fibra, también influirá en las propiedades que la fibra pueda contribuir al compuesto. Las fibras mejoran la resistencia de los compuestos, pero si se sobrepasan las cantidades adecuadas (aproximadamente un 60%), pueden producir un efecto contrario, al no conseguir la unión adecuada con la matriz.

FIBRAS	Fibras de origen mineral	Fibras cerámicas (Carburo de silicio, Alúmina)		
		Fibras inorgánicas (Carbono, Vidrio, Boro)		
		Fibras metálicas		
	Fibras de origen orgánico	Aramida, Polietileno		
MATRICES	Matriz metálica			
	Matriz cerámica			
	Matriz polimérica	Inorgánica	Cementos, Geopolímeros, Yeso, Matrices cerámicas, Matrices metálicas	
		Orgánica	Termoplásticas	Polietileno, Poliestireno, Nylon, Polipropileno, Acetato, Policarbonato, Polimetacrilato de Metilo, PET, Polioximetileno
Termoestables	Poliéster, Viniléster, Epoxi, Fenólica, Esteres Cianato, Bismaleimidas, Poliimididas, Polieteramida			
NÚCLEOS	Nidos de Abeja (Aluminio, Nomex, Polipropileno)			
	Espumas (Poliuretano, Poliestireno, PVC)			
	Sandwich Tejido 3D, Madera de Balsa			
ADHESIVOS	Epoxi, Poliuretano, Acrílicos			
RECUBRIMIENTOS	Cerámicos, Fenólicos, Epoxi + Arena, Intumescentes, Mats			

Tabla 2.2. Resumen de materias primas que componen un material compuesto

Por otro lado, tal y como hemos indicado, la **matriz** es el componente aglutinante que permite a las fibras poder trabajar de forma conjunta, transmitiendo los esfuerzos de una a la otra. Además de esto, se encarga de protegerlas de las condiciones medioambientales, de los esfuerzos de compresión y del desgaste de sus superficies. Se podría determinar que la matriz es la que da el carácter al material. El tipo de matriz empleado en el diseño del material, tiene una influencia muy importante en ciertas propiedades mecánicas, como son la resistencia a cortante y a compresión.

La elección del tipo de matriz está condicionada fundamentalmente por la temperatura de servicio, que cambiará significativamente el proceso de producción del material compuesto según el tipo de matriz elegida.



Clasificación según la naturaleza de la matriz:

- **Materiales compuestos de matriz metálica (MMC):** Se caracterizan por una elevada resistencia y módulo unido a una disminución de la tenacidad, elevada resistencia a la temperatura y buena conductividad térmica y eléctrica. Se aplican en la industria aeroespacial, aeronáutica o del automóvil. Las más utilizadas son metales con baja densidad como el aluminio, magnesio y titanio; estos dos primeros presentan densidades más bajas que las matrices poliméricas.

Existen 3 tipos de MMC: reforzados con fibras continuas, con fibras discontinuas y con partículas. Las fibras continuas proporcionan las mejores propiedades en cuanto a rigidez y resistencia (por ejemplo, matriz de aluminio reforzado con fibra de boro). Los MMC reforzados con partículas y fibras cortas se fabrican con profusión, y presentan una mayor resistencia, rigidez y estabilidad dimensional que las aleaciones metálicas no reforzadas. Se preparan fundamentalmente por pulvimetalurgia y procesos de infiltración por fusión (por ejemplo, aluminio con partículas alúminas de forma irregular y SiC). El inconveniente que presenta este tipo de materiales es que su fabricación supone unos costes elevados.

- **Materiales compuestos de matriz cerámica (CMC):** estos compuestos presentan una gran complejidad, tanto en su comportamiento como en su producción industrial. Tienen gran rigidez, elevada resistencia a la fluencia y dureza, un alto punto de fusión, así como una gran resistencia a la corrosión. El gran inconveniente que presentan frente a todas sus ventajas es la baja tenacidad y su débil resistencia al choque térmico.

Las matrices más empleadas son el carburo de silicio, alúmina y zirconas. Como refuerzo se usan fibras de carbono, óxido de aluminio, carburo de silicio, tungsteno, etc.

- **Materiales compuestos de matriz polimérica (PMC):** son los materiales compuestos de mayor utilización a nivel industrial. Son dúctiles y moldeables, resistentes a la corrosión y con baja densidad y conductividad eléctrica y térmica, aunque requieren mejorar su tolerancia al daño y su capacidad estructural para soportar daños habituales durante su vida de servicio, sin una degradación significativa de sus propiedades. En cuanto a matrices de naturaleza orgánica, se distinguen entre:



termoestables (epoxi, poliéster, viniléster, fenólicas,...) y termoplásticos (polipropileno, poliamida,...). Las fibras de refuerzo más habituales son las de vidrio (E, R, C,...), carbono y aramida. Estos compuestos, respecto a los otros, cuentan con una tecnología de fabricación mucho más sencilla y desarrollada, con menores costes, tanto de materias primas como de fabricación.

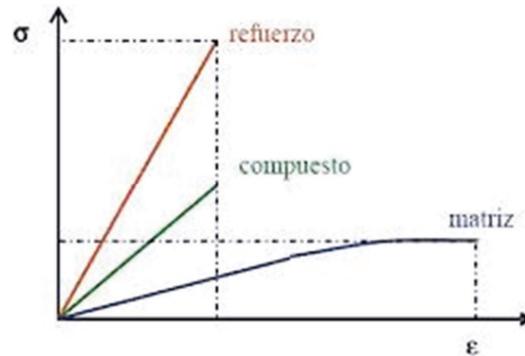


Figura 2.7. Propiedades mecánicas de la matriz, del refuerzo, y del material compuesto por combinación de ambos

2.3 COMPONENTES DE LOS MATERIALES COMPUESTOS POLIMÉRICOS

Como ya hemos indicado, los materiales compuestos están constituidos por dos componentes principales: un material aglutinante denominado matriz, que en el caso de materiales FRP (Fiber Reinforced Polymer) es polimérica, y un material de refuerzo formado por fibras, que se encuentran adheridas a la matriz.

Existen múltiples combinaciones de diferentes tipos de matrices y fibras, dando una gran variedad de materiales con propiedades mecánicas específicas, dependiendo de las necesidades estructurales.

A continuación describiremos de forma detallada las características de estos materiales, especificando sus partes y enfocando el estudio en la dirección de los materiales FRP que son objeto de trabajo en este proyecto.



2.3.1 FIBRAS

2.3.1.1 FIBRA DE CARBONO

La fibra de carbono es un refuerzo de elevado coste, con alta resistencia específica y rigidez, en las que su límite de rotura coincide con su límite elástico. Son fibras anisótropas, y ésta se aumenta incrementando el módulo axial. Se pueden diferenciar tres tipos diferentes según las temperaturas de tratamiento de calentamiento a las que se someten.

Tipos de fibra de carbono:

- **Fibra de carbono de alto módulo (HM):** máxima rigidez y mayor temperatura de tratamiento. Tienen un módulo específico superior en 70 veces el de las aleaciones de aluminio.
- **Fibra de carbono de alta resistencia (HR):** carboniza a la temperatura de tratamiento obteniendo la mayor resistencia tensil.
- **Fibra de carbono (III),** tercer y más barato tipo de fibra. Utiliza la temperatura de tratamiento más baja obteniendo la menor rigidez de las tres.

DESIGNACIÓN	Alta Resistencia HR	Alto Módulo HM	III
Diámetro hilo (μm)	8	7	7-8
Densidad (Kg/m^3)	1740-1760	1810-1870	1820
Módulo de elasticidad (GPa)	230	390	290
Resistencia a tracción (GPa)	2.6-5	2.1-2.7	3.1
Elongación de rotura (%)	2	0.7	1.1
Módulo específico	130	210	160
Coefficiente expansión térmica ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	2.56	2.56	2.56

Tabla 2.3. Propiedades de las diferentes fibras de carbono provenientes de PAN

Debido a su baja densidad, $1.6\text{kg}/\text{dm}^3$, sus propiedades mecánicas por unidad de peso son elevadas.



Proceso de fabricación de la fibra de carbono:

El carbono se fabrica mediante pirólisis controlada y ciclización de precursores de cierta fibra orgánica. Estos precursores son:

- **Precursores de Rayón.** Procedentes de la celulosa, en la actualidad casi ni se utilizan por ser un proceso con un coste bastante más elevado que el resto.
- **Precursores del alquitrán.** Se basan en el PVC o en brea y las fibras obtenidas son más baratas, ya que no se desaprovecha tanta masa de fibra como en los demás procesos.
- **Precursores de poliacrilonitrilo** o PAN. Base de la mayoría de las fibras de carbono actualmente comercializables.

Cada precursor de los citados, tiene su técnica, pero generalmente todos siguen las siguientes fases de fabricación:

1. **Estabilización**, el filamento es estirado y pasado a través de un horno de oxidación a baja temperatura.
2. **Carbonización**, dónde la estructura interna del polímero se convierte, a 800°C, en lazos de anillos hexagonales de carbono y elementos diferentes al carbono, son eliminados de la composición.
3. **Grafitización**, proceso de un calentamiento superior al anterior, alrededor de 2000°C, en el cual los cristales de carbono aumentan de tamaño y se favorece la orientación de las fibras.
4. **Tratamiento de superficie**, para finalizar el proceso se atraviesa una cámara que promueve la adhesión de las fibras.

Presentación industrial de la fibra de carbono:

La fibra de carbono se puede encontrar en el mercado de diferentes formas, por lo que los siguientes pasos para su posterior comercialización, vienen definidos por la presentación industrial.

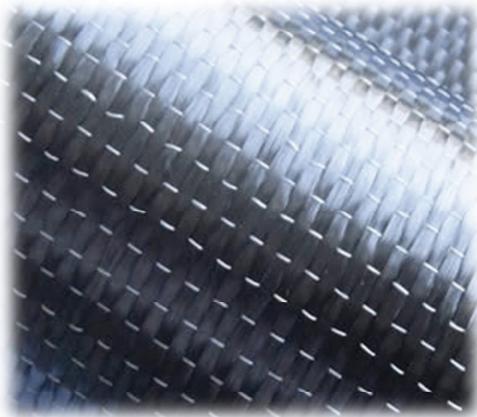
- **Mechas/Roving** (filamentos)
- **Tejidos** (unidireccionales/bidireccionales)
- **Híbridos** (carbono + vidrio/aramida)
- **Preimpregnados** (resina epoxi)



Fotografía 2.1. Roving carbono



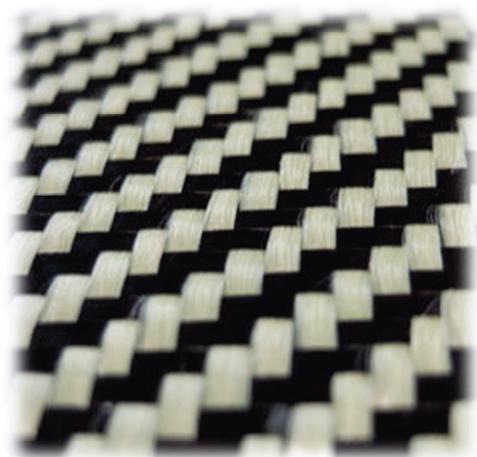
Fotografía 2.2. Preimpregnado carbono + epoxi



Fotografía 2.3. Tejido unidireccional



Fotografía 2.4. Tejido bidireccional



Fotografía 2.5. Carbono + aramida (Kevlar®)



Fotografía 2.6. Carbono + vidrio



Los filamentos de la fibra de carbono, están calculados entre 5 y 8 μ m de diámetro, combinados con mechas que contienen de 5000 a 12000 filamentos.

Es un material con unas excelentes prestaciones en aplicaciones estructurales, sometidas a esfuerzos repetitivos, ya que sus propiedades mecánicas son insensibles a cargas cíclicas. Su incorporación con fibras de vidrio o aramida, abre una ventana de expectativas al complementarse las propiedades, no obstante, se trata de un elemento caro y que en contacto con metales, favorece la aparición de par galvánico.

2.3.1.2 FIBRA DE VIDRIO

Debido a su alta disponibilidad, excelentes características mecánicas y bajo coste, estamos hablando del refuerzo más utilizado actualmente en la industria de los materiales compuestos. Sus aplicaciones pueden llegar incluso a remontarse a la época del antiguo Egipto, donde se descubrió como refuerzo de vasos y ánforas.

El vidrio fundido, cuyo componente principal es la sílice contenida en disolución de al menos dos silicatos, uno alcalino y un segundo alcalinotérreo, pasa por hileras de gravedad y es estirado en caliente a alta velocidad por un bobinado.

Tipos de fibra de vidrio:

Existen varios tipos de fibra de vidrio:

- **Vidrio E (Eléctrico)**. Ocupa el 90 % de la industria de los materiales compuestos en cuanto a utilización. Posee excelentes propiedades eléctricas y su primera gran aplicación consistió en el aislamiento de componentes eléctricos.
- **Vidrio A (Alto contenido en álcali)**. Su módulo es más bajo que el del vidrio E y es menos resistente, aunque químicamente, resiste bien.
- **Vidrio C (Químico)**. Se aplica en las capas superficiales de estructuras anticorrosión. Al igual que el vidrio A, es químicamente resistente.
- **Vidrio AR (Álcali Resistente)**. Es el único tipo de vidrio que puede asociarse con el hormigón o cemento, ya que cualquier otro sin sus propiedades, sería incompatible con los álcalis que se liberan durante la hidratación del hormigón o el cemento.
- **Vidrio R o S (Resistencia)**. Debido a su gran resistencia a tracción y un módulo de elasticidad muy superior al resto de tipos de vidrio, se emplea en estructuras con unas



características mecánicas elevadas, como puede ser la industria aeronáutica o militar, aplicándose a materiales resistentes a fatiga, temperatura y humedad.

- **Vidrio D (Dieléctrico).** Es un material que presenta pocas pérdidas eléctricas, por lo que su aplicación se centra mayoritariamente en el campo de las telecomunicaciones, como material permeable a las ondas electromagnéticas.
- **Vidrio B (Boro).** Elevada durabilidad y excelentes propiedades eléctricas.
- **Vidrio ERC (Eléctrico y Resistente químico).** Como su propio nombre indica, buenas propiedades eléctricas y químicamente resistentes.
- **Vidrio X.** Transparente a los Rayos X. Su base es de Li_2O .

Tipo	Vidrio A	Vidrio E	Vidrio S	Vidrio R
Diámetro de hilo (μm)	5-13	10-20	10	10
Densidad (Kg/m^3)	2500	2580	2480	2590
Módulo de elasticidad (GPa)	69	72,5	86	85
Resistencia a tracción (GPa)	3,1	3,4	4,59	3,4-4,4
Módulo específico	28	28	34	33
Coefficiente expansión térmica ($10^{-6}/^\circ\text{K}$)	8,6	5	5,1	5

Tabla 2.4 Propiedades de distintos tipos de fibra de vidrio

Proceso de fabricación de la fibra de vidrio:

La fibra de vidrio puede fabricarse mediante diversos procesos, pero todos ellos contienen los siguientes pasos de fabricación:

- **Composición-Fusión.** Las materias primas se dosifican y se mezclan, para introducir las posteriormente en un horno de fusión.
- **Fibrado.** El vidrio fundido compuesto por sílice y óxidos, se distribuye alimentando hileras de gravedad, estirándose posteriormente a alta velocidad por una bobina.
- **Ensimado.** El material procedente de la hilera es inutilizable, ya que los filamentos salen sin estar cohesionados. Para corregirlo y aportar a la fibra nuevas propiedades en función de su posterior utilización, los filamentos se recubren con una fina película compuesta por una disolución acuosa de varios agentes químicos, ésta operación se denomina ensimaje, que se produce a una temperatura de entre 80°C y 120°C . Tras ésta operación, que permite aumentar o disminuir la rigidez, los filamentos están



cohesionados y protegidos contra la abrasión, además de haber eliminado la electricidad estática y favorecer la unión vidrio-resina.

CONSTITUYENTE	PORCENTAJE	NATURALEZA QUIMICA	FUNCIÓN
Líquido vector	85-95	Agua	Soporte
Agentes filmógenos colantes	3-15	Acetatos, poliésteres, epoxis, copolímeros	Integridad, rigidez, protección, impregnación.
Agentes lubricantes	0.05-2	Aminas alifáticas, sales de amonio	Protección, lubricación
Agentes puente	0.1-0.5	Silanos	Unión a la resina, resistencia al envejecimiento
Agentes antiestáticos	0.2-1	Sulfonatos de alquilarilo, sales de amonio	Eliminar o reducir la electricidad estática

Tabla 2.5. Principales componentes del ensimaje.

- **Bobinado.** El material ensimado, se agrupa para formar los productos finales que se bobinan según formas y geometrías.
- **Secado.** Para finalizar, se hace pasar por dispositivos de secado el producto final, con el fin de eliminar el exceso de agua que se haya podido producir en el proceso de ensimado.

Tras éste proceso, podemos decir que la fibra de vidrio tiene:

- Excelentes propiedades mecánicas. (*Resistencia a tracción superior al acero*)
- Características eléctricas. (*Excelente aislante eléctrico*)
- Incombustibilidad. (*No propaga llama*)
- Estabilidad dimensional. (*Bajo coeficiente de dilatación*)
- Compatibilidad con materias orgánicas. (*Capacidad de asociarse a numerosas resinas sintéticas*)
- Imputrescibilidad. (*No se pudre*)
- Baja conductividad térmica. (*Supresión de puentes térmicos*)
- Permeabilidad dieléctrica. (*Aplicaciones de telecomunicaciones*)
- Resistencia química. (*Unida a las matrices apropiadas*)



Presentación industrial de la fibra de vidrio:

A la hora de elegir un producto compuesto por fibra de vidrio, ha de tenerse en cuenta parámetros como la densidad lineal ($1\text{tex} = 1\text{g/Km}$) o el gramaje (gramo/m^2), así como la facilidad de manipulación e impregnación de resina. Actualmente existen en el mercado varias presentaciones industriales de la fibra de vidrio.

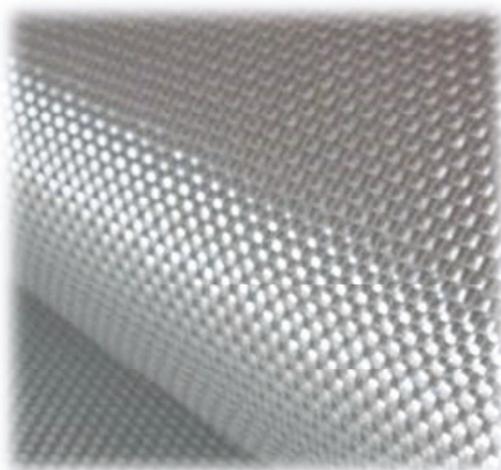
- **Mat** (Superficie/hilos cortados/hilos continuos)
- **Roving** (Directo/ensamblado/spun roving/voluminizado/texturizado)
- **Tejido** (Equilibrado/orientado/unidireccional)
- **Hilos cortados** (Refuerzo/termoplásticos/refuerzo escayolas/usos varios)
- **Varios** (Fibra molida/complejos Mat-Tejido)



Fotografía 2.7. Mat de hilos cortados



Fotografía 2.8. Roving fibra de vidrio



Fotografía 2.9. Tejido equilibrado



Fotografía 2.10. Tejido Plain



Fotografía 2.11. Hilos cortados



Fotografía 2.12. Fibra de vidrio molida

2.3.1.3 FIBRA DE ARAMIDA

Es una fibra de origen orgánico y sintético, obtenida por el hilado de poliamidas aromáticas, comercialmente conocida como Kevlar®, marca registrada por Dupont, ofrece una potencial resistencia a tracción y rigidez, bastante más elevada que las demás fibras orgánicas, debido a la orientación del módulo y su alto grado de cristalinidad. Son fibras mecánica y químicamente estables aunque su resistencia a compresión y flexión difiere desfavorablemente del resto de tipos de fibras.

La fibra de aramida se obtiene mediante un proceso de extrusión e hilado, y los dos tipos más comercializados son el Kevlar® 29 y el Kevlar®49.

DESIGNACIÓN	Kevlar® 29	Kevlar®49
Diámetro de hilo (μm)	12	12
Densidad (Kg/m^3)	1440	1450
Módulo elasticidad (GPa)	60	128
Resistencia a tracción (GPa)	1.92	2.94-3.6
Módulo específico	41	88

Tabla 2.6. Propiedades del Kevlar®29 y Kevlar®49



En el mercado se presenta en dos grupos:

- **Fibras continuas** (mechas, rovings, tejidos)
- **Fibras discontinuas** (mats, fieltros)

2.3.1.4 FIBRA DE BORO

Se trata de una fibra de elevado coste, el cual restringe su uso a aplicaciones tecnológicamente avanzadas como pueden ser la industria aeronáutica o militar. En su estado natural, el boro es un semiconductor, duro y con una temperatura de fusión alta.

Para su fabricación, se pueden utilizar dos sustratos diferentes, de tungsteno y de carbono.

- **Sustrato de tungsteno.** Son fibras obtenidas a partir de la deposición en sustrato de tungsteno, y las más utilizadas a pesar de su elevado coste.
- **Sustrato de carbono.** Son fibras obtenidas a partir de la deposición en sustrato de carbono, con la intención de disminuir el coste frente al de tungsteno. Sin embargo, el proceso de deposición es mucho más complicado.

DESIGNACIÓN	Boro
Diámetro de hilo (μm)	100-140
Densidad (g/cm^3)	2.49-2.57
Módulo elasticidad (GPa)	400
Resistencia a tracción (GPa)	3.6
Módulo específico	155
Coefficiente expansión térmica ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	4.9

Tabla 2.7. Propiedades de la fibra de boro

La gran mayoría del boro se comercializa en cintas de preimpregnados boro-epoxi, en los que el volumen de fibra suele estar entre 30 y 35%, o en filamentos unidireccionales.



2.3.1.5 FIBRA DE CARBURO DE SILICIO

Es una alternativa, a coste inferior, para las fibras de boro a la hora de reforzar aleaciones metálicas de aluminio y titanio, también como refuerzo de matrices orgánicas y cerámicas. Su proceso de producción es parecido al de las fibras de boro.

DESIGNACIÓN	Carburo de Silicio
Diámetro de hilo (μm)	140
Densidad (Kg/m^3)	3000
Módulo elasticidad (GPa)	400
Resistencia a tracción (GPa)	3.9
Módulo específico ($\text{GPa} \cdot \text{m}^3/\text{Kg}$)	133

Tabla 2.8. Propiedades de la fibra de Carburo de Silicio

Existen tres tipos de fibra de Carburo de Silicio en función de las matrices para las que van a ser utilizadas.

1. **SCS-2.** Reforzar matrices de aleaciones de aluminio.
2. **SCS-6.** Reforzar matrices de aleaciones de titanio.
3. **SCS-8.** Reforzar matrices de aleaciones de aluminio cuando se pretende obtener mejores propiedades transversales que en el primer caso.

2.3.1.6 FIBRA DE CUARZO

Son fibras con un alto contenido en sílice, producidas con cristales de cuarzo natural como materia prima, que son transformados en barritas para crear posteriormente los filamentos (200 filamentos dan resultado a una fibra). Es flexible y de una alta resistencia.

DESIGNACIÓN	Cuarzo
Densidad (Kg/m^3)	2200
Módulo elasticidad (GPa)	71
Resistencia a tracción (GPa)	3.45
Elongación a la rotura (%)	1
Módulo específico	32

Tabla 2.9. Propiedades de la fibra de cuarzo



Tiene la posibilidad de ser utilizada con la mayoría de las resinas y la forma más habitual de encontrarla en el mercado es en fibras cortas, preimpregnados y tejidos.

2.3.2 MATRICES

El tipo de matriz más importante utilizado en materiales compuestos poliméricos son las resinas líquidas termoestables o químico-estables, son líquidas a temperatura ambiente y deben curarse para alcanzar el estado sólido.

Este tipo de polímeros se fabrica normalmente a partir de precursores líquidos o semisólidos que endurecen irreversiblemente; esta reacción química es conocida como policondensación, polimerización o curado y, al final del proceso, la resina líquida se convierte en un sólido duro con eslabones químicos en cruz. Las unidades moleculares que forman la red, la longitud y densidad de los eslabones en cruz de la estructura, influirán en las propiedades mecánicas del material. La red y la longitud de las unidades dependen de los productos químicos utilizados y los eslabones en cruz de la temperatura de curado.

A diferencia de los termoplásticos, esta reacción es irreversible y el polímero no puede ser reciclado. No funde, pero si la temperatura se incrementa lo suficiente, el polímero termoestable comienza a descomponerse y degradarse.

Las resinas termoestables presentan:

- Elevada ligereza
- Buenas propiedades adhesivas
- Facilidad de procesado a temperatura ambiente
- Una amplia variedad de resinas bicomponentes adaptables a multitud de procesos
- Propiedades mecánicas bajas en comparación a otros materiales de ingeniería.

La clasificación de estas matrices termoestables se realizará en función de la **temperatura de utilización**, aunque de forma general será la temperatura de transición vítrea (T_g) la que marcará en la mayoría de los casos el límite superior de uso, pues la absorción de humedad en estos compuestos provoca una disminución de la T_g , provocando una pérdida significativa de propiedades para valores de temperatura cercanos o superiores a la T_g .



Bajas temperaturas	Poliéster	Isoftálica Ortoftálica Ácido caliente
Medias temperaturas	Viniléster Epoxi	
Medias-Altas temperaturas	Fenólica	
Altas temperaturas	Bismaleimida Poliimida Esteres cianato Polieteramida	

Tabla 2.10. Clasificación de las resinas termoestables en función de la temperatura de utilización

2.3.2.1 RESINA DE POLIÉSTER

Las resinas de poliéster insaturadas constituyen la familia más importante de las resinas termoestables utilizadas en los materiales compuestos, concretamente en más del 90% de los laminados comerciales. La gran variedad a la hora de realizar su síntesis, hace que tengan un amplio abanico de posibilidades, al poder ajustar las propiedades en función de la aplicación final.

Las resinas termoestables están formadas por monómeros o oligómeros polifuncionales que, tras un curado posterior, dan una red tridimensional de cadenas unidas por enlaces covalentes, que se caracteriza por ser insolubles e infusibles.

La resina de poliéster insaturada típica se obtiene por policondensación del anhídrido maleico, anhídrido ftálico y polipropilenglicol. El polímero obtenido es disuelto en estireno. Esta solución puede copolimerizar bajo la acción de radicales libres o por el calor. En su estado inicial previo al curado, tienen baja viscosidad, que permite que la resina fluya con facilidad con una buena impregnación de las fibras y mazos de fibras de refuerzo.



El uso de iniciadores químicos y aceleradores, y la aplicación de calor o exposición a la radiación, afectarán al curado de una resina de poliéster insaturada. En el curado simple a temperatura ambiente de un sistema, el acelerador es un pequeño porcentaje de una sal de cobalto orgánica, la cual es añadida a la resina (normalmente por el suministrador, por ejemplo, la resina preacelerada) para evitar posibles accidentes que podrían ocurrir si el acelerador concentrado y el iniciador se mezclaran directamente, pues reaccionan de forma explosiva.

El endurecimiento de las resinas se efectúa en presencia de un catalizador, de dos formas diferentes: a temperatura ambiente (con ayuda de un acelerador) o a temperaturas elevadas. Los catalizadores, son peróxidos orgánicos que tienen por objeto reaccionar con el acelerador, lo que ocasiona que la molécula se rompa, produciendo radicales libres que inician una reacción de polimerización adicional en el estireno diluido, atacando también los dobles enlaces en los radicales del ácido insaturado del poliéster, dando lugar a la formación de puentes de estireno que enlazan las moléculas de poliéster.

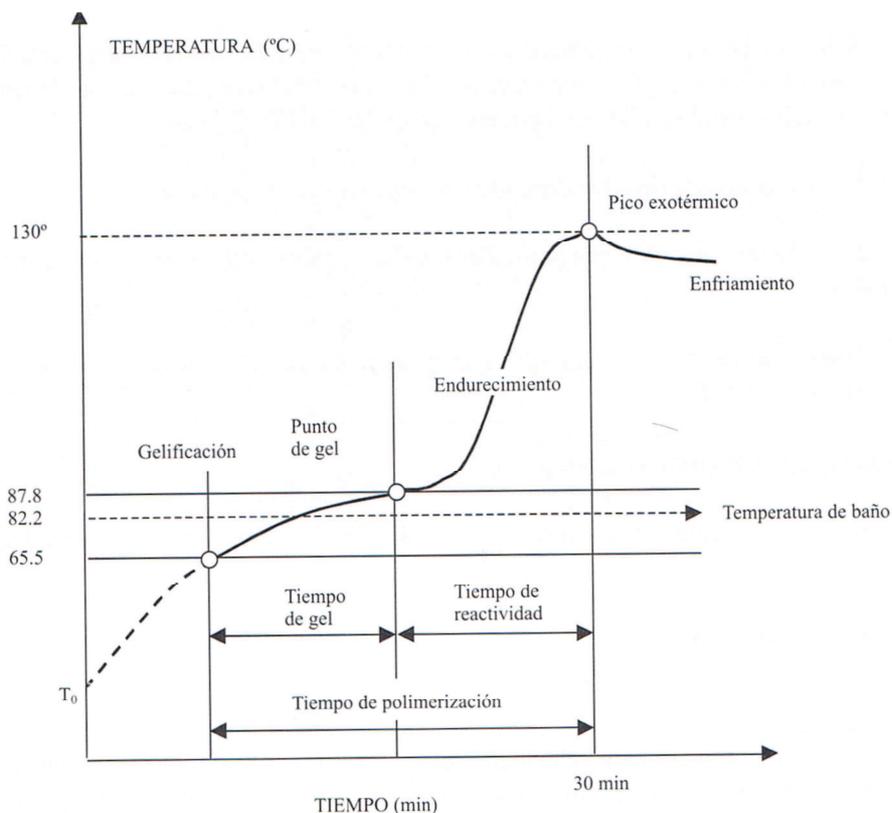


Figura 2.8. Fases de reactividad de la resina de poliéster



- El pico exotérmico es la temperatura máxima que alcanza la resina durante la polimerización.
- El intervalo de tiempo de gel-pico exotérmico es el tiempo transcurrido entre la gelificación de la resina y el pico exotérmico.

Los aceleradores químicos dependerán del tipo de catalizador; y las cantidades utilizadas, serán función de la reactividad de la resina y de los tiempos de gel (tiempo que transcurre desde que se añade el último de los componentes del sistema catalítico a la resina y el momento en que ésta alcanza el estado de gel) y curado requeridos. La relación con la resina en los catalizadores suele establecerse entre el 1 y el 3%, mientras que en los aceleradores se comprende entre el 0,1% y 0,5%. A estos componentes se añade un tercero, llamado inhibidor, en una proporción del 0,05% al 0,1%.

Los principales tipos de resina de poliéster son:

- **Ortoftálica**, que es una resina de uso general.
- **Isoftálica**, que tiene propiedades de resistencia superiores al desgaste y a los agentes químicos respecto la ortoftálica.
- **De ácido caliente**, que se utiliza como retardador de llama.

El poliéster insaturado es un polímero muy versátil, que permite obtener compuestos con buenas propiedades a precios relativamente bajos. Habitualmente se utilizan cuando se necesita un equilibrio entre las propiedades mecánicas y la resistencia química a temperaturas similares a la ambiente. Además, presenta buena aptitud para impregnar con facilidad las fibras de vidrio. Algunos puntos débiles de estas resinas son: la retracción en el curado, susceptibilidad a los medios químicos, especialmente a los medios alcalinos, y la absorción de agua por parte de la resina.



TIPO DE RESINA DE POLIÉSTER	PROPIEDADES DE LA RESINA PURA						PROPIEDADES DEL LAMINADO		
	Resistencia a flexión (MPa)	Resistencia a flexión (MPa)	Módulo de tracción (GPa)	Porcentaje de elongación	HDT (°C)	Porcentaje de fibra (en caso de fibra de vidrio)	Resistencia a flexión (MPa)	Resistencia a flexión (MPa)	Módulo de tracción (GPa)
Ortoftálica	100	65-75	3,2	2-4	55-110	30	150	90	7
Isoftálica	140	70-85	3,5	3,5	75-130	30	230	120	8
Neopentil-glicol	130	70	3,4	2,4	110	30	170	90	7
Isoftálica/ neopentilenglicol	130	60	3,4	2,5	90-115	30	160	90	7
Ácido HET	80	40-50	3,2	1,3-4	55-80	30	150	85	7
Isoftálica/ ácido HET	85	55	3,2	2,9	70	30	150	90	7
Bisfenol-A	130	60-75	3,2	2,5-4	120-136	30	170	90	7
Parafina clorada	110	50-60	3,4	1,2-4,8	55-80	30	140	90	7
Isoftálica/ parafina clorada	90	60	2	4,8	50	30	140	100	7

Tabla 2.11. Cuadro resumen resina de poliéster

2.3.2.2 RESINA VINILÉSTER

Son relativamente recientes y están llamadas a tener un gran desarrollo, a pesar de su elevado coste. Las resinas de viniléster se obtienen por reacción de adición de resinas epoxi, bisfenol diepoxídico y ácidos insaturados monocarboxílicos.

Las propiedades finales de la resina de viniléster, varían según la combinación de resinas epóxicas y ácidos insaturados utilizados en la formulación, por ejemplo, las resinas epoxi de bisfenol A, muestran buenas propiedades mecánicas; las resinas cicloalifáticas, buena resistencia a la radiación UV y las obtenidas de novolacas, presentan mejores propiedades a altas temperaturas, aunque con el inconveniente de alta fragilidad.



Este tipo de resinas se presentan en disoluciones con un 30-40% de monómero reactivo de bajo peso molecular, generalmente el estireno. De esta forma, se reducirá la viscosidad de la resina y se favorecerá su manipulación, además de permitir el entrecruzamiento de las cadenas de resina durante el curado.

La reacción de curado se produce de forma similar a las resinas de poliéster insaturado, donde la reacción de entrecruzamiento se produce a partir de la reacción de adición por radicales libres, debido a que ambas resinas proporcionan instauraciones donde se producirán los entrecruzamientos entre las cadenas. Uno de los iniciadores más utilizados es el peróxido de metil-etil-cetona.

Para conseguir mejores propiedades, generalmente es necesario un post-curado con temperaturas elevadas. Entorno los 130°C, se consiguen las propiedades de la resina prácticamente curada en su totalidad. Las resinas curadas serán más flexibles y con mayor tenacidad que las de poliéster insaturado, debido al menor nivel de entrecruzamiento entre las cadenas poliméricas de viniléster, de esta forma se mejora la mojabilidad y, por tanto, la adhesión con las fibras de vidrio de refuerzo.

Las resinas de viniléster se encuentran entre la familia de los poliésteres y las epoxi, combinando las mejores propiedades de ellas, con una contracción de volumen del 5 al 10%.

Las características principales que identifican a este tipo de resina son:

- Buenas cualidades mecánicas.
- Excelente resistencia a la fatiga.
- Buena adhesión sobre las fibras de refuerzo, debido a los grupos hidroxilos sobre las ramificaciones de la cadena.
- Resistencia a la corrosión, incluso en agua caliente.
- Excelente fluidez, que facilita su impregnabilidad y moldeo.
- Buena resistencia al fuego, mejorable por modificación de la molécula viniléster mediante átomos de cloro o bromo, obteniendo resinas autoextinguibles.

A pesar de su precio, superior a otros tipos de resinas, sus propiedades y resistencia química la hacen muy atractiva para aplicaciones y equipos expuestos a ambientes que puedan alterar el compuesto, como en sistemas de tuberías o conductos y tanques de



almacenamiento, sin olvidar otros sectores como el del transporte, el del automóvil y el de las infraestructuras en ambientes nocivos como el salino.

2.3.2.3 RESINA FENÓLICA

Esta resina fue una de las pioneras en la producción de materiales compuestos. Estos materiales iniciales consistían en unas telas textiles y mats, o papeles impregnados con la resina, posteriormente curados.

Las resinas fenólicas se preparan a partir del fenol, cresol o xilenol y del aldehído fórmico. Su condensación es más o menos rápida, según el pH del medio de reacción.

Las principales propiedades de los compuestos a base de resinas fenólicas son:

- Excelentes características eléctricas.
- Una buena resistencia a temperaturas elevadas.
- Muy buena resistencia al fuego.
- Resistencia al choque y a la abrasión.
- Buena resistencia al ataque químico y en especial a los disolventes orgánicos.
- Excelente adhesión a otras resinas y estabilidad dimensional.

Se pueden establecer dos grandes clasificaciones de este tipo de resinas:

- Según su presentación ante el moldeo:
 - Polvos de moldeo.
 - Resinas en solución en un disolvente orgánico.
 - Resinas líquidas, con un cierto porcentaje de agua.

- Según la técnica de moldeo:
 - Moldeo a alta y media presión.
 - Moldeo a baja presión.

Encuentran su aplicación como componentes aislantes en equipos eléctricos, reductores, materiales que sufran desgaste y una gran variedad de laminados en forma de



paneles con fines funcionales o decorativos. Al emplearlas con refuerzos de fibra de vidrio o carbono, las propiedades mecánicas resultantes son menores que con el uso de resinas epoxi, pero su comportamiento frente a emisiones tóxicas, al fuego y llama es superior a las otras resinas.

Por lo tanto, podemos concluir que, el empleo de este tipo de resinas es muy adecuado en la construcción, debido a que puede llegar a soportar unas temperaturas muy altas y además de su alta resistencia al impacto y abrasión.

2.3.2.4 RESINA EPOXI

Las resinas epoxi son termoendurecibles y contienen en su molécula dos o varias funciones epoxídicas o glicídicas. La más típica es el diglicidilester del bisfenol A (DGEBA), que además de ser la más antigua, se mantiene entre las más utilizadas.

En general, se presentan en forma líquida más o menos viscosa, que puede transformarse en material sólido infusible mediante la acción de endurecedores apropiados. Éstos pueden ser de dos tipos: compuestos que contienen funciones capaces de agregarse al ciclo epóxido durante el proceso de moldeo (se utilizan en proporciones estequiometrías definidas, necesitando aporte térmico durante la transformación) y compuestos que desencadenan la copolimerización de las resinas (endurecedores catalíticos).

Al mezclarse, reaccionan causando la solidificación de la resina, durante ese curado o secado, realizado a temperatura ambiente, se forman enlaces cruzados, lo que hace que su peso molecular sea elevado.

Las resinas epoxi son versátiles y pueden ser usadas en una gran variedad de aplicaciones. La formación de la resina debe satisfacer los requerimientos de fabricación y cumplir unas características mecánicas determinadas. Se pueden distinguir las siguientes: resinas para laminado, resinas para enriamiento filamentario, resinas para RTM (Resin Transfer Molding), preimpregnados de curado a 175°C, preimpregnados de curado a 120°C y preimpregnados de curado a 60-120°C.



Se asocian normalmente a las fibras de carbono, en aplicaciones con elevados requisitos de resistencia y rigidez. Debido a su elevada viscosidad, y a un curado más lento, sufren una retracción más reducida que las resinas de poliéster, lo que justifica sus excelentes propiedades adhesivas y, como consecuencia, unos porcentajes muy altos de refuerzo.

Estas resinas son las que tienen un mayor precio en relación al resto de las analizadas, sin embargo, aportan ventajas especiales como son una mejor resistencia a la humedad, muy buenas propiedades a la rotura y soportan temperaturas de hasta 180°C, así como una excelente resistencia química y al ataque de fluidos corrosivos.

2.3.2.5 RESINAS DE BISMALÉIMIDA, POLIIMIDA Y ESTERES CIANATO

Estas resinas, con características de procesamiento similares a la epoxi, son consideradas como la nueva generación de resinas de alta temperatura. Todas ellas están disponibles comercialmente, algunas veces mezcladas con epoxi, y ofrecen prestaciones adecuadas a temperaturas de hasta los 300°C.

Las resinas de bismaleimida y las poliimida presentan el inconveniente de su dificultad de procesar, al estar basados los sistemas prácticos en la química de la polimerización de reactantes monómeros, trayendo consigo el curado, una reacción de condensación con la obtención de vapor condensado (necesario prever la evacuación de estos volátiles y las emisiones de humedad). Sin embargo, los sistemas de cianato éster, combinan las buenas prestaciones de temperatura elevada con una buena procesabilidad del material.

	EPOXI	ESTERES CIANATO	BISMALÉIMIDA
Densidad (Kg/m ³)	1200-1250	1100-1350	1200-1300
Resistencia a tracción (MPa)	48-90	69-90	35-90
Módulo a tracción (MPa)	3100-3800	3100-3400	3400-4100
Deformación a la rotura (%)	1,5-8	2-5	1,5-3
Coefficiente de expansión térmica (10 ⁻⁶ /K)	60-70	60-70	60-65
Constante dieléctrica a 1MHz	3,8-4,5	2,7-3,2	3,4-3,7
Temperatura de curado (°C)	150-220	177-250	220-300
Absorción de agua (%)	2-6	1,3-2,5	4-4,5

Tabla 2.12. Cuadro resumen resinas de alta temperatura



2.3.3 PROCESOS DE FABRICACIÓN

La industria de los materiales compuestos, ofrece una gran variedad en cuanto a los procedimientos de moldeo, facilitando así las posibilidades técnicas de realización de las piezas. Todos los procesos de moldeo de un material compuesto con fibras constan de tres fases:

- Impregnación del refuerzo (fibra) por la matriz (resina).
- Adaptación del compuesto (fibra + resina) a las formas y dimensiones requeridas.
- Endurecimiento del compuesto y desmolde.

Estas tres fases se realizan en cualquiera de los procesos descritos a continuación, cuya elección se efectuara atendiendo a criterios de economía, características físicas, características mecánicas, etc.

En una clasificación general, se puede establecer dos grandes grupos de procesos de moldeo de materiales compuestos:

- Procesos de molde abierto
- Procesos de molde cerrado

2.3.3.1 PROCESOS DE MOLDE ABIERTO

Procesado de preimpregnados en autoclave

El preimpregnado es un material, que como su propio nombre indica, ha sido impregnado de resina anteriormente a su uso y almacenaje, evitando la necesidad de su impregnado in-situ, simplificando el proceso. Esto permite controlar más minuciosamente la cantidad de resina en la relación refuerzo/matriz del material compuesto, por lo que éste proceso, adquiere la fiabilidad adecuada en la fabricación de piezas para la industria aeronáutica, eólica, automovilismo de alta competición, etc.

Los preimpregnados se pueden encontrar con características diferentes (formas, tejidos, etc.) y su almacenado ha de realizarse a bajas temperaturas.



Fotografía 2.13. Preimpregnado en autoclave (www.bassobikes.com)

Las funciones principales de la autoclave en el proceso de moldeo es la aplicación simultánea de presión y calor.

La utilización de éste tipo de material queda muy restringida debido a su elevado precio.

Procesado de preimpregnados sin autoclave

Dentro del mercado, existe la posibilidad de encontrar materiales similares a los de altas prestaciones a costes muy inferiores. Esta posibilidad nos la ofrecen los preimpregnados que se procesan mediante laminación o enrollado y utilizando, para su curado, sistemas alternativos a la autoclave como puede ser el horno.



Fotografía 2.14. Preimpregnado sin autoclave (www.airtechintl.com)



Las ventajas de éste proceso, permite a las empresas la utilización de materiales compuestos con excelentes propiedades a precios muy competitivos, sustituyendo al aluminio o el acero.

Enrollamiento filamentario

El enrollamiento filamentario es un proceso de fabricación de refuerzos continuos en el que las bandas, rovings o filamentos son enrollados a gran velocidad sobre un mandril que gira sobre su eje.

Las piezas fabricadas mediante éste proceso quedan reducidas a las formas cilíndricas, esféricas o cónicas.



Fotografía 2.15. Enrollamiento filamentario (www.directindustry.es)

La posibilidad de usar fibras continuas sobre la totalidad de la pieza, sin ningún tipo de unión y orientar las fibras en la dirección de los esfuerzos, la producción automatizada, los costes reducidos y la fabricación de grandes piezas constan como ventajas del proceso.

Como inconvenientes se presentan la dificultad de cambiar la dirección de las fibras, incompatibilidad con las formas cóncavas o la baja calidad de la superficie exterior.

Moldeo por contacto a mano

Fue el primero y sigue siendo uno de los procesos más utilizados en el moldeo de materiales compuestos, aunque lento. También conocido como “hand lay-up”, es el más económico de todos y se utiliza cuando no existe la necesidad de fabricar una gran cantidad de piezas en serie. La calidad final de la pieza, viene determinada por la pericia de la mano de obra y solo se obtiene un acabado fino por una de las caras.



Fotografía 2.16. Moldeo por contacto a mano (www.tecnologiadelosplasticos.blogspot.com)

En comparación con el resto de procesos, las características mecánicas son inferiores, ya que al tratarse de un método totalmente manual, es difícil controlar la relación óptima de fibra/resina, así como extraer todo el aire ocluido durante el laminado.

Moldeo por proyección simultánea

Éste proceso consiste en la proyección sobre un molde de resina y fibras a la vez. Es una evolución del moldeo por contacto a mano, al conseguir automatizar, mediante una pistola, el proceso de extensión e impregnación de las fibras sobre el molde, permitiendo ganar en productividad y reducir los costes de fabricación, al minimizar la mano de obra.



Fotografía 2.17. Moldeo por proyección simultánea (www.directindustry.es)

Las resinas deben tener una viscosidad menor a las utilizadas normalmente, con el fin de posibilitar su empleo mediante la pistola de pulverización y facilitar su impregnación. Se requiere un minucioso y adecuado control y limpieza de los utensilios.



Centrifugación

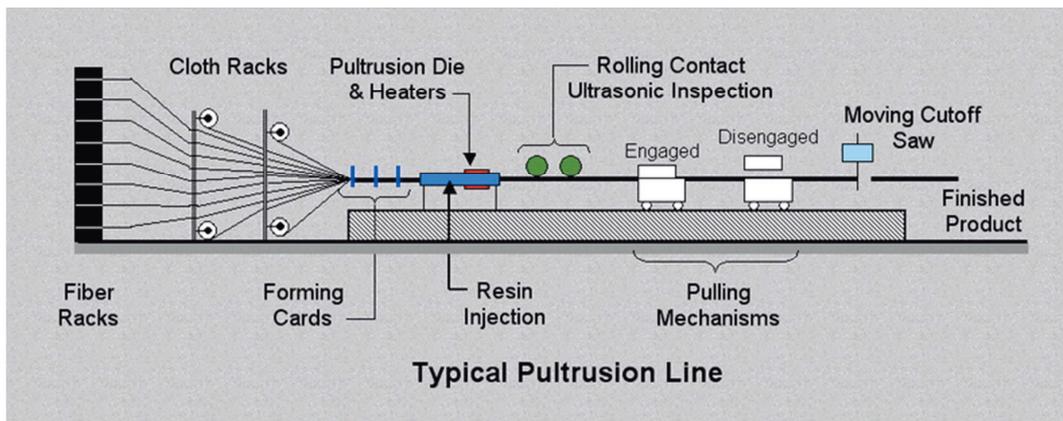
Es un proceso consistente en la mezcla de fibras continuas con la resina y su posterior deposición en un molde giratorio de alta velocidad, obteniendo cuerpos cilíndricos o troncocónicos huecos debido a la fuerza centrífuga creada por la rotación del molde. Las piezas que se extraen de éste proceso, poseen una mayor rigidez frente al enrollamiento filamentario, pero con una menor resistencia mecánica.

Permite obtener las dos caras del compuesto lisas y, si se necesita, una capa interior rica en resina. Por el contrario, requiere de inversiones elevadas.

2.3.3.2 PROCESOS DE MOLDE CERRADO

Pultrusión

La pultrusión es un proceso de fabricación en serie comparable a la extrusión. Con ella se obtienen piezas de materiales compuestos de forma automática y continua. Las fibras son estiradas, y no empujadas como se podría pensar, por la máquina, donde se impregnan de resina y pasan a un módulo donde son conformadas con la forma deseada, a continuación, la resina inicia su reacción exotérmica que junto con la presión a la que se somete la pieza se obtiene el resultado final.



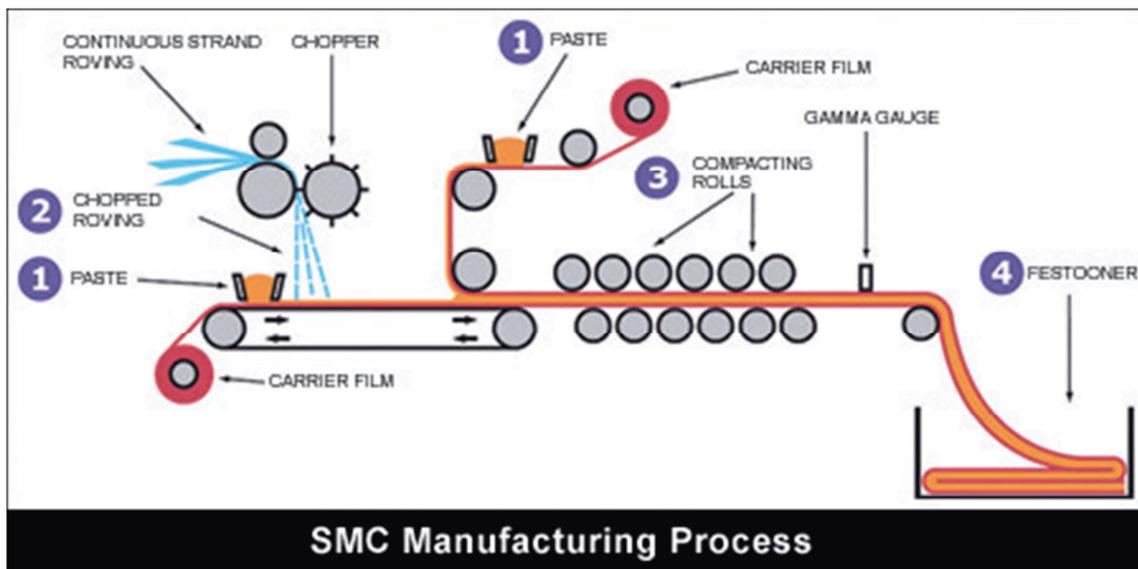
Fotografía 2.18. Pultrusión (www.fibrotec.es)

Éste proceso de moldeado permite la fabricación de perfiles de cualquier longitud y geometría, así como un excelente acabado a bajo coste, en cambio, se trata de un producción lenta que no permite orientar las fibras en ángulos que no sean los de su forma unidireccional.



Sistema de moldeo compound

SMC (sheet molding compound), así se denomina al proceso consistente en la obtención de piezas por compresión de preimpregnados. Dichos preimpregnados son un material formado por una resina termoestable, un refuerzo de fibra, cargas y aditivos para mejorar o proporcionar unas determinadas propiedades finales a la pieza. Se obtiene mediante la combinación en continuo de este sistema químico termoestable con fibra cortada in-situ y su posterior conformado en forma de láminas mediante rodillos de presión que compactan la pasta. Se desplaza envuelta en films gracias a cintas transportadoras. La velocidad de las cintas regula la cantidad de fibras del compuesto. Una vez se llega a la final de la cadena de producción, se recoge en rollos para su almacenamiento.

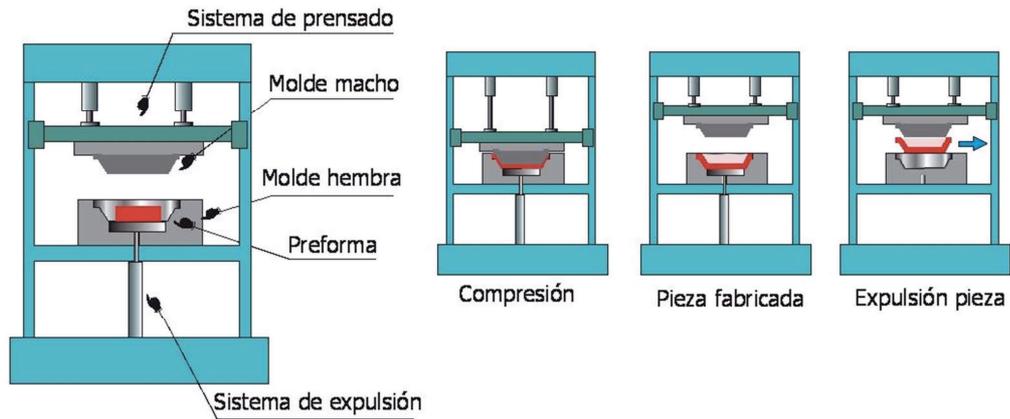


Fotografía 2.19. Sistema de moldeo compound (www.indicomposites.com)

El SMC se moldea por compresión de moldes en caliente, normalmente de acero, con un tiempo de curado de dos a tres minutos.

Prensa (en frío y en caliente)

La prensa en fría es una alternativa de bajo coste frente al SMC, consiguiendo un acabado de mayor calidad que mediante moldeo por contacto a mano. Es un proceso que utiliza moldes a baja presión sin aplicar calor. La cadencia de fabricación es lenta y permite obtener piezas de forma no muy complejas con las dos caras lisas.

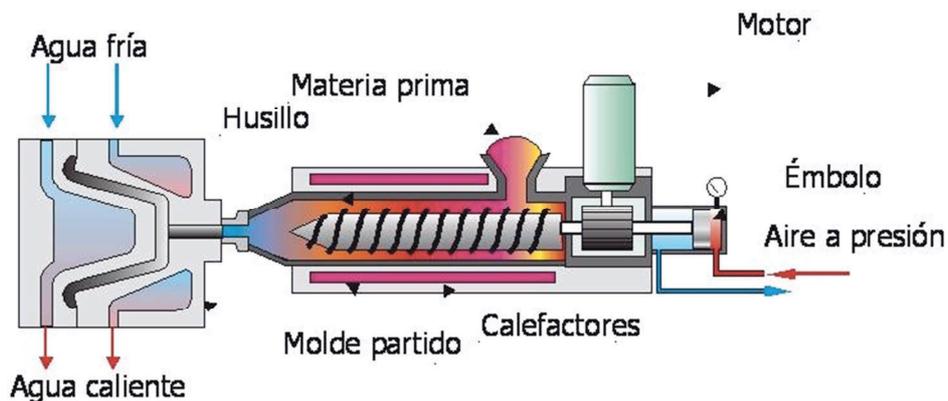


Fotografía 2.20. Prensa (www.constructor.educarex.es)

La prensa en caliente sigue el mismo procedimiento que el prensado en frío, con la diferencia que utiliza moldes calentados que, lógicamente, deberán ser metálicos. La aplicación de calor acelera los tiempos de curado y produce una pieza menos porosa que en frío.

Moldeo por inyección de termoestables

El compuesto formado por las fibras y la resina toma forma de gránulos en éste proceso. Estos alimentan a una máquina mediante una tolva, dónde a través de un tambor equipado con un tornillo helicoidal calentado, los gránulos pasan a un estado viscoso, penetrando en el molde situado al final del tambor, en el cual se aplica la presión y en consecuencia la forma del producto acabado.



Fotografía 2.21. Moldeo por inyección de termoestables (www.constructor.educarex.es)



Moldeo por transferencia de resina (RTM)

Es un proceso de fabricación de molde cerrado a baja presión que ofrece la opción de obtener piezas con una cierta complejidad y tamaño.

Un refuerzo seco se inserta dentro de un molde dándole la preforma, posteriormente se tapa con la otra cara del molde y se inyecta la resina, desplazando el aire ocluido en el interior del molde por los orificios de ventilación. Una vez realizado el curado, se desmolda.



Fotografía 2.22. Moldeo de transferencia de resina (www.directindustry.es)

El RTM requiere una inversión inicial reducida, aunque solo es rentable para un gran volumen de producción. Permite la obtención de grandes piezas con buen acabado y la capacidad de controlar el volumen de fibras, así como la utilización de diferentes sistemas de resinas y refuerzos.



PROCESOS DE FABRICACIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS					
PROCESOS	ventajas	inconvenientes	maquinaria	utillaje	
MOLDE ABIERTO	Preimpregnados	↑P. mecánicas, espesores exactos	Coste materia prima elevado	Autoclave/horno	El molde es una única pieza en preimpregnado o metálica
	Enrollamiento	Proceso automático, ↑P. mecánicas	Mal acabado exterior	Maquinaria de centrifugación	El molde es una pieza cilíndrica metálica
	Hand lay-up	No presenta limitaciones en cuanto a formas y dimensiones de la pieza	↓P. mecánicas, espesores variables, ↑ coste laboral	No requiere	El molde es una única pieza en MC, madera, escayola o metálica
	Proyección	No presenta limitaciones en cuanto a formas y dimensiones de la pieza	↓↓P. mecánicas, espesores variables, alto coste laboral	Máquina de proyección	El molde es una única pieza en vidrio/poliéster o metálica
	Centrifugación	Proceso automatizado, superficie exterior lisa	Elevados costes de maquinaria, series cortas	Maquinaria de centrifugación	El molde es una pieza cilíndrica metálica
MOLDE CERRADO	Pultrusión	Proceso continuo automatizado, ↑P. mecánicas, ↓ costes	Únicamente puede fabricarse perfilería	Maquinaria de pultrusión	Molde y contramolde metálicos calefactados
	SMC	Ideal para series muy largas	Coste de maquinaria y utillaje elevados	Prensa y dispensador de SMC y corte	Molde y contramolde calentados metálicos
	Prensa frío	Dos caras lisas, mano de obra no importante inversiones bajas, preforma	↓P. mecánicas, ciclo de moldeo largo	Prensa de acción rápida	El molde y contramolde son de vidrio/poliéster o metálicos
	Prensa caliente	Alta calidad	Costes de maquinaria y utillaje elevados	prensa	Molde y contramolde metálicos calentados
	Inyección	Series muy largas	↓P. mecánicas, coste de maquinaria muy elevado	Máquina de inyección	Molde y contramolde metálicos
	RTM	Libertad de formas y dimensiones, ↑P. mecánicas, costes bajos	Series medias	Maquinaria de transferencia de resina	Molde y contramolde metálico (presión ↑) o MC (presión ↓). También con bolsa de vacío

Tabla 2.13. Resumen procesos de fabricación de materiales compuestos



3. PROGRAMA EXPERIMENTAL



3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

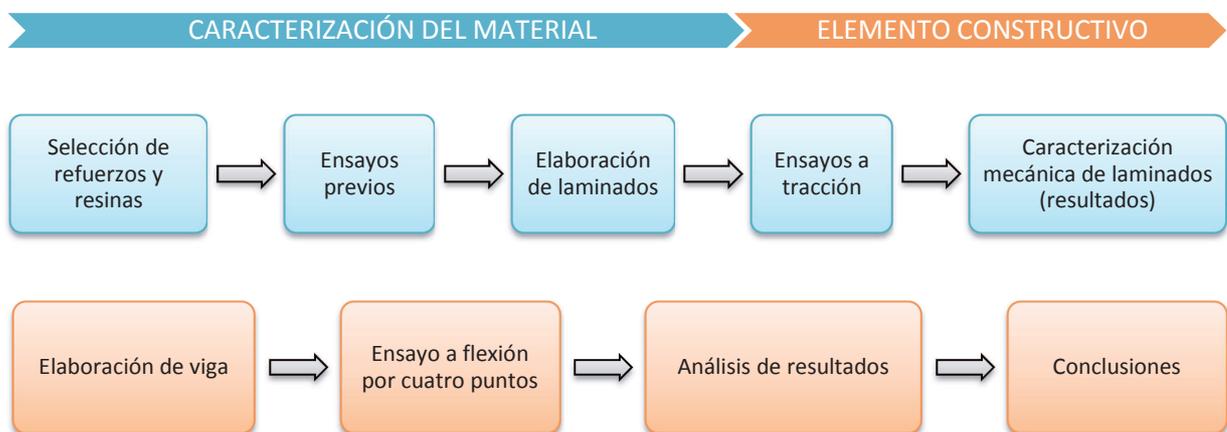
3.1 PROGRAMA

El programa experimental tiene como objetivo fundamental caracterizar mecánicamente los materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con fibra de vidrio y fibra de carbono (ensayados a tracción). Todo ello según la disposición y gramaje de las fibras de vidrio y la cantidad de fibra de carbono. Estos compuestos se obtendrán mediante un proceso de estratificación manual.

Simultáneamente se analizará el efecto que produce en estas probetas su temperatura de curado, realizándose un mismo tipo a temperatura ambiente, a 60°C y 90°C.

A partir de los resultados, se procederá a realizar una viga con los refuerzos que trabajen más eficazmente según las zonas y tensiones que experimenta ésta al someterla a un ensayo de flexión por cuatro puntos.

Para alcanzar los objetivos planteados, planificaremos en una serie de etapas:



1. **Selección de refuerzos y resinas.** En este proyecto se van a emplear dos resinas termoestables como matrices en la fabricación de los compuestos, resina epoxi y poliéster insaturado ortoftálico. Estas resinas se reforzarán con diferentes tejidos de fibra de vidrio tipo E y fibra de carbono.



2. **Ensayos previos.** Familiarizándonos con la manipulación de los materiales, analizando el tipo de fibra y orientación adecuada, dimensiones de probetas según norma UNE-EN ISO 527-4, dosificación de acelerante y catalizador sobre la resina de la matriz a utilizar, tiempos de curado y posibilidades de uso de la maquinaria y herramientas disponibles en el laboratorio de materiales.
3. **Elaboración de laminados** de material compuesto y obtención de probetas. La fabricación de los compuestos a estudiar se realizará mediante un proceso de estratificación manual, a partir de las resinas y refuerzos seleccionados en la primera etapa. Se alternarán sucesivamente las diferentes láminas que conformen estas probetas con la resina que corresponda, ajustada ya en ésta la cantidad adecuada de acelerante y catalizador, hasta conformar el material final. A continuación, se procederá al curado de los laminados, diferenciando entre temperatura ambiente, curado en horno a 60°C y a 90°C, durante 2 horas.
4. **Ensayos a tracción** de las probetas del programa experimental definitivo, tanto de las curadas en horno a 60°C y 90°C, durante 2 horas, como a temperatura ambiente durante 24 horas.
5. **Caracterización mecánica de los laminados**, realizando una revisión de las características físicas (comprobación de espesores y sección) posterior al curado del laminado y analizando los resultados obtenidos del ensayo a tracción, con la ayuda de gráficas tensión/deformación, comparando los valores obtenidos entre las probetas que así se halla previsto contrastar en el programa experimental.
6. **Elaboración de la viga.** La fabricación del elemento constructivo se realizará también mediante un proceso de estratificación manual, una vez caracterizado mecánicamente el material, a partir de las resinas y refuerzos ensayados en la etapa anterior que presenten mejores propiedades, seleccionando el material en función de los esfuerzos a los que se va a someter.
7. **Ensayo a flexión por 4 puntos**, comprobando la aplicación práctica sobre un elemento estructural del material caracterizado.



8. **Análisis de resultados.** Se valorarán los resultados del ensayo a flexión, examinando la información obtenida de la caracterización mecánica del material sobre un elemento constructivo, extrayendo si las conclusiones obtenidas de los ensayos a tracción son acertadas.
9. **Conclusiones.** Finalmente, se destacarán las conclusiones más importantes aprendidas tras la realización de este proyecto.

3.1.1 Programa experimental inicial

En un primer momento, en el programa experimental inicial (*ver tabla 3.1*) se contemplaban dos líneas de estudio:

1. Estudio y comparación de materiales compuestos atendiendo a la composición, dirección y gramaje de fibras; matriz utilizada (poliéster frente a epoxi) y temperaturas de curado (ambiente/60°C y 90°C durante 2 horas). Se numeran probetas del 1 al 3, especificando su composición y la matriz conglomerante de poliéster insaturado ortoftálico; y probetas del 4 al 6, de igual composición que las anteriores, utilizando esta vez una matriz de resina epoxi.
2. Estudio y comparación de materiales compuestos atendiendo a la composición, dirección y gramaje de fibras; temperaturas de curado (ambiente/60°C y 90°C durante 2 horas) y la influencia que tendría la introducción de filler calizo en porcentajes de 5, 10 y 20 % sobre la matriz de resina de poliéster insaturado ortoftálico. Se numeran probetas del 1 al 3, con distinta composición de fibras, programando una por cada porcentaje de filler a introducir sobre la matriz.

La nomenclatura utilizada para la composición de los laminados atiende a la siguiente tabla:

GLOSARIO COMPOSICIÓN DEL LAMINADO	
Plain	Tela Plain de fibra de vidrio con fibras direccionadas a 0° y 90°
Mat	Tela Mat de fibra de vidrio
Tejido_0/90	Tela Tejido de fibra de vidrio con fibras direccionadas a 0° y 90°
Carbon.uni_0	Tela Tejido Unidireccional de fibra de carbono direccionada a 0°

Tabla 3.2 Glosario composición del laminado

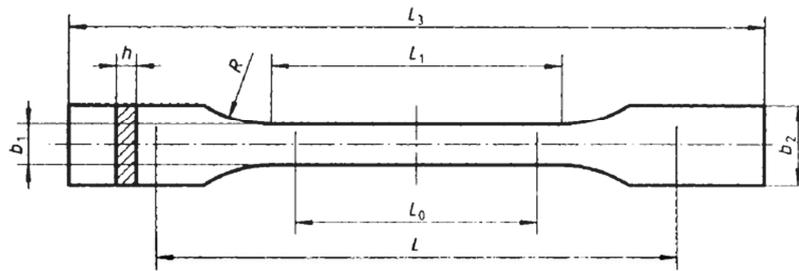


tipos	Característica del laminado	Fibras	Matriz	Curado		
				Ambiente	60 °C	90 °C
1	Plain_0/90 + Mat + Carbon.uni_0 + Mat + Velo_0/90	Vidrio E / Carbono	Poliester insaturado ortoftálico	Ambiente	60 °C	90 °C
2	Plain_0/90 + Mat + Tejido_0/90 + Mat + Velo_0/90	Vidrio E	Poliester insaturado ortoftálico	Ambiente	60 °C	90 °C
3	Plain_0/90 + Mat + Tejido_0/90 + Carbon.uni_90 + Tejido_0/90 + Mat + Plain_0/90	Vidrio E / Carbono	Poliester insaturado ortoftálico	Ambiente	60 °C	90 °C
4	Plain_0/90 + Mat + Carbon.uni_0 + Mat + Plain_0/90	Vidrio E / Carbono	Epoxi	Ambiente	60 °C	90 °C
5	Plain_0/90 + Mat + Tejido_0/90 + Mat + Plain_0/90	Vidrio E	Epoxi	Ambiente	60 °C	90 °C
6	Plain_0/90 + Mat + Tejido_0/90 + Carbon.uni_90 + Tejido_0/90 + Mat + Plain_0/90	Vidrio E / Carbono	Epoxi	Ambiente	60 °C	90 °C
11	Plain_0/90 + Mat + Carbon.uni_0 + Mat + Plain_0/90	Vidrio E / Carbono	Poliester insaturado ortoftálico +5% filler calizo	Ambiente	60 °C	90 °C
12	Plain_0/90 + Mat + Carbon.uni_0 + Mat + Plain_0/90	Vidrio E / Carbono	Poliester insaturado ortoftálico +10 % filler calizo	Ambiente	60 °C	90 °C
13	Plain_0/90 + Mat + Carbon.uni_0 + Mat + Plain_0/90	Vidrio E / Carbono	Poliester insaturado ortoftálico +20 % filler calizo	Ambiente	60 °C	90 °C
21	Plain_0/90 + Mat + Tejido_0/90 + Mat + Plain_0/90	Vidrio E	Poliester insaturado ortoftálico +5% filler calizo	Ambiente	60 °C	90 °C
22	Plain_0/90 + Mat + Tejido_0/90 + Mat + Plain_0/90	Vidrio E	Poliester insaturado ortoftálico +10% filler calizo	Ambiente	60 °C	90 °C
23	Plain_0/90 + Mat + Tejido_0/90 + Mat + Plain_0/90	Vidrio E	Poliester insaturado ortoftálico +20% filler calizo	Ambiente	60 °C	90 °C
31	Plain_0/90 + Mat + Tejido_0/90 + Carbon.uni_90 + Tejido_0/90 + Mat + Plain_0/90	Vidrio E / Carbono	Poliester insaturado ortoftálico +5% filler calizo	Ambiente	60 °C	90 °C
32	Plain_0/90 + Mat + Tejido_0/90 + Carbon.uni_90 + Tejido_0/90 + Mat + Plain_0/90	Vidrio E / Carbono	Poliester insaturado ortoftálico +10% filler calizo	Ambiente	60 °C	90 °C
33	Plain_0/90 + Mat + Tejido_0/90 + Carbon.uni_90 + Tejido_0/90 + Mat + Plain_0/90	Vidrio E / Carbono	Poliester insaturado ortoftálico +20% filler calizo	Ambiente	60 °C	90 °C

Tabla 3.1. Programa experimental inicial

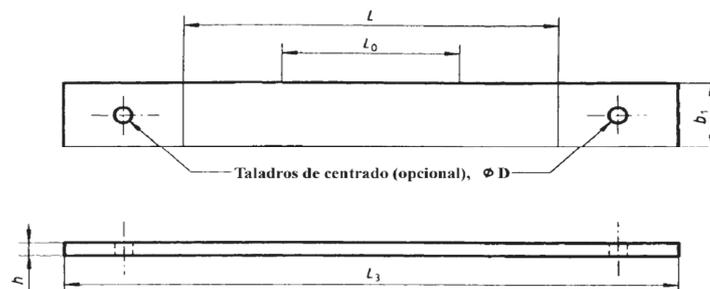


La norma UNE-EN ISO 527-4, plantea geometrías diferentes para una probeta a utilizar en ensayos a tracción (1B,2) con las características que este proyecto requiere, por lo que se programan ensayos previos para estudiar la correlación que pudiera existir entre ellas, así como solucionar cualquier inconveniente que pudiera aparecer una vez el estudio estuviera más avanzado. También se plantea intentar controlar la zona de rotura del compuesto a ensayar, por lo que creemos que el cuello de botella de la probeta 1B provocará la rotura por la parte central (sección más fina).



Medidas en milímetros		
L_3	Longitud total	$\geq 150^{1)}$
L_1	Longitud de la parte estrecha con bordes paralelos	$60 \pm 0,5$
R	Radio	$\geq 60^{2)}$
b_2	Anchura en los extremos	$20 \pm 0,2$
b_1	Anchura en la parte estrecha	$10 \pm 0,2$
h	Espesor	2 a 10
L_0	Longitud de referencia (recomendada para extensómetros)	$50 \pm 0,5$
L	Distancia inicial entre las mordazas	115 ± 1

Figura 3.1. Probeta tipo 1B según UNE-EN ISO 527-4



Medidas en milímetros			
		Tipo 2	Tipo 3
L_3	Longitud total	≥ 250	≥ 250
L_2	Distancia entre talones	—	150 ± 1
b_1	Anchura	$25 \pm 0,5$ ó $50 \pm 0,5$	$25 \pm 0,5$ ó $50 \pm 0,5$
h	Espesor	2 a 10	2 a 10
L_0	Longitud de referencia (recomendada para extensómetros)	50 ± 1	50 ± 1
L	Distancia inicial entre las mordazas	150 ± 1	136 (nominal)
L_T	longitud de los talones	—	≥ 50
h_T	Espesor de los talones	—	1 a 3
D	Diámetro de los taladros de centrado	$3 \pm 0,25$	$3 \pm 0,25$

Figura 3.2. Probeta tipo 2 según UNE-EN ISO 527-4



Realizados los ensayos previos, y ante los resultados obtenidos, se decide reformular el programa experimental inicial. La base de estos cambios es:

- La geometría y dimensiones de la probeta tipo 1B, aumentan la dificultad de fabricación de la misma, dando lugar a laminados mal terminados. También se extrae que no es posible controlar la rotura de los compuestos con los medios de fabricación que disponemos, así como la utilización de extensómetros durante el ensayo por falta de espacio. No obstante, sirve para analizar que los resultados de las probetas según norma UNE-EN ISO 527-4, no difieren en exceso.
 - Se decide realizar un solo tipo de probeta, por facilidad de corte, fabricación y ensayo, la tipo 2.

- Analizando las formas de rotura, se observa que rompe, por fragilidad, la totalidad del compuesto excepto las láminas de Plain, que corresponden a las exteriores del laminado, ya que según la información recabada previamente al inicio del proyecto, es un tipo de tejido de fibra de vidrio que se utiliza para mejorar el acabado superficial. Quedaba en el exterior de la probeta, por la delaminación de la resina, sin romperse, observándose el resto de láminas seccionadas.
 - Se decide situar en las capas exteriores las láminas de Mat, suponiendo que al situar el Plain en las zonas interiores, concentraremos las tensiones más cerca del núcleo del laminado.

- Extrayendo conclusiones, nos damos cuenta del gran número de comparaciones y estudio del material que se puede realizar siguiendo la primera línea de trabajo del programa experimental inicial. Además, se hacen pruebas con los diferentes porcentajes de filler en resina de poliéster, comprobando que la mezcla resultante no fluiría bien entre las fibras del refuerzo.
 - Se decide aumentar el número de muestras y composiciones a comparar. Previendo la falta de tiempo para un correcto estudio, y ante los resultados de la mezcla resultante (% filler + resina de poliéster), se elimina la parte del trabajo en cuanto a la influencia de los fillers calizos en una matriz de poliéster para materiales compuestos y se opta por la fabricación de un elemento constructivo, viga, aplicando coherentemente los resultados que se obtengan en la caracterización del material.



Los resultados que se obtengan de las diferentes pruebas realizadas durante los ensayos previos, con el fin de llevar a cabo una toma de datos clara y ordenada, servirán para completar la siguiente plantilla:

ENSAYOS PREVIOS									
TIPO	COMPOSICIÓN	MODELO	PROBETA	PESO TELA	PESO TOTAL	ESPESOR	SECCIÓN	KN	MPa
ENSAYOS PREVIOS	previo	Mat + Velo + Tejido_0/90 + Velo + Mat + Tejido_0/90 + Velo + Tejido_0/90 + Mat							
	previo	Mat + Tejido_0/90 Fino + Mat							
	1	Plain_0/90 + Mat + Tejido_0/90 Fino + Mat + Plain_0/90							
	2	Plain_0/90 + Mat + Tejido_0/90 + Mat + Plain_0/90							
	2*	Mat + Plain_0/90 + Tejido_0/90 + Plain_0/90 + Mat							

Tabla 3.3. Plantilla ensayos previos.

3.1.2 Programa experimental definitivo

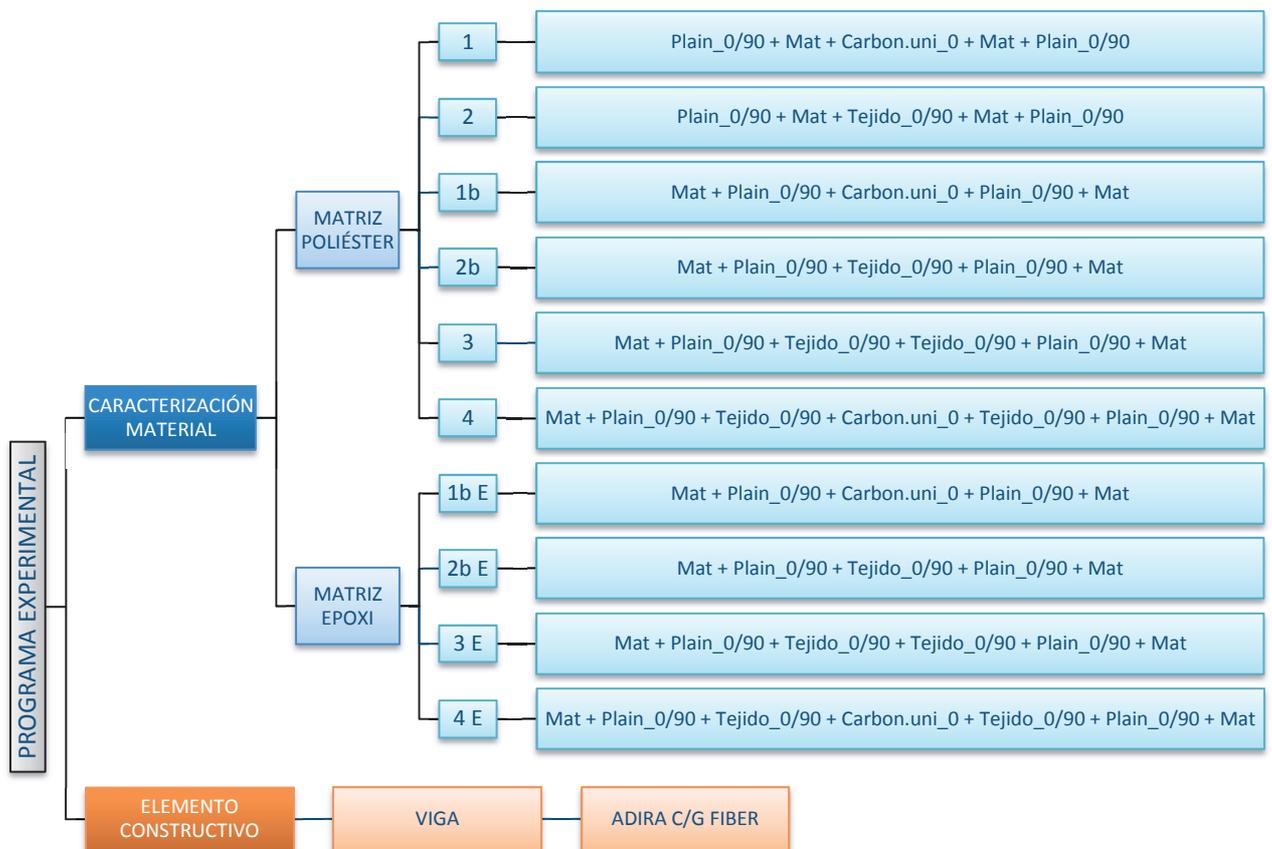


Figura 3.3 Esquema programa experimental definitivo



3.1.2.1 Caracterización del material

El programa experimental definitivo (*ver tabla 3.5*) contempla dos grupos en cuanto a la caracterización del material:

- Matriz de poliéster insaturado ortoftálico, en el que se diferencian los siguientes tipos de probetas:
 - **Tipo 1:** Plain_0/90 + Mat + Carbon.uni_0 + Mat + Plain_0/90
 - **Tipo 2:** Plain_0/90 + Mat + Tejido_0/90 + Mat + Plain_0/90
 - **Tipo 1b:** Mat + Plain_0/90 + Carbon.uni_0 + Plain_0/90 + Mat
 - **Tipo 2b:** Mat + Plain_0/90 + Tejido_0/90 + Plain_0/90 + Mat
 - **Tipo 3:** Mat + Plain_0/90 + Tejido_0/90 + Tejido_0/90 + Plain_0/90 + Mat
 - **Tipo 4:** Mat + Plain_0/90 + Tejido_0/90 + Carbon.uni_0+ Tejido_0/90 + Plain_0/90 + Mat

Con ésta elección de composiciones se pretende estudiar:

- La influencia de introducir una lámina de carbono, en sustitución de tejido de fibra de vidrio, en una matriz de resina de poliéster, comparando las probetas **1-2** y **1b-2b** respectivamente.
 - Los cambios producidos debido a la colocación del Plain_0/90 en las capas interiores, quedando el Mat como material superficial, en una matriz de resina de poliéster, comparando las probetas **1-1b** y **2-2b** respectivamente.
 - La influencia de introducir una lámina de carbono, además de las ya existentes, en una matriz de resina de poliéster, comparando las probetas **3** y **4**. Además, la comparación **1b-4**, nos indicará si por colocar más cantidad de fibras o láminas, el laminado soportará mayores esfuerzos.
- Matriz epoxi, en el que se diferencian los siguientes tipos de probetas:
 - **Tipo 1b-E:** Mat + Plain_0/90 + Carbon.uni_0 + Plain_0/90 + Mat
 - **Tipo 2b-E:** Mat + Plain_0/90 + Tejido_0/90 + Plain_0/90 + Mat
 - **Tipo 3-E:** Mat + Plain_0/90 + Tejido_0/90 + Tejido_0/90 + Plain_0/90 + Mat
 - **Tipo 4-E:** Mat + Plain_0/90 + Tejido_0/90 + Carbon.uni_0+ Tejido_0/90 + Plain_0/90 + Mat



Con ésta elección de composiciones y obtenidos los resultados de las probetas conformadas con resina de poliéster, se pretende analizar:

- La influencia de introducir una lámina de carbono, en sustitución de tejido de fibra de vidrio, en una matriz de resina epoxi, comparando las probetas y **1b-E** y **2b-E**.
- La influencia de introducir una lámina de carbono, además de las ya existentes, en una matriz de resina epoxi, comparando las probetas **3-E** y **4-E**. Además, la comparación entre **1b-E** y **4-E** nos indicará si por colocar más cantidad de fibras o láminas, el laminado soportará mayores esfuerzos.
- Las capacidades mecánicas de una matriz de resina epoxi frente a una de resina de poliéster, comparando los resultados obtenidos de las probetas **1b** y **1b-E, 2b y 2b-E, 3 y 3-E, 4 y 4-E** respectivamente.

También se analizará si se produce un aumento de las propiedades mecánicas distinguiendo entre tres tipos de curado para cada tipología de probeta.

TIPOS DE CURADO		
Curado ambiente	Curado en horno 60°C	Curado en horno 90°C
24 horas	2 horas	2 horas

Tabla 3.4. Tipos de curado

La máquina utilizada para el ensayo a tracción de las probetas será la IBERTEST modelo UIB600 con una capacidad de carga de 600 KN (*ver fotografía 4.14*). Para medir la deformación de los laminados durante el ensayo, se utilizará un captador ZEUS-50, con una longitud base de deformación de 50mm (*ver fotografía 4.15*).

Cada tipo de probeta, se realizará por partida doble, previniendo defectos de fabricación (mal acabado superficial, mala polimerización, excesos de resina, etc.) y fallos en los ensayos (imprevistos en la maquinaria, deslizamiento entre las mordazas, etc.), teniendo así la posibilidad de disponer de datos fiables en el transcurso del proyecto.



PROGRAMA EXPERIMENTAL									
Matriz	Tipos	Característica del laminado	Fibras	Curado					
				Ambiente		Horno 60		Horno 90	
POLIÉSTER INSATURADO ORTOFTÁLICO	1	Plain_0/90 + Mat + Carbon.uni_0 + Mat + Plain_0/90	Vidrio E / Carbono	1.1	1.2	1.1-60	1.2-60	1.1-90	1.2-90
	2	Plain_0/90 + Mat + Tejido_0/90 + Mat + Plain_0/90	Vidrio E	2,1	2.2	2.1-60	2.2-60	2.1-90	2.2-90
	1bis	Mat + Plain_0/90 + Carbon.uni_0 + Plain_0/90 + Mat	Vidrio E / Carbono	1b1	1b2	1b1-60	1b2-60	1b1-90	1b2-90
	2bis	Mat + Plain_0/90 + Tejido_0/90 + Plain_0/90 + Mat	Vidrio E	2b1	2b2	2b1-60	2b2-60	2b1-90	2b2-90
	3	Mat + Plain_0/90 + Tejido_0/90 + Tejido_0/90 + Plain_0/90 + Mat	Vidrio E	3.1	3.2	3.1-60	3.2-60	3.1-90	3.2-90
	4	Mat + Plain_0/90 + Tejido_0/90 + Carbon.uni_0 + Tejido_0/90 + Plain_0/90 + Mat	Vidrio E / Carbono	4.1	4.2	4.1-60	4.2-60	4.1-90	4.2-90
EPOXI	1bis-E	Mat + Plain_0/90 + Carbon.uni_0 + Plain_0/90 + Mat	Vidrio E / Carbono	1b1-E	1b2-E	1b1-E-60	1b2-E-60	1b1-E-90	1b2-E-90
	2bis-E	Mat + Plain_0/90 + Tejido_0/90 + Plain_0/90 + Mat	Vidrio E	2b1-E	2b2-E	2b1-E-60	2b2-E-60	2b1-E-90	2b2-E-90
	3-E	Mat + Plain_0/90 + Tejido_0/90 + Tejido_0/90 + Plain_0/90 + Mat	Vidrio E	3.1-E	3.2-E	3.1-E-60	3.2-E-60	3.1-E-90	3.2-E-90
	4-E	Mat + Plain_0/90 + Tejido_0/90 + Carbon.uni_0 + Tejido_0/90 + Plain_0/90 + Mat	Vidrio E / Carbono	4.1-E	4.2-E	4.1-E-60	4.2-E-60	4.1-E-90	4.2-E-90

Tabla 3.5. Programa experimental definitivo



Cabe decir que la norma UNE-EN ISO 527-1, insta al ensayo de un mínimo de 5 probetas, pero por motivos de tiempo, medios de fabricación y cantidad de material disponible, decidimos realizar dos muestras por tipología y tipo de curado.

Una vez resuelto el programa experimental definitivo y desglosadas las vías de estudio que nos posibilita, analizando las combinaciones de probetas a comparar que nos permite y las conclusiones que pretendemos extraer, el programa experimental definitivo quedaría reflejado como aparece en la tabla 3.5.

Para facilitar la toma de datos y planificar un control rutinario durante el proceso de elaboración y ensayos de los laminados compuestos, se crean las siguientes plantillas, diferenciando entre probetas para resina de poliéster (1) y probetas para resina epoxi (2), con el fin de ser completadas durante el transcurso del proyecto.

PROGRAMA EXPERIMENTAL												PROBETAS VIDRIO E/ CARBONO + RESINA DE POLIESTER INSATURADO ORTOFTÁLICO											
TIPO	COMPOSICIÓN	CURADO	PROBETA	PESO TELA	PESO TOTAL	% FIBRAS	L entre mordazas (mm)	ESPESOR	SECCIÓN	KN	MPa												
1	Plain_0/90 + Mat + Carbon.uni_0 + Mat + Plain_0/90	AMB.																					
		60°																					
		90°																					
		AMB.																					
		60°																					
		90°																					
		AMB.																					
		60°																					
		90°																					
1bis	Mat + Plain_0/90 + Carbon.uni_0 + Plain_0/90 + Mat	AMB.																					
		60°																					
		90°																					
		AMB.																					
		60°																					
		90°																					
		AMB.																					
		60°																					
		90°																					
2bis	Mat + Plain_0/90 + Tejido_0/90 + Plain_0/90 + Mat	AMB.																					
		60°																					
		90°																					
		AMB.																					
		60°																					
		90°																					
		AMB.																					
		60°																					
		90°																					
3	Mat + Plain_0/90 + Tejido_0/90 + Tejido_0/90 + Plain_0/90 + Mat	AMB.																					
		60°																					
		90°																					
		AMB.																					
		60°																					
		90°																					
		AMB.																					
		60°																					
		90°																					
4	Mat + Plain_0/90 + Tejido_0/90 + Carbon.uni_0 + Tejido_0/90 + Plain_0/90 + Mat	AMB.																					
		60°																					
		90°																					
		AMB.																					
		60°																					
		90°																					
		AMB.																					
		60°																					
		90°																					

Tabla 3.6. Plantilla probetas resina de poliéster (1)



PROGRAMA EXPERIMENTAL												PROBETAS VIDRIO E/ CARBONO + RESINA EPOXI												
TIPO	COMPOSICIÓN	CURADO	PROBETA	PESO TELA	PESO TOTAL	% FIBRAS	L entre mordazas (mm)	ESPESOR	SECCIÓN	KN	MPa													
1bis-E	Mat + Plain_0/90 + Carbon.uni_0 + Plain_0/90 + Mat	AMB.																						
		60°																						
		90°																						
		AMB.																						
		60°																						
		90°																						
		AMB.																						
		60°																						
		90°																						
3-E	Mat + Plain_0/90 + Tejido_0/90 + Tejido_0/90 + Plain_0/90 + Mat	AMB.																						
		60°																						
		90°																						
		AMB.																						
		60°																						
		90°																						
		AMB.																						
		60°																						
		90°																						
4-E	Mat + Plain_0/90 + Tejido_0/90 + Carbon.uni_0 + Tejido_0/90 + Plain_0/90 + Mat	AMB.																						
		60°																						
		90°																						
		AMB.																						
		60°																						
		90°																						
		AMB.																						
		60°																						
		90°																						

Tabla 3.7. Plantilla probetas resina epoxi (2)

Además, una vez finalizados los ensayos, se realizará una ficha técnica por cada tipología de probeta, llevando a cabo un registro, que responderá al siguiente diseño:



FICHA PROBETAS PROGRAMA EXPERIMENTAL						TIPO
COMPONENTES		MATRIZ		COMPOSICIÓN		
CURADO	PROBETA	ESPELOR	SECCIÓN	L mordazas (mm)	KN	MPa
AMB.						
60°						
90°						

FOTOGRAFIA:

LEYENDA:

CURADO	PROBETA	PESO TELA	PESO TOTAL	% FIBRAS	Fv (Mpa)	Fs
AMB.						
60°						
90°						

OBSERVACIONES:

Tabla 3.8. Plantilla ficha para registro de probetas



3.1.2.2 Elemento constructivo

Finalizada la caracterización del material, y analizados los resultados, se extraerán las conclusiones pertinentes para elaborar una viga, ADIRA C/G FIBER, estudiando que refuerzo de los ensayados es el más apropiado para las tensiones a la que se va a someter el elemento constructivo, según zonas, durante el ensayo a flexión con 4 puntos.

El problema que se presenta a la hora de elaborar la viga por el método de contacto a mano, es que no se dispone de un molde continuo que permita elaborar la viga de una sola pieza, por lo que se opta por la utilización de un perfil pultrusionado, de dimensiones inferiores, laminando dos módulos idénticos para su posterior unión central, como se detalla en el apartado 4 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL, obteniendo así, una base de una sola pieza sobre la que comenzar a laminar los refuerzos escogidos a partir de los ensayos realizados durante la caracterización del material.



Figura 3.4. Perfil pultrusionado. Molde de la viga

La laminación de dichos módulos se realizará con una capa de Mat de fibra de vidrio. Una vez unidos entre sí, obteniendo una base firme, se colocará una segunda capa de Mat de fibra de vidrio, con el fin de otorgar un mínimo de inercia, sobre el que realizar presión a la hora de colocar las posteriores capas.

Realizada la base sobre la que empezaremos la construcción de la viga, se situarán rigidizadores en los puntos de apoyo y de aplicación de cargas, así como en el punto medio apoyo-carga, siendo un total de 6 rigidizadores.



La composición del laminado de la viga según zonas de esfuerzo, atenderá al siguiente esquema gráfico:

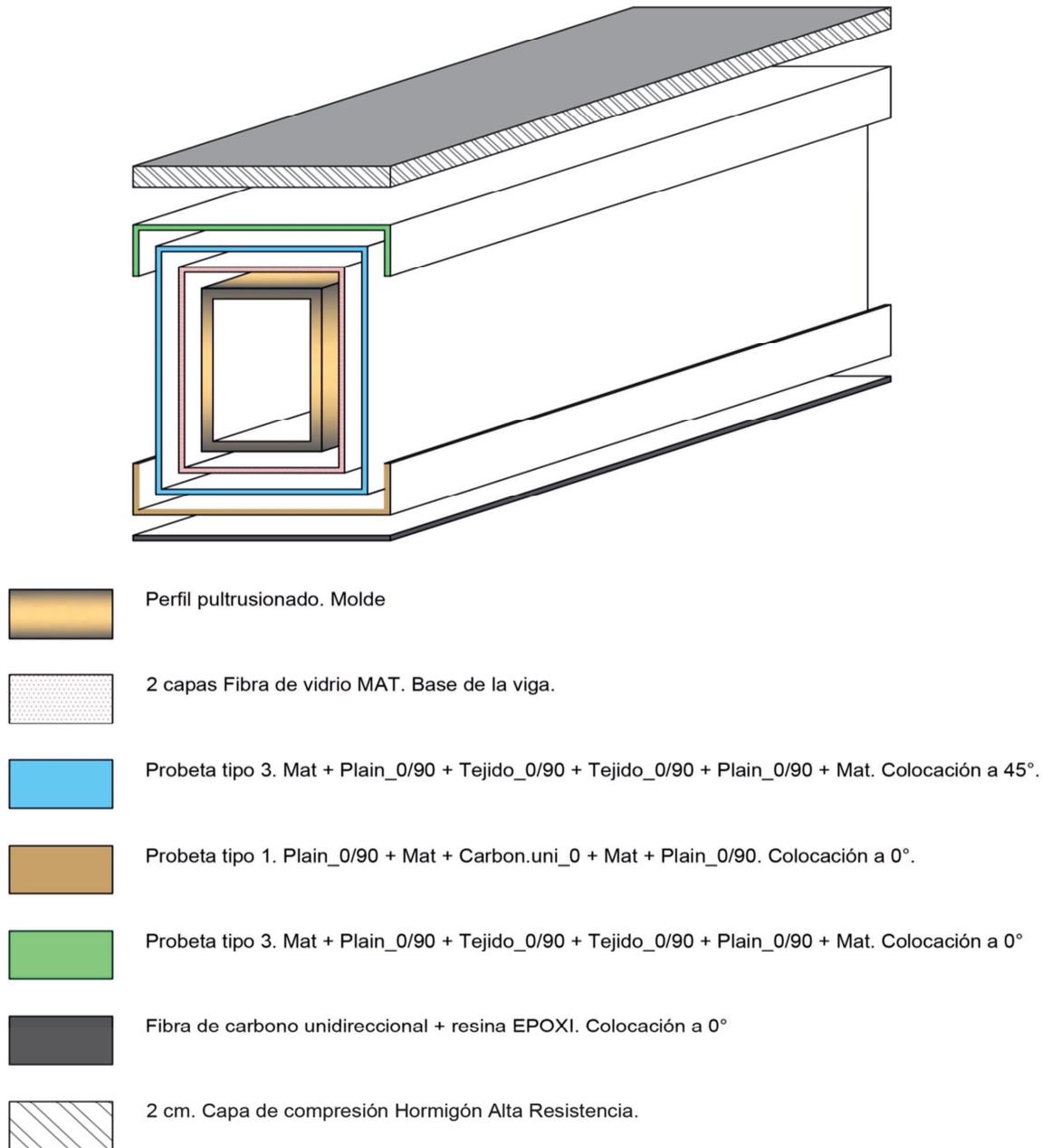


Figura 3.5. Composición del laminado de la viga

El elemento constructivo contará con una capa de compresión de 2cm de espesor de hormigón de alta resistencia (ultra-high) con fibras metálicas, facilitando su adhesión al laminado mediante conectores.



Durante el proceso de hormigonado de la capa de compresión, se hormigonarán probetas, 4 para rotura a compresión y 2 para rotura a flexión, y se programarán ensayos a diferentes días de curado para su rotura y extracción de conclusiones, según la Tabla 3.9.

Ensayo	TIEMPO DE CURADO			Σ/n
	1 DÍA	3 DÍAS	6 DÍAS	
Compresión Fc.				
Flexión Fflex.				

Tabla 3.9. Plantilla para ensayo de resistencia probetas de hormigón

Una vez finalizada la construcción de la viga, se someterá al ensayo a flexión por cuatro puntos, de tal forma que cumpla las medidas establecidas en la Figura 3.6.

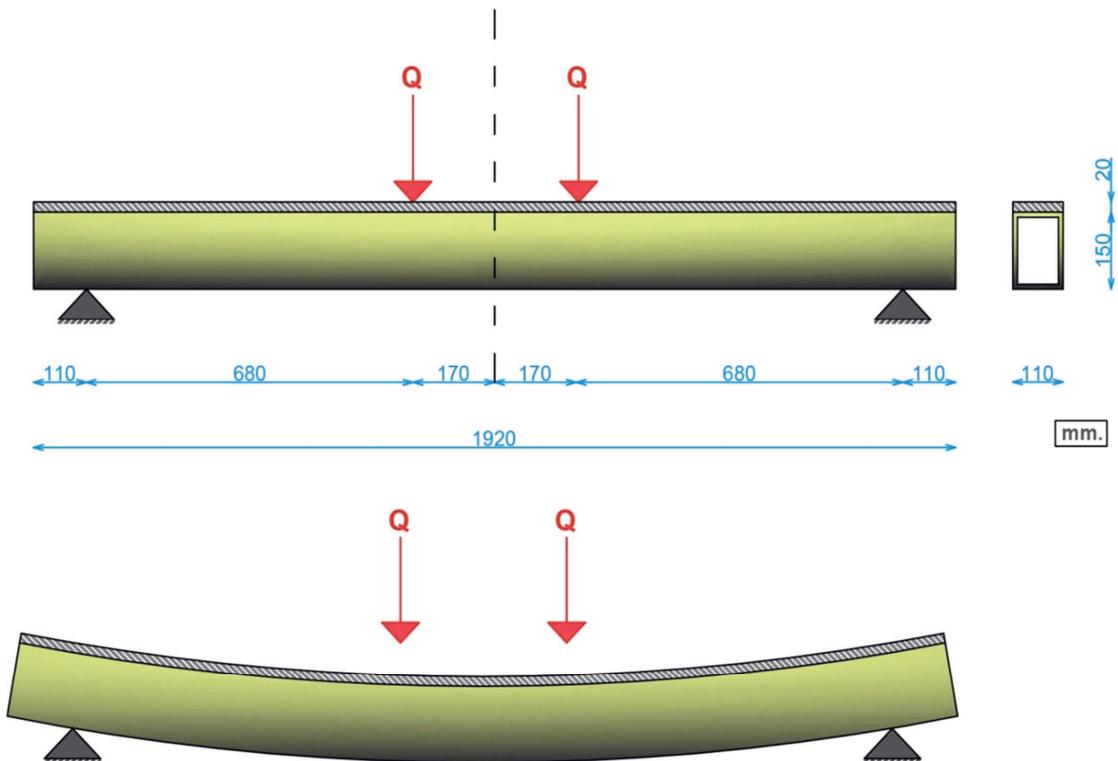


Figura 3.6. Ensayo a flexión por cuatro puntos



La máquina utilizada para el ensayo es la IBERTEST PEF-150-HDA, con una capacidad de carga de 150 KN.

Realizado el ensayo, se analizarán los resultados obtenidos, extrayendo las conclusiones necesarias en cuanto a la aplicación práctica del material caracterizado sobre un elemento estructural.



4. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL



4. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

La fabricación de los laminados compuestos que se han realizado en este proyecto ha sido mediante la técnica de moldeo por contacto a mano, “hand lay-up”, que supondrá que el material realizado presente unas propiedades mecánicas inferiores a las obtenidas por otras técnicas más mecanizadas (preimpregnados, proyección simultánea, pultrusión, prensa, etc.), debido a que el acabado superficial será irregular, tendrá una mayor porosidad y, aunque se intente eliminar el burbujeo que se produce durante el impregnado, difícilmente es evitable extraer la totalidad del aire ocluido. La relación resina/fibra, así como un resultado de espesores homogéneos, serán factores a tener en cuenta también. Sin embargo, presenta gran sencillez de fabricación y de instrumental necesario para realizarlos, consiguiendo una reducción del coste final.

Generalmente, las fases de elaboración de los compuestos por contacto a mano constan de las siguientes etapas:

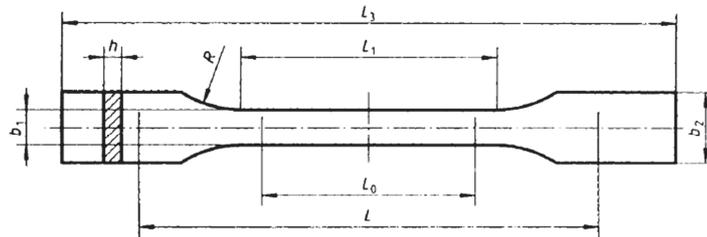


Antes de proceder a cualquier paso en la elaboración de los laminados, es necesario conocer y estudiar a qué ensayos se someterán, con el fin de establecer dimensiones normalizadas. Los compuestos serán sometidos a ensayos de tracción, por lo tanto, la Norma UNE-EN ISO 527, nos diferencia entre tres tipos de probetas: tipo 1B (*ver figura 4.1*), tipo 2 (*ver figura 4.2*) y 3.

En base a las características de nuestro programa experimental, las probetas idóneas para realizar los ensayos serán las tipo 2. El tipo 1B se aplica en ensayos de termoplásticos reforzados con fibras y pueden también ser utilizadas para termoestables reforzados con fibras. Por otra parte, no debe ser utilizado en materiales multidireccionales reforzados con



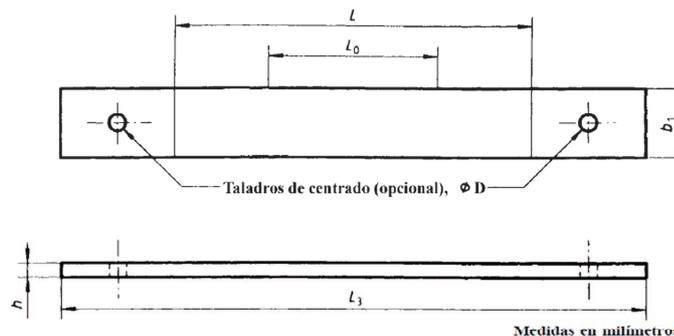
fibras continuas, por lo que se realizarán ensayos previos, analizando y comparando resultados.



Medidas en milímetros		
L_3	Longitud total	$\geq 150^{D1}$
L_1	Longitud de la parte estrecha con bordes paralelos	$60 \pm 0,5$
R	Radio	$\geq 60^{D2}$
b_2	Anchura en los extremos	$20 \pm 0,2$
b_1	Anchura en la parte estrecha	$10 \pm 0,2$
h	Espesor	2 a 10
L_0	Longitud de referencia (recomendada para extensómetros)	$50 \pm 0,5$
L	Distancia inicial entre las mordazas	115 ± 1

Figura 4.1. Probeta tipo 1B según UNE-EN ISO 527

Las probetas tipo 2 (rectangulares sin talones) son para el ensayo de termoplásticos y termoestables reforzados con fibras. La anchura recomendada de las probetas de este tipo es 25mm, aunque pueden utilizarse anchuras de 50mm o más si la resistencia a la tracción es baja, debido al tipo particular de refuerzo utilizado. Su espesor estará comprendido entre 2mm y 10mm.



Medidas en milímetros		
	Tipo 2	Tipo 3
L_3	Longitud total	≥ 250
L_2	Distancia entre talones	150 ± 1
b_1	Anchura	$25 \pm 0,5$ ó $50 \pm 0,5$
h	Espesor	2 a 10
L_0	Longitud de referencia (recomendada para extensómetros)	50 ± 1
L	Distancia inicial entre las mordazas	150 ± 1
L_T	longitud de los talones	136 (nominal)
h_T	Espesor de los talones	≥ 50
D	Diámetro de los taladros de centrado	1 a 3
		$3 \pm 0,25$

NOTA – Los requisitos de calidad y paralelismo de la probeta se dan en el capítulo 6.

Figura 4.2. Probeta tipo 2 según UNE-EN ISO 527



4.1 MATERIALES

A continuación se exponen los materiales utilizados, las dosificaciones estudiadas y la metodología llevada a cabo para las fases de fabricación y ensayos.

4.1.1 Resina de poliéster

El tipo de resina utilizado en este trabajo es una resina de poliéster insaturado orto-ftálico, acelerada y tixotrópada (UP), basada en ácido orto-ftálico y glicoles estándar, disuelta en estireno CLASE 3 G.E. La resina, ha sido proporcionada por José Antonio García, Suministros Generales de Pinturas (*ver fotografía 4.1*). Viene preacelerada y con agentes tixotrópicos, presentando reactividad media y baja viscosidad.



Fotografía 4.1. Resina de poliéster



Fotografía 4.2. Catalizador

El catalizador procederá también del mismo fabricante y consistirá en un peróxido de metilo etilo acetona.

La dosificación del poliéster orto-ftálico y el catalizador será la siguiente:

RESINA POLIÉSTER	CATALIZADOR
100 gramos	3 gramos

Tabla 4.1. Dosificación de resina poliéster insaturada orto-ftálica



La resina presenta un color azul, que una vez mezclada con el catalizador comienza a oscurecer, indicando que ha adquirido las propiedades necesarias para ser utilizada correctamente. La mezcla de ambas se realizará manualmente con una cuchara aproximadamente durante un minuto, para conseguir una homogeneidad entre ambas.

La vida útil de ésta mezcla es muy limitada, apenas tarda unos minutos en comenzar a gelificar, por lo que habrá que tener presente la cantidad exacta necesaria que se va a utilizar y aplicarse rápidamente sobre la fibra.

CONDICIONES DE ALMACENAMIENTO DE LAS RESINAS DE POLIÉSTER

Deberá prestarse especial atención a las condiciones de almacenamiento de estos productos por razones de seguridad debido a su inestabilidad y a que son inflamables y tóxicas.

Para mantener la vida útil es necesario almacenarlas en locales cuya temperatura no exceda los 25°C.

Cada referencia comercial tiene un periodo de almacenamiento determinado, a partir del cual, las características de las resinas varían sensiblemente y en la mayoría de los casos, este periodo alcanza un máximo de seis meses en las condiciones normales de almacenamiento. Después de este tiempo, la resina alcanza un estado de gel incluso en las condiciones de almacenamiento recomendadas.

Las indicaciones mínimas son las siguientes:

- Mantener los recipientes cerrados, sobre todo para evitar la evaporación del monómero en el que están disueltas (estireno en la mayoría de los casos).
- Conservar en ambientes frescos (por debajo de los 25°C).
- Protegidos de la luz.

Por lo tanto, será siempre necesario conocer el tiempo de vida útil recomendado por el suministrador, variable para cada referencia, y utilizar la resina antes de la finalización del mismo. Es aconsejable verificar el tiempo de gel de la resina



en stock periódicamente, así como su viscosidad, por si la resina se ve afectada por factores incontrolados.

CONDICIONES DE UTILIZACIÓN

Para la preparación de las mezclas de resinas, aceleradores, catalizadores, etc., es suficiente con observar algunas precauciones:

- Orden de introducción de los diferentes constituyentes, hay que introducir el acelerador (en nuestro caso ya lo lleva incorporado) y homogeneizar la mezcla, a continuación las cargas volviendo a homogeneizar, introduciendo y homogeneizando por último el catalizador.
- Protección de ojos y manos, con gafas y guantes de seguridad adecuados así como la utilización de mascarillas con los filtros adecuados.



Fotografía 4.3. Mascarilla



Fotografía 4.4. Guantes de protección

- Ventilación suficiente, al preparar grandes cantidades, y en caso de aplicación a grandes superficies, donde la evaporación del monómero será importante.
- Recipientes para el catalizador, utilizando recipientes de acero inoxidable, polietileno, aluminio puro, vidrio o porcelana para almacenar los catalizadores peroxídicos. No hay que devolver al recipiente original el peróxido no utilizado.
- La limpieza es un parámetro importante de la seguridad, pero teniendo en cuenta que los disolventes utilizados para la misma (sobre todo acetona) son extremadamente volátiles, inflamables y explosivos. Hay que evitar utilizar



cantidades excesivas y, sobre todo, efectuar la limpieza lejos de todo foco de calor o fuego.

- Material de dosificación: no hay que utilizar jamás el mismo útil para la dosificación de catalizador y activador. En caso de medir el catalizador por volumetría, no “pipetear” nunca con la boca.

4.1.2 Resina epoxi

Se trata de un sistema formado por una resina Araldit LY 3505 y un catalizador Aradur 3405 fabricado por Huntsmann Advanced Materials GmbH.

Sus características según fabricante son:

	RESINA ARALDIT LY3505	CATALIZADOR ARADUR 3405
Viscosidad a 25°C.(mPa s)	6500-8000	70-90
Densidad a 25°C (g/cm ³)	1,15-1,20	0,95-1,0
T ^º Almacenamiento (°C)	2-40	2-40

Tabla 4.2. Características resina epoxi



Fotografía 4.5. Resina epoxi

La dosificación de la resina epoxi y su catalizador será la siguiente:

RESINA EPOXI	CATALIZADOR
100 gramos	50 gramos

Tabla 4.3. Dosificación resina epoxi



4.1.3 Fibra de vidrio

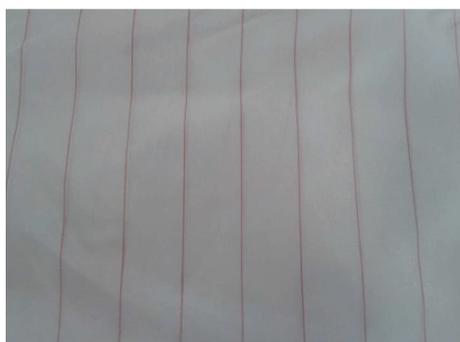
En las probetas realizadas en este proyecto se han empleado como refuerzo tres tipos diferentes de disposiciones de tejido de fibra de vidrio E:

- El primero es un **PLAIN** con orientación 0/90° (ver fotografía 4.6 y 4.7).
- El segundo es un **TEJIDO 0/90°** gruesa (ver fotografía 4.8 y 4.9), llamado también tafetán (TF), en la que se entrecruzan la trama con la urdimbre según una secuencia 1:1.
- El último es un **MAT** (ver fotografía 4.10 y 4.11), en el que las fibras cortas que lo forman se presentan con orientación aleatoria.

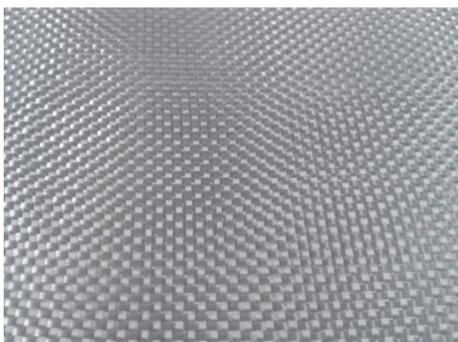
Todas las láminas de este material serán manipuladas con tijeras, y debido a la vida útil limitada de la resina, se tendrán ya organizados todos los tipos de probetas a realizar en ese momento, con su orden correspondiente de láminas según indique el programa experimental.

Características	Tejido (tafetán)	Plain	Mat
Gramaje (g/m ²)	300 g/m ²	300 g/m ²	300 g/m ²
Orientación (°)	0/90°	0/90°	Aleatoria
Mazo de fibras (Entrecruzado)	Sí; 1:1	No	No
Reparto de fibras	Equilibrado 50:50	Equilibrado 50:50	Aleatorio

Tabla 4.4. Características del tejido de refuerzo



Fotografía 4.6 y 4.7. Fibra de vidrio E- PLAIN



Fotografía 4.8 y 4.9. Fibra de vidrio E- TEJIDO 0_90°



Fotografía 4.10 y 4.11. Fibra de vidrio E- MAT

Propiedad	Unidades
Diámetro hilo	10-20 μm
Densidad	2540 kg/m^3
Módulo de elasticidad	72,5 GPa
Resistencia a tracción	3,5 GPa
Módulo específico	28 -
Coefficiente de expansión térmica	5 $10^{-6}/^{\circ}\text{K}$

Tabla 4.5. Propiedades de la fibra de vidrio tipo E

Todas las fibras han sido proporcionadas por José Antonio García, Suministros Generales de Pinturas.

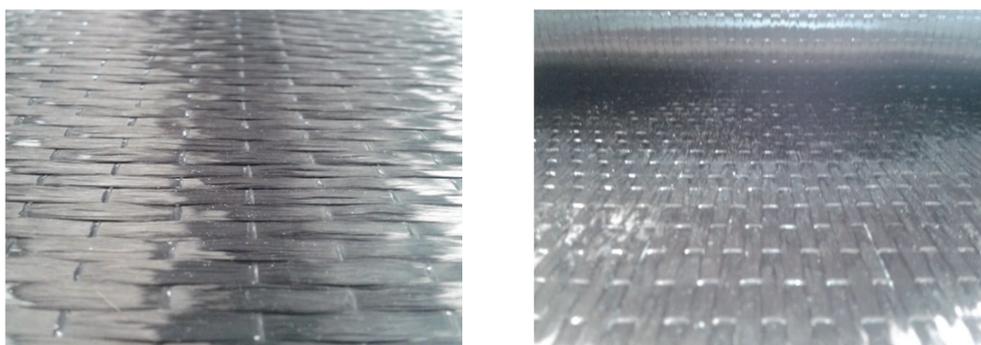


4.1.4 Fibra de carbono

La fibra de carbono utilizada se presenta en formato unidireccional (UD), con las fibras orientadas en una sola dirección (*ver fotografía 4.12 y 4.13*).

Las principales propiedades que presenta son:

- Tiene la mayor resistencia específica de las fibras disponibles en el mercado
- Una alta resistencia a tensión y compresión
- Una alta resistencia a la corrosión y fatiga.
- Resistencia al impacto es menor que la fibra de vidrio



Fotografía 4.12 y 4.13. Fibra de carbono

Al igual que las fibras de vidrio, han sido manipuladas con tijeras, y debido a la vida útil limitada de la resina, se tendrán ya organizadas todos los tipos de probetas a realizar en ese momento.

Se trata del producto SikaWrap®-230 C suministrado por la casa Sika con una densidad de fibras de 1.8 g/cm^3 .

4.1.5 Máquina ensayos a tracción

La máquina utilizada para el ensayo a tracción de las probetas será la IBERTEST modelo UIB600 con una capacidad de carga de 600 KN (*ver fotografía 4.14*). Para medir la deformación de los laminados durante el ensayo, se utilizará un captador ZEUS-50, con una longitud base de deformación de 50mm (*ver fotografía 4.15*).



La otra máquina utilizada para ensayar las probetas será la IBERTEST modelo STIB-200W (ver fotografía 4.16).



Fotografía 4.14. Maquinaria ensayo tracción Fotografía 4.15. Captador de deformación



Fotografía 4.16. Maquinaria ensayo tracción



4.1.6 Molde viga

El molde utilizado para fabricar la viga será un perfil pultrusionado, de dimensiones 110x150x800 mm (ver fotografía 4.17).

Se utilizará como encofrado para el proceso de laminado de las fibras.



Fotografía 4.17. Molde pultrusionado



Fotografía 4.18. Sección molde pultrusionado

4.1.7 Máquina ensayos a flexión

La máquina utilizada para el ensayo a flexión con 4 puntos de la viga es la IBERTEST PEF-150-HDA, con una capacidad de carga de 150 KN.



Fotografía 4.19 y 4.20. Maquinaria ensayo flexión



4.2 Proceso de fabricación de probetas para ensayos previos

4.2.1 Preparación del molde

Para la realización de laminados compuestos, no disponemos de un molde como tal, sino que se colocarán unos tablones de madera que actuarán como base para regular y homogeneizar las probetas y evitar la pérdida de planeidad que se produce en la retracción causada por la reacción exotérmica en el curado de la resina.

Entre ellas se colocarán unos plásticos separadores para evitar que los laminados se adhieran a las maderas.



Fotografía 4.21. Tablones de madera

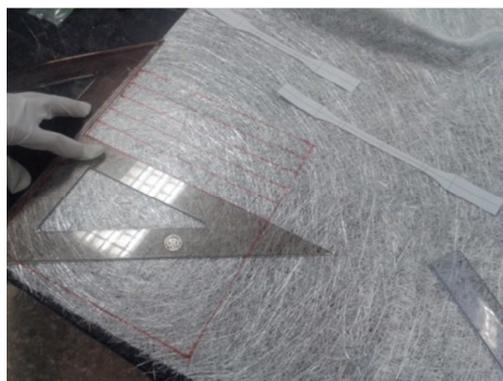
4.2.2 Preparación del refuerzo

Tras seleccionar las fibras a utilizar en el laminado, se dibuja con ayuda de una plantilla las dimensiones normalizadas establecidas para la probeta, tantas como vayamos a utilizar, se recortan y se ordenan según tipos.

A la hora de dibujar sobre las láminas el contorno de las probetas, se optimizará al máximo el espacio para evitar la pérdida innecesaria de material (*ver fotografía 4.23*).



Fotografía 4.22. Refuerzos seleccionados



Fotografía 4.23. Dibujo probetas

Se repetirá el proceso con todos los tipos de refuerzo que vayan a formar parte del laminado, para disponer de todos ellos cortados y preparados antes de aplicar la resina, pues la operación de estratificación debe hacerse de forma continua, teniendo en cuenta el corto periodo de tiempo que se dispone una vez iniciado el proceso de polimerización del polímero. Además se tendrán ya organizados los tipos de probetas a realizar en ese momento (ver *fotografía 4.25*), con su orden correspondiente de láminas según indique el programa experimental.



Fotografía 4.24. Refuerzos recortados



Fotografía 4.25. Organización probetas

Antes de comenzar la impregnación del laminado, se pesarán individualmente las diferentes probetas, acción que se repetirá posteriormente al curado y endurecimiento de la muestra, controlando así la cantidad de resina que se utiliza en cada una y poder mantener las mismas proporciones en cada laminado.



El peso de las fibras se realizará con una balanza electrónica (*ver fotografía 4.26*), que presenta gran precisión, debido a las cifras tan pequeñas en las que se maneja el peso de las fibras.



Fotografía 4.26. Peso probetas con balanza electrónica

4.2.3 Preparación de la resina

La resina de poliéster utilizada en este proyecto lleva ya incorporado el acelerador, por lo que sólo habrá que añadir el catalizador para poder iniciar el moldeo. Esta fase requiere gran exactitud y precisión, pues de la correcta dosificación dependerá que la resina adquiera las propiedades y resistencia adecuada. Para ello utilizaremos, al igual que para pesar las fibras, una balanza electrónica y se cuidará en todo momento la limpieza.

RESINA POLIÉSTER	CATALIZADOR
100 gramos	3 gramos

Tabla 4.6. Dosificación de resina poliéster insaturada ortoftálica

La mezcla de ambas se realizará manualmente con una cuchara aproximadamente durante un minuto, para conseguir una homogeneidad entre ambas.

La resina utilizada es de un color azul (*ver fotografía 4.27*), que nos servirá de referencia, ya que cuando comience a oscurecer y adquirir un tono marrón por la incorporación del catalizador, nos indicará que está lista para su uso (*ver fotografía 4.28*).



Fotografía 4.27. Poliéster sin catalizador



Fotografía 4.28. Poliéster catalizado

Debido a su limitada trabajabilidad, se prepara en cada momento la cantidad exacta y necesaria que se vaya a utilizar, pues una vez ha sido catalizada, su estado líquido hasta que comienza a gelificar es muy corto y deberá aplicarse rápidamente sobre la fibra. Por tanto, se pretende evitar que la resina comience a gelificar antes de haber completado la totalidad del laminado. Si ocurriera esto, sería imposible seguir impregnando las fibras y habría que volver a realizar la resina, teniendo que desechar la gelificada.

4.2.4 Realización del estratificado

Antes de comenzar a colocar las láminas de fibra, se aplicará, con ayuda de un rodillo, una capa de resina sobre el plástico separador donde las colocaremos (*ver fotografía 4.29*), para favorecer la impregnación de la primera capa y crear un remanente de resina en la superficie, que ayudará a fijar e impregnar las siguientes capas de refuerzo que introduzcamos.

Para la correcta elaboración e impregnación de estos compuestos laminados se deberán seguir tres etapas:

1. “Humectación a través”, asegurando que la resina pase de un lado al otro de la lámina cubriendo totalmente las dos caras del mismo.
2. “Consolidación”, consistente en la eliminación del aire, gracias a la acción del rodillo, y disolviendo el agente de unión. Esta es la fase más importante de las tres, puesto que depende directamente de cómo se realice manualmente.

3. “Humectación total”, asegurando que la fibra se “moja” con la resina volviéndose casi transparente, caracterizada por una pérdida del color característico blanco del vidrio.



Fotografía 4.29. Capa resina sobre plástico



Fotografía 4.30. Incorporación resina



Fotografía 4.31. Colocación láminas



Fotografía 4.32. Impregnación con rodillo

Una vez colocada la primera lámina sobre la capa de resina, se pasará el rodillo por encima tantas veces como sea necesario para conseguir una correcta adaptación y desburbujeo, así como con ayuda de pinceles de punta para que penetre bien la resina y se compacte. Este paso es muy importante, pues si quedan burbujas en el interior del laminado se pueden originar defectos superficiales muy fácilmente.



Se continuará colocando la segunda capa y realizando de nuevo los pasos descritos anteriormente, y así sucesivamente se irán superponiendo las distintas láminas de fibra cortadas con la forma y dimensiones normalizadas, hasta elaborar la probeta deseada.

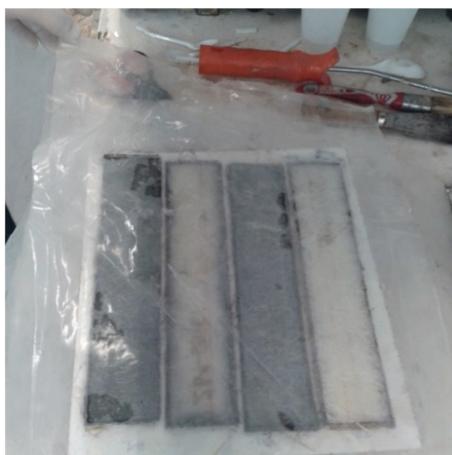
La impregnación de una capa sobre la anterior debe hacerse sin que haya endurecido, para asegurar la correcta adherencia entre ellas y evitar así una posible delaminación. Por lo tanto, en el momento que la resina comience a gelificar en su recipiente tampoco podrá aplicarse sobre las láminas, pues podría ocasionar vacíos entre las capas o inclusiones de aire que quedarían dentro del laminado.

Una vez finalizada la impregnación de las fibras, deben limpiarse todas las herramientas utilizadas antes de que endurezca la resina.

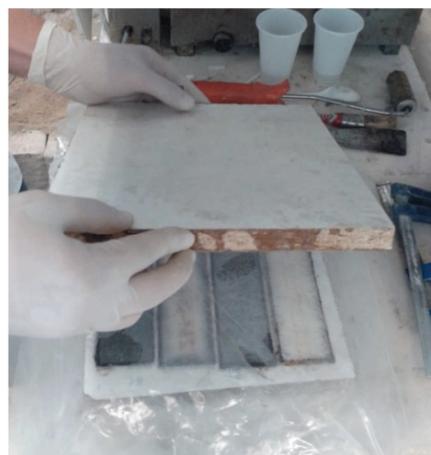
4.2.5 Endurecimiento

Terminado el laminado del material compuesto, colocaremos otro plástico idéntico al situado en la parte inferior, y sobre él, otra tabla de madera con la intención de conseguir “prensar” la probeta y repartir uniformemente la resina utilizada en ella.

Además se incorporarán cuatro gatos presionando ambas maderas para garantizar la homogeneización y consiguiendo extraer el exceso de resina, que gracias a la presión ejercida, rebosará por el borde de las tablas.



Fotografía 4.33. Plásticos entre el molde



Fotografía 4.34. Molde



Fotografía 4.35. Molde con incorporación de gatos

Es necesario dejar un tiempo variable (entre 45 minutos y varias horas) según el tipo de resina utilizado, condiciones de curado, temperatura, tamaño de la pieza, rigidez de la misma, etc. antes de proceder a desmoldar la pieza.

En el caso de los ensayos previos sólo se realizaron a temperatura ambiente, por lo que las probetas se dejaron aproximadamente 24 horas en éste “encofrado”.

4.2.6 Desmoldeo

Cuando el proceso de polimerización haya finalizado, o el endurecimiento de la pieza sea suficiente, se puede proceder a su desmolde (*ver fotografía 4.36*), sin causar daños a las probetas.



Fotografía 4.36. Desmolde

Se retirarán los gatos y los tablonces de madera, y con cuidado se separarán del plástico los laminados.



4.2.7 Desbardado de la pieza

Una vez desmoldada la pieza, se observará que el material presenta un exceso de resina en los bordes y que será necesario eliminar para poder medir correctamente la sección y espesor de la pieza, datos necesarios para futuros cálculos.

La eliminación de este material sobrante estratificado puede llevarse a cabo cuando la pieza no está suficientemente dura y no ha llegado a su polimerización total, siendo así más fácil de cortar que cuando está completamente endurecida.

Esta operación se realizará con tijeras (*ver fotografía 4.37*), ya que la resina sin refuerzo, no ofrece resistencia a cortante alguna.



Fotografía 4.37. Desbardado de probetas



Fotografía 4.38. Probetas tras desbardado

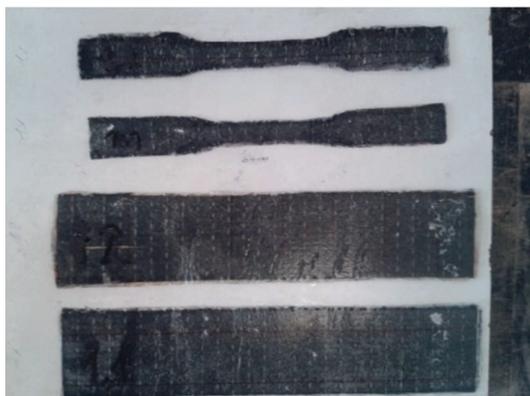
4.2.8 Control de calidad

Una vez separadas y recortadas las piezas se procederá a realizar un control visual para comprobar:

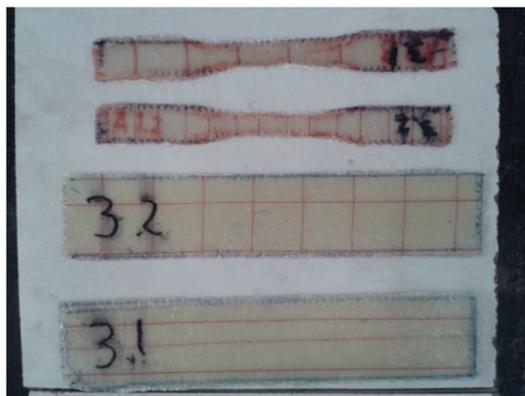
- El aspecto final de la pieza, por ejemplo, su acabado superficial, rugosidad, burbujas e imperfecciones.
- Aspectos geométricos como formas, dimensiones y tolerancias (*ver fotografía 4.41*).
- La distribución de la fibra y de la resina.



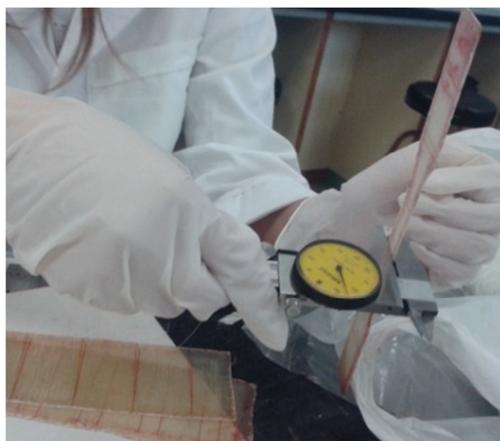
- La ausencia de vacíos, aire o inclusiones de impurezas en el laminado.
- La ausencia de zonas despegadas o delaminadas.
- Una dureza final adecuada.
- Paredes verticales



Fotografía 4.39. Probetas con fibra de carbono



Fotografía 4.40. Probetas de fibra de vidrio



Fotografía 4.41. Mediciones con calibre

Tras realizar estos controles, se pesarán de nuevo las probetas para comprobar la cantidad de resina utilizada en cada una, comparando los pesos entre probetas semejantes y calculando el porcentaje de fibras resultante del compuesto.



4.2.9 Realización del ensayo

Según indica la norma UNE-EN ISO 527, y siguiendo el principio y método de ensayo, la probeta se somete a lo largo de su eje longitudinal principal a tracción, a una velocidad constante, hasta que rompe o hasta que el esfuerzo (carga) o la deformación (alargamiento) alcance un valor predeterminado. Durante este procedimiento se mide la carga que soportó la probeta y el alargamiento que experimenta.

Este ensayo lo realizaremos con las probetas de dimensiones según norma tipo 1b y tipo 2, pues si se realizan con probetas de dimensiones diferentes o preparadas en condiciones distintas, podemos obtener resultados que conduzcan a error.

A la hora de realizar el ensayo, también pueden influir en los resultados otros factores, como la velocidad de ensayo y el acondicionamiento de las probetas, por lo que se seguirán en todo momento las especificaciones de la norma.

Las velocidades de ensayo son, según indica la norma:

- Para probetas tipo 1B
 - o 10mm/min para controles de calidad rutinarios
 - o 2mm/min para ensayos de calificación:
 - Cuando se mida el alargamiento máximo
 - Cuando se determine el módulo de elasticidad en tracción
- Para probetas tipo 2
 - o 5mm/min para controles de calidad rutinarios
 - o 2mm/min para ensayos de calificación:
 - Cuando se mida el alargamiento máximo
 - Cuando se determine el módulo de elasticidad en tracción

En nuestro caso, según las necesidades y objeto de estudio, la velocidad a emplear será de 2mm/min.

Las probetas se sujetarán por medio de mordazas, las cuales deben fijarse a la máquina de forma que el eje principal de la probeta, coincida con la dirección del alargamiento a través de la línea central del montaje de sujeción. La probeta se debe sujetar de manera que se evite el desplazamiento con respecto a las mordazas, este sistema de sujeción no debe provocar la rotura prematura o aplastamiento de la probeta en la zona amordazada.



Para la determinación del módulo de elasticidad en tracción, es esencial que el índice de deformación sea constante y que no varíe, por ejemplo, debido al movimiento de las mordazas.

Respecto a los extensómetros, determinarán la variación de la longitud de referencia de la probeta en cualquier momento del ensayo.



Fotografía 4.42. Extensómetro

Previamente a iniciar el ensayo, nos dispondremos a la limpieza de los soportes, donde se pinzará la probeta, del dispositivo a utilizar. Correctamente, y tomando las medidas de seguridad necesarias, se sujetará el laminado entre las pinzas del dispositivo, centrándolo sobre su eje longitudinal y haciéndolo coincidir con el de las mordazas.

A continuación se procederá al fijado de la probeta, activando el cierre de las mordazas y se iniciará el ensayo, aplicando la carga de forma continua y con un incremento constante.



Fotografía 4.43 y 4.44. Máquina de ensayo a tracción

Fotografía 4.45. Rotura de probeta



Realizados los ensayos previos, y ante los resultados obtenidos, se efectúan cambios:

- Realizando sólo probetas tipo 2 (*ver figura 4.2*) por facilidad de corte, fabricación y ensayo.
- Se decide situar en las capas exteriores las láminas de Mat, suponiendo que al situar el Plain en las zonas interiores, concentraremos las tensiones más cerca del núcleo del laminado.

PROCESO DE FABRICACIÓN DE PROBETAS DE MATRIZ DE POLIÉSTER A TEMPERATURA AMBIENTE



PREPARACIÓN DEL MOLDE



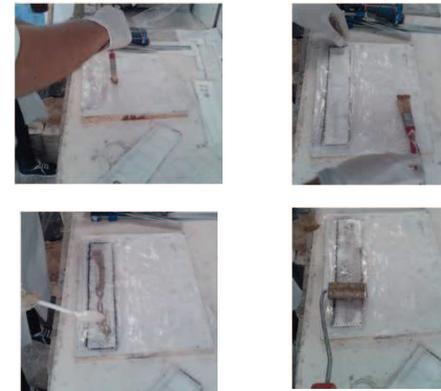
PREPARACIÓN DEL REFUERZO



PREPARACIÓN DE LA RESINA



ELABORACIÓN DEL LAMINADO



CURADO



DESMOLDEO



DESBARDADO DE PROBETAS



ENSAYO A TRACCIÓN



PROCESO DE FABRICACIÓN DE PROBETAS DE MATRIZ DE POLIÉSTER CON CURADO 2 HORAS EN HORNO 60°/90°



PREPARACIÓN DEL MOLDE

PREPARACIÓN DEL REFUERZO

PREPARACIÓN DE LA RESINA

+ Catalizador

ELABORACIÓN DEL LAMINADO

CURADO

DESMOLDEO

POST-CURADO 2 HORAS EN HORNO

DESBARDADO DE PROBETAS

ENSAYO A TRACCIÓN



4.3 Proceso de fabricación de probetas con matriz de poliéster

4.3.1 Preparación del molde

Para la realización de laminados compuestos, no disponemos de un molde como tal, sino que se colocarán unos tablones de madera (*ver fotografía 4.46*), que actuarán como base para regular y homogeneizar las probetas y evitar la pérdida de planeidad que se produce en la retracción causada por la reacción exotérmica en el curado de la resina. Entre ellas se colocarán unos plásticos separadores para evitar que los laminados se adhieran a las maderas.



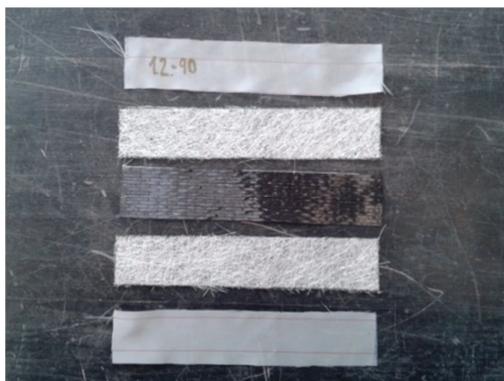
Fotografía 4.46. Tablones de madera

4.3.2 Preparación del refuerzo

Tras seleccionar las fibras a utilizar en el laminado, se dibuja con ayuda de una plantilla las dimensiones normalizadas establecidas para la probeta, tantas como vayamos a utilizar, se recortan y se ordenan según tipos.

A la hora de dibujar sobre las láminas el contorno de las probetas, se optimizará al máximo el espacio para evitar la pérdida innecesaria de material.

Se repetirá el proceso con todos los tipos de refuerzo que vayan a formar parte del laminado, para disponer de todos ellos cortados y preparados antes de aplicar la resina, pues la operación de estratificación debe hacerse de forma continua, teniendo en cuenta el corto periodo de tiempo que se dispone una vez iniciado el proceso de polimerización de la resina. Además se tendrán ya organizados los tipos de probetas a realizar en ese momento, con su orden correspondiente de láminas según indique el programa experimental.



Fotografía 4.47: Organización probetas

Antes de comenzar la impregnación del laminado, se pesarán individualmente las diferentes probetas, acción que se repetirá posteriormente al curado y endurecimiento de la muestra, controlando así la cantidad de resina que se utiliza en cada una y poder mantener las mismas proporciones en cada laminado.

El peso de las fibras se realizará con una balanza electrónica (*ver fotografía 4.26*), que presenta gran precisión, debido a las cifras tan pequeñas en las que se maneja el peso de las fibras.

4.3.3 Preparación de la resina

La resina de poliéster utilizada en este proyecto lleva ya incorporado el acelerador, por lo que sólo habrá que añadir el catalizador para poder iniciar el moldeo. Esta fase requiere gran exactitud y precisión, pues de la correcta dosificación dependerá que la resina adquiera las propiedades y resistencia adecuada. Para ello utilizaremos, al igual que para pesar las fibras, una balanza electrónica y se cuidará en todo momento la limpieza.

RESINA POLIÉSTER	CATALIZADOR
100 gramos	3 gramos

Tabla 4.7. Dosificación de resina poliéster insaturada ortoftálica



La mezcla de ambas se realizará manualmente con una cuchara aproximadamente durante un minuto, para conseguir una homogeneidad entre ambas.

La resina utilizada es de un color azul, que nos servirá de referencia, ya que cuando comience a oscurecer y adquirir un tono marrón por la incorporación del catalizador, nos indicará que está lista para su uso.



Fotografía 4.48. Balanza electrónica



Fotografía 4.49. Resina poliéster sin catalizador



Fotografía 4.50. Homogeneización resina
poliéster-catalizador



Fotografía 4.51. Resina poliéster catalizada

Debido a su limitada trabajabilidad, se prepara en cada momento la cantidad exacta y necesaria que se vaya a utilizar, pues, una vez ha sido catalizada, su estado líquido hasta que comienza a gelificar es muy corto y deberá aplicarse rápidamente sobre la fibra. Por tanto, se pretende evitar que la resina comience a gelificar antes de haber completado la totalidad del



laminado. Si ocurriera esto, sería imposible seguir impregnando las fibras y habría que volver a realizar la resina, teniendo que desechar la gelificada.

4.3.4 Realización del estratificado

Antes de comenzar a colocar las láminas de fibra, se aplicará, con ayuda de un rodillo, una capa de resina sobre el plástico separador donde las colocaremos, para favorecer la impregnación de la primera capa (*ver fotografía 4.52*), y crear un remanente de resina en la superficie, que ayudará a fijar e impregnar las siguientes capas de refuerzo que introduzcamos.

Para la correcta elaboración e impregnación de estos compuestos laminados se deberán seguir tres etapas:

1. “Humectación a través”, asegurando que la resina pase de un lado al otro de la lámina cubriendo totalmente las dos caras del mismo.
2. “Consolidación”, consistente en la eliminación del aire, gracias a la acción del rodillo, y disolviendo el agente de unión. Esta es la fase más importante de las tres, puesto que depende directamente de cómo se realice manualmente.
3. “Humectación total”, asegurando que la fibra se “moja” con la resina volviéndose casi transparente, caracterizada por una pérdida del color característico blanco del vidrio.

Una vez colocada la primera lámina sobre la capa de resina, se pasará el rodillo por encima tantas veces como sea necesario para conseguir una correcta adaptación y desburbujeo (*ver fotografía 4.53*), así como con ayuda de pinceles de punta para que penetre bien la resina y se compacte. Este paso es muy importante, pues si quedan burbujas en el interior del laminado se pueden originar defectos superficiales muy fácilmente.

Se continuará colocando la segunda capa y realizando de nuevo los pasos descritos anteriormente, y así sucesivamente se irán superponiendo las distintas láminas de fibra cortadas con la forma y dimensiones normalizadas, hasta elaborar la probeta deseada.



Fotografía 4.52. Capa resina sobre plástico



Fotografía 4.53. Impregnación con rodillo



Fotografía 4.54. Colocación láminas



Fotografía 4.55. Incorporación resina

La impregnación de una capa sobre la anterior debe hacerse sin que haya endurecido, para asegurar la correcta adherencia entre ellas y evitar así una posible delaminación. Por lo tanto, en el momento que la resina comience a gelificar en su recipiente, tampoco podrá aplicarse sobre las láminas, pues podría ocasionar vacíos entre las capas o inclusiones de aire que quedarían dentro del laminado.

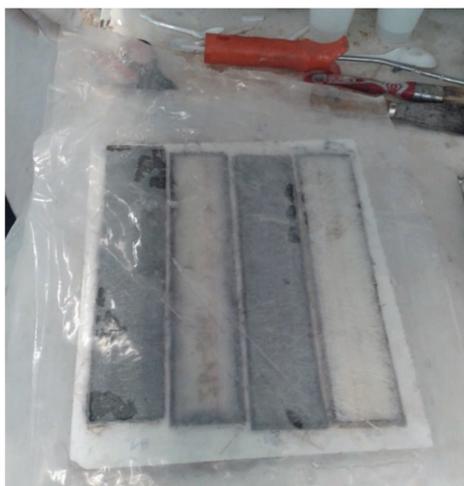
Una vez finalizada la impregnación de las fibras, deben limpiarse todas las herramientas utilizadas antes de que endurezca la resina.



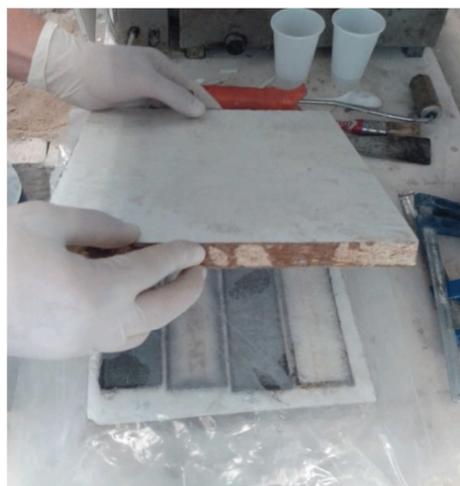
4.3.5 Endurecimiento y desmoldeo

Una vez terminado el laminado del material compuesto, colocaremos otro plástico idéntico al situado en la parte inferior, y sobre él, otra tabla de madera con la intención de conseguir “pensar” la probeta y repartir uniformemente la resina colocada en ella. Además se incorporarán cuatro “gatos” presionando ambas maderas para garantizar la homogeneización y consiguiendo extraer el exceso de resina, que gracias a la presión ejercida, rebosará por el borde de las tablas (ver fotografía 4.58 y 4.59).

Es necesario dejar un tiempo variable (entre 45 minutos y varias horas) según el tipo de resina utilizado, condiciones de curado, temperatura, tamaño de la pieza, rigidez de la misma, etc. antes de proceder a desmoldar la pieza.



Fotografía 4.56. Colocación plástico



Fotografía 4.57. Probetas en el molde



Fotografía 4.58. Incorporación gatos en molde



Fotografía 4.59. Molde con gatos

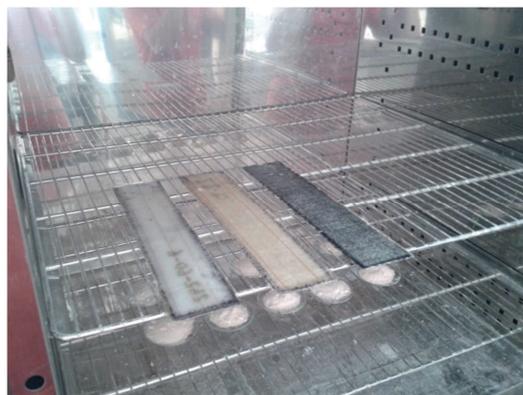


En el caso de los ensayos con resina de poliéster, se realizaron ensayos a temperatura ambiente, curado en horno a 60°C y curado en horno a 90°C, durante 2 horas. Las probetas a ambiente, aproximadamente a las 24 horas de permanecer en su encofrado, estaban listas para desencofrar y ensayar.

Con la aplicación de calor mediante hornos se puede acortar el tiempo de polimerización, pero no debe acelerarse el proceso de gelificación, por la pérdida rápida de algunas sustancias volátiles de las resinas que puedan hacer que el endurecimiento no llegue nunca a ser completo. Por este motivo, el curado de las resinas de poliéster durante el tiempo de gel, no deben superarse los 35°C - 40°C.



Fotografía 4.60. Horno



Fotografía 4.61. Probetas en horno

Teniendo en cuenta estas indicaciones, en la práctica, tanto las probetas curadas en horno a 60°C como las curadas a 90°C, se dejaron durante una hora en sus respectivos “encofrados”, para conseguir alcanzar un endurecimiento suficiente para su manipulación, pues no es posible introducir al horno las probetas con sus correspondientes encofrados por riesgo fundirse dentro, y se procede a su desmoldeo, retirando los gatos y los tablonces de madera, y separando del plástico con cuidado los laminados

Seguidamente permanecerán en horno aproximadamente 2 horas, para un post-curado hasta alcanzar las características de curado deseadas (ver fotografía 4.62).



Fotografía 4.62. Probetas tras post-curado

4.3.6 Desbardado de la pieza

Una vez desmoldada la pieza, se observará que el material presenta un exceso de resina en los bordes y que será necesario eliminar para poder medir correctamente la sección y espesor de la pieza, datos necesarios para futuros cálculos.

La eliminación de este material sobrante estratificado puede llevarse a cabo cuando la pieza no está suficientemente dura y no ha llegado a su polimerización total, siendo así más fácil de cortar que cuando está completamente endurecida. Esta operación se realizará con tijeras, ya que la resina sin refuerzo, no ofrece resistencia a cortante alguna.

4.3.7 Control de calidad

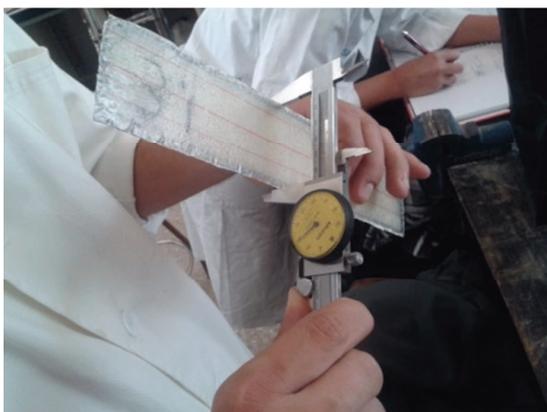
Una vez separadas y recortadas las piezas se procederá a realizar un control visual para comprobar:

- El aspecto final de la pieza, por ejemplo, su acabado superficial, rugosidad, burbujas e imperfecciones.
- Aspectos geométricos como formas, dimensiones y tolerancias (*ver fotografía 4.63 y 4.64*).
- La distribución de la fibra y de la resina.
- La ausencia de vacíos, aire o inclusiones de impurezas en el laminado.



- La ausencia de zonas despegadas o delaminadas.
- Una dureza final adecuada.
- Paredes verticales

Tras realizar estos controles, se pesarán de nuevo las probetas para comprobar la cantidad de resina utilizada en cada una, comparar los pesos entre probetas semejantes y calcular el porcentaje de fibras utilizado en el compuesto.



Fotografía 4.63. Comprobación sección probetas



Fotografía 4.64. Comprobación espesor probetas

4.3.8 Realización del ensayo

Según indica la norma UNE-EN ISO 527, y siguiendo el principio y método de ensayo, la probeta se somete a lo largo de su eje longitudinal principal a tracción, a una velocidad constante, hasta que rompe o hasta que el esfuerzo (carga) o la deformación (alargamiento) alcance un valor predeterminado. Durante este procedimiento se mide la carga que soportó la probeta y el alargamiento que experimenta.

Este ensayo lo realizaremos con las probetas de dimensiones según norma tipo 1b y tipo 2, pues si se realizan con probetas de dimensiones diferentes o preparadas en condiciones diferentes, podemos obtener resultados que conduzcan a error.

A la hora de realizar el ensayo, también pueden influir en los resultados otros factores, como la velocidad de ensayo y el acondicionamiento de las probetas, por lo que se seguirán en todo momento las especificaciones de la norma.



Las velocidades de ensayo son, según indica la norma:

- Para probetas tipo 1B
 - o 10mm/min para controles de calidad rutinarios
 - o 2mm/min para ensayos de calificación:
 - Cuando se mida el alargamiento máximo
 - Cuando se determine el módulo de elasticidad en tracción
- Para probetas tipo 2
 - o 5mm/min para controles de calidad rutinarios
 - o 2mm/min para ensayos de calificación:
 - Cuando se mida el alargamiento máximo
 - Cuando se determine el módulo de elasticidad en tracción

En nuestro caso, según las necesidades y objeto de estudio, la velocidad a emplear será de 2mm/min.

Las probetas se sujetarán por medio de mordazas, las cuales deben fijarse a la máquina de forma que el eje principal de la probeta, coincida con la dirección del alargamiento a través de la línea central del montaje de sujeción. La probeta se debe sujetar de manera que se evite el desplazamiento con respecto a las mordazas, este sistema de sujeción no debe provocar la rotura prematura o aplastamiento de la probeta en la zona amordazada.

Para la determinación del módulo de elasticidad en tracción, es esencial que el índice de deformación sea constante y que no varíe, por ejemplo, debido al movimiento de las mordazas.

Respecto a los extensómetros (*ver fotografía 4.42*), determinarán la variación de la longitud de referencia de la probeta en cualquier momento del ensayo.

Previamente a iniciar el ensayo, nos dispondremos a la limpieza de los soportes, donde se pinzará la probeta, del dispositivo a utilizar. Correctamente, y tomando las medidas de seguridad necesarias, se sujetará el laminado entre las pinzas del dispositivo, centrándolo sobre su eje longitudinal y haciéndolo coincidir con el de las mordazas.

A continuación se procederá al fijado de la probeta, activando el cierre de las mordazas y se iniciará el ensayo, aplicando la carga de forma continua y con un incremento constante.



Fotografía 4.65. Ensayo probeta con extensómetro *Fotografía 4.66. Probeta ensayada a tracción*

La máquina utilizada para el ensayo a tracción de las probetas será la IBERTEST modelo UIB600 con una capacidad de carga de 600 KN (*ver fotografía 4.65*).

Para medir la deformación de los laminados durante el ensayo, se utilizará un captador ZEUS-50, con una longitud base de deformación de 50mm.

PROCESO DE FABRICACIÓN DE PROBETAS DE MATRIZ EPOXI A TEMPERATURA AMBIENTE



PREPARACIÓN DEL MOLDE



PREPARACIÓN DEL REFUERZO



PREPARACIÓN DE LA RESINA



+ Catalizador



ELABORACIÓN DEL LAMINADO



CURADO



DESMOLDEO



DESBARDADO DE PROBETAS



ENSAYO A TRACCIÓN



PROCESO DE FABRICACIÓN DE PROBETAS DE MATRIZ EPOXI CON CURADO 2 HORAS EN HORNO 60°/90°





4.4 Proceso de fabricación de probetas con matriz epoxi

4.4.1 Preparación del molde

Para la realización de laminados compuestos, no disponemos de un molde como tal, sino que se colocarán unos tablones de madera (*ver fotografía 4.21*) que actuarán como base para regular y homogeneizar las probetas y evitar la pérdida de planeidad que se produce en la retracción causada por la reacción exotérmica en el curado de la resina.

Entre ellas se colocarán unos plásticos separadores para evitar que los laminados se adhieran a las maderas.

4.4.2 Preparación del refuerzo

Tras seleccionar las fibras a utilizar en el laminado, se dibuja con ayuda de una plantilla las dimensiones normalizadas establecidas para la probeta, tantas como vayamos a utilizar, se recortan y se ordenan según tipos. A la hora de dibujar sobre las láminas el contorno de las probetas, se optimizará al máximo el espacio para evitar la pérdida innecesaria de material.

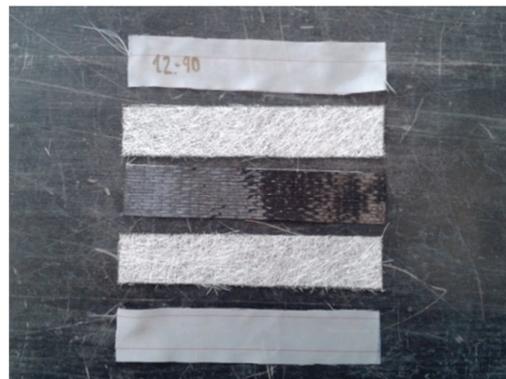
Se repetirá el proceso con todos los tipos de refuerzo que vayan a formar parte del laminado, para disponer de todos ellos cortados y preparados antes de aplicar la resina, pues la operación de estratificación debe hacerse de forma continua, teniendo en cuenta el corto periodo de tiempo que se dispone una vez iniciado el proceso de polimerización de la resina. Además se tendrán ya organizados los tipos de probetas a realizar en ese momento, con su orden correspondiente de láminas según indique el programa experimental.

Antes de comenzar la impregnación del laminado, se pesarán individualmente las diferentes probetas, acción que se repetirá posteriormente al curado y endurecimiento de la muestra, controlando así la cantidad de resina que se utiliza en cada una y poder mantener las mismas proporciones en cada laminado.

El peso de las fibras se realizará con una balanza electrónica (*ver fotografía 4.26*), que presenta gran precisión, debido a las cifras tan pequeñas en las que se maneja el peso de las fibras.



Fotografía 4.67. Refuerzos recortados



Fotografía 4.68. Organización probetas

4.4.3 Preparación de la resina

La resina de epoxi utilizada en este proyecto lleva ya incorporado el acelerador, por lo que sólo habrá que añadir el catalizador para poder iniciar el proceso. Esta fase requiere gran exactitud y precisión, pues de la correcta dosificación (*ver tabla 4.8*), dependerá que la resina adquiera las propiedades y resistencia adecuada. Para ello utilizaremos, al igual que para pesar las fibras, una balanza electrónica y se cuidará en todo momento la limpieza.

RESINA EPOXI	CATALIZADOR
100 gramos	50 gramos

Tabla 4.8. Dosificación de resina epoxi

La mezcla de ambas se realizará manualmente con una cuchara aproximadamente durante un minuto, para conseguir una homogeneidad entre ambas.



Fotografía 4.69. Homogeneización resina epoxi-catalizador



Esta resina dispone de un periodo de trabajabilidad mayor que las de poliéster. No obstante, debido a que se encuentra en un estado viscoso, se prepara en cada momento la cantidad exacta y necesaria que se vaya a utilizar, pues, si combináramos mayor cantidad de sus componentes, dificultaría la homogeneización de la misma. Una vez ha sido catalizada, su estado líquido hasta que comienza a gelificar dependerá del tipo de resina epoxi, la cantidad de catalizador utilizada y la temperatura ambiente.

Evitaremos que la resina comience a gelificar antes de haber completado la totalidad del laminado. Si ocurriera esto, sería imposible seguir impregnando las fibras y habría que volver a realizar la resina, teniendo que desechar la gelificada.

4.4.4 Realización del estratificado

Antes de comenzar a colocar las láminas de fibra, se aplicará, con ayuda de un rodillo, una capa de resina sobre el plástico separador donde las colocaremos (*ver fotografía 4.70*), para favorecer la impregnación de resina de la primera capa y crear un remanente de resina en la superficie, que ayudará a fijar e impregnar las siguientes capas de refuerzo que introduzcamos.

Para la correcta elaboración e impregnación de estos compuestos laminados se deberán seguir tres etapas:

1. “Humectación a través”, asegurando que la resina pase de un lado al otro de la lámina cubriendo totalmente las dos caras del mismo.
2. “Consolidación”, consistente en la eliminación del aire, gracias a la acción del rodillo, y disolviendo el agente de unión. Esta es la fase más importante de las tres, puesto que depende directamente de cómo se realice manualmente.
3. “Humectación total”, asegurando que la fibra se “moja” con la resina volviéndose casi transparente, caracterizada por una pérdida del color característico blanco del vidrio.

Una vez colocada la primera lámina sobre la capa de resina, se pasará el rodillo por encima tantas veces como sea necesario para conseguir una correcta adaptación y desburbujeo (*ver fotografía 4.72*), así como con ayuda de pinceles de punta para que penetre



bien la resina y se compacte. Este paso es muy importante, pues si quedan burbujas en el interior del laminado se pueden originar defectos superficiales muy fácilmente.

Se continuará colocando la segunda capa y realizando de nuevo los pasos descritos anteriormente, y así sucesivamente se irán superponiendo las distintas láminas de fibra cortadas con la forma y dimensiones normalizadas, hasta elaborar la probeta deseada.



Fotografía 4.70. Capa resina sobre plástico



Fotografía 4.71. Colocación láminas



Fotografía 4.72. Impregnación con rodillo



Fotografía 4.73. Colocación lámina final tipo MAT

La impregnación de una capa sobre la anterior debe hacerse sin que haya endurecido, para asegurar la correcta adherencia entre ellas y evitar así una posible delaminación. Por lo



tanto, en el momento que la resina comience a gelificar en su recipiente tampoco podrá aplicarse sobre las láminas, pues podría ocasionar vacíos entre las capas o inclusiones de aire que quedarían dentro del laminado.

Una vez finalizada la impregnación de las fibras, deben limpiarse todas las herramientas utilizadas antes de que endurezca la resina.

4.4.5 Endurecimiento y desmoldeo

Una vez terminado el laminado del material compuesto, colocaremos otro plástico, idéntico al situado en la parte inferior, sobre las probetas (*ver fotografía 4.56*), y sobre él, otra tabla de madera con la intención de conseguir “presar” la probeta y repartir uniformemente la resina utilizada en ella (*ver fotografía 4.57*).

Además se incorporarán cuatro “gatos” presionando ambas maderas para garantizar la homogeneización y consiguiendo extraer el exceso de resina, que gracias a la presión ejercida, rebosará por el borde de las tablas.

Es necesario dejar un tiempo variable según el tipo de resina utilizado, condiciones de curado, temperatura, tamaño de la pieza, rigidez de la misma, etc. antes de proceder a desmoldar la pieza.



Fotografía 4.74. Incorporación gatos en molde



En el caso de los ensayos con resina de epoxi, se realizaron ensayos a temperatura ambiente, curado en horno a 60°C y curado en horno a 90°C. Las probetas a ambiente, aproximadamente a las 24 horas de permanecer en su encofrado, estaban listas para desencofrar y ensayar.

Con la aplicación de calor mediante hornos (*ver fotografía 4.60*) se puede acortar el tiempo de polimerización, pero no debe acelerarse el proceso de gelificación, por la pérdida rápida de algunas sustancias volátiles de las resinas que puedan hacer que el endurecimiento no llegue nunca a ser completo. Por este motivo, el curado de las resinas de epoxi durante el tiempo de gel, no deben superarse los 35°C - 40°C.

Teniendo en cuenta estas indicaciones, en la práctica, tanto las probetas curadas en horno a 60°C como las curadas a 90°C, se dejaron durante unas ocho horas en sus respectivos “encofrados”, para conseguir alcanzar un endurecimiento suficiente para su manipulación, pues no es posible introducir al horno las probetas con sus correspondientes encofrados por riesgo fundirse dentro, y se procede a su desmoldeo, retirando los gatos y los tablonces de madera, y separando del plástico con cuidado los laminados

Seguidamente permanecerán en horno aproximadamente 2-2,30 horas, para un post-curado hasta alcanzar las características deseadas (*ver fotografía 4.61*).



Fotografía 4.75. Probetas tras post-curado

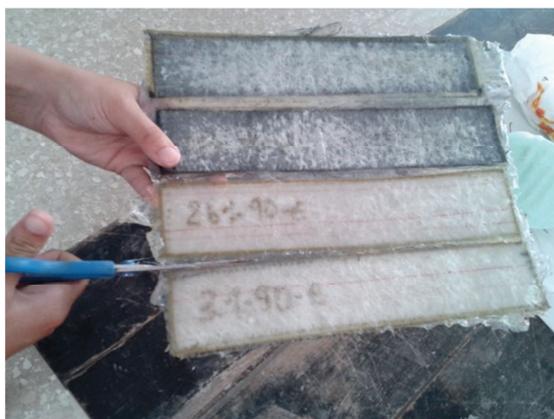


4.4.6 Desbardado de la pieza

Una vez desmoldada la pieza, se observará que el material presenta un exceso de resina en los bordes y que será necesario eliminar para poder medir correctamente la sección y espesor de la pieza, datos necesarios para futuros cálculos.

La eliminación de este material sobrante estratificado puede llevarse a cabo cuando la pieza no está suficientemente dura y no ha llegado a su polimerización total, siendo así más fácil de cortar que cuando está completamente endurecida.

Esta operación se realizará con tijeras o cúteres (*ver fotografía 4.76*), ya que la resina sin refuerzo, no ofrece resistencia a cortante alguna.



Fotografía 4.76. Desbardado de probetas

4.4.7 Control de calidad

Una vez separadas y recortadas las piezas se procederá a realizar un “control” visual para comprobar:

- El aspecto final de la pieza, por ejemplo, su acabado superficial, rugosidad, burbujas e imperfecciones.
- Aspectos geométricos como formas, dimensiones y tolerancias (*ver fotografía 4.63 y 4.64*).
- La distribución de la fibra y de la resina.



- La ausencia de vacíos, aire o inclusiones de impurezas en el laminado.
- La ausencia de zonas despegadas o delaminadas.
- Una dureza final adecuada.
- Paredes verticales

Tras realizar estos controles, se pesarán de nuevo las probetas para comprobar la cantidad de resina utilizada en cada una, comparar los pesos entre probetas semejantes y calcular el porcentaje de fibras utilizado en el laminado.

4.4.8 Realización del ensayo

Según indica la norma UNE-EN ISO 527, y siguiendo el principio y método de ensayo, la probeta se somete a lo largo de su eje longitudinal principal a tracción, a una velocidad constante, hasta que rompe o hasta que el esfuerzo (carga) o la deformación (alargamiento) alcance un valor predeterminado. Durante este procedimiento se mide la carga que soportó la probeta y el alargamiento que experimenta.

Este ensayo lo realizaremos con las probetas de dimensiones según norma tipo 1b y tipo 2, pues si se realizan con probetas de dimensiones diferentes o preparadas en condiciones diferentes, podemos obtener resultados que conduzcan a error.

A la hora de realizar el ensayo, también pueden influir en los resultados otros factores, como la velocidad de ensayo y el acondicionamiento de las probetas, por lo que se seguirán en todo momento las especificaciones de la norma.

Las velocidades de ensayo son, según indica la norma:

- Para probetas tipo 1B
 - o 10mm/min para controles de calidad rutinarios
 - o 2mm/min para ensayos de calificación:
 - Cuando se mida el alargamiento máximo
 - Cuando se determine el módulo de elasticidad en tracción
- Para probetas tipo 2
 - o 5mm/min para controles de calidad rutinarios
 - o 2mm/min para ensayos de calificación:



- Cuando se mida el alargamiento máximo
- Cuando se determine el módulo de elasticidad en tracción

En nuestro caso, según las necesidades y objeto de estudio, la velocidad a emplear será de 2mm/min.

Las probetas se sujetarán por medio de mordazas, las cuales deben fijarse a la máquina de forma que el eje principal de la probeta, coincida con la dirección del alargamiento a través de la línea central del montaje de sujeción. La probeta se debe sujetar de manera que se evite el desplazamiento con respecto a las mordazas, este sistema de sujeción no debe provocar la rotura prematura o aplastamiento de la probeta en la zona amordazada.

Para la determinación del módulo de elasticidad en tracción, es esencial que el índice de deformación sea constante y que no varíe, por ejemplo, debido al movimiento de las mordazas.



Fotografía 4.77. Maquinaria ensayo a tracción Fotografía 4.78. Probeta a ensayar

Respecto a los extensómetros (*ver fotografía 4.42*), determinarán la variación de la longitud de referencia de la probeta en cualquier momento del ensayo.

Previamente a iniciar el ensayo, nos dispondremos a la limpieza de los soportes, donde se pinzará la probeta, del dispositivo a utilizar. Correctamente, y tomando las medidas de seguridad necesarias, se sujetará el laminado entre las pinzas del dispositivo, centrándolo sobre su eje longitudinal y haciéndolo coincidir con el de las mordazas.

A continuación se procederá al fijado de la probeta, activando el cierre de las mordazas y se iniciará el ensayo, aplicando la carga de forma continua y con un incremento constante.

PROCESO DE FABRICACIÓN DE UNA VIGA DE LAMINADO DE FIBRA DE VIDRIO Y CARBONO CON RESINA DE POLIÉSTER A PARTIR DE UN PERFIL PULTRUSIONADO



PREPARACIÓN DEL MOLDE Y MATERIALES



FABRICACIÓN DE MÓDULOS



UNIÓN DE LOS MÓDULOS



CONFORMACIÓN BASE DE LA VIGA



FABRICACIÓN DE RIGIDIZADORES



LAMINADO DE LA VIGA



CAPA DE COMPRESIÓN HORMIGÓN HR



ENSAYO A FLEXIÓN





4.5 Proceso de fabricación de una viga a partir de perfil pultrusionado

Una vez finalizado el análisis de los resultados, obtenidos a partir de los ensayos de tracción, realizados a los distintos laminados planteados en el programa experimental, se decide aplicar coherentemente estos datos en la fabricación de una viga (ver figura 4.3).

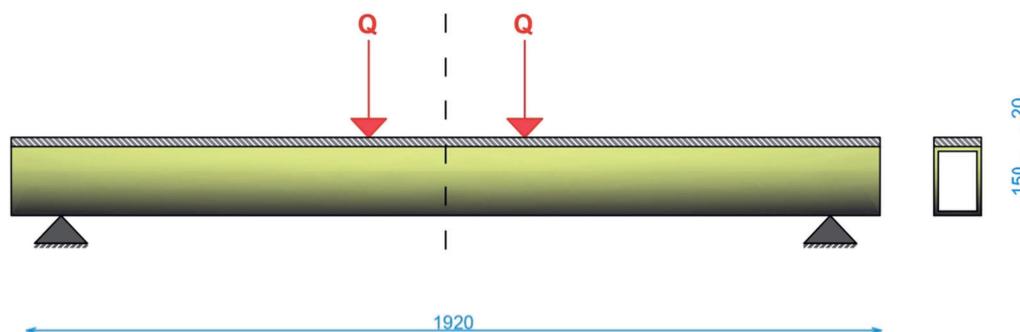


Figura 4.3. Viga planteada



Ante la incertidumbre de los pasos a seguir, por tratarse de un procedimiento no realizado anteriormente con los medios de los que disponemos, se decide trazar un plan de acción con el fin de intentar minimizar al máximo todos los inconvenientes que van a surgir a lo largo del proceso de fabricación.

Partimos de la base de un perfil pultrusionado (ver figura 4.4). El primer problema que se plantea, es como obtener una viga que supera en más de dos veces la longitud del perfil. Analizando las posibles ventajas e inconvenientes, se opta por la realización de dos módulos del tamaño y geometría del perfil, para su posterior unión central como detallamos más adelante. Una vez realizada ésta unión, habremos obtenido una base sobre la que realizar el laminado de una forma longitudinalmente continua.



Figura 4.4. Perfil pultrusionado

4.5.1 Preparación del molde y materiales

Primeramente, envolveremos el perfil pultrusionado con plástico de manera que quede ajustado al mismo, creando una capa separadora entre el molde y el laminado que se utilizará como base, facilitando su extracción una vez endurecida la pieza, que será nuestro primer módulo.



Fotografía 4.79. Perfil pultrusionado



Fotografía 4.80. Incorporación de plástico al perfil pultrusionado

Antes de proseguir, debemos dejar el material necesario preparado, cortado con las dimensiones apropiadas de forma que se consiga recubrir toda la superficie del molde. Esta operación se repetirá tantas veces como módulos se elaboren.



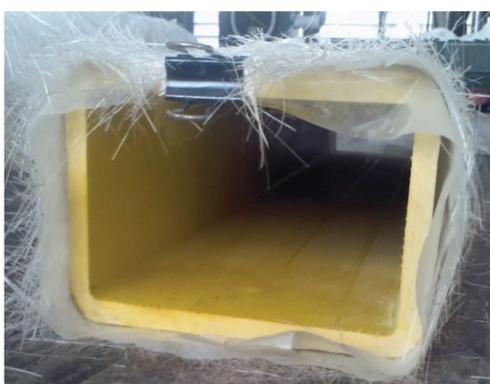
Fotografía 4.81 y 4.82. Preparación del material



4.5.2 Fabricación de módulos.

Nos encontramos ante el problema de que las dimensiones del perfil a utilizar como molde, no responde a las deseadas de la viga, por lo que se opta por la realización de dos módulos idénticos para su posterior unión central por un tercero.

Una vez envuelto el molde, se ajustará el Mat de fibra de vidrio alrededor del molde, ayudándonos de pinzas para su fijación y facilitar el manejo durante la impregnación de la resina. Si es necesario, también se utilizará cinta de carroceros, que se retirará al tiempo que el proceso de impregnado llegue a su zona de aplicación.



Fotografía 4.83 y 4.84. Primera capa de Mat

Preparado el material alrededor del molde, el siguiente paso será el impregnado con resina de poliéster del Mat de fibra de vidrio (preparación de la resina igual que en la elaboración de probetas, ver tabla 4.1). Para este trabajo nos ayudaremos de un rodillo metálico que favorezca el reparto de la resina, compactación del material y extracción del aire ocluido.



Fotografía 4.85. Aplicación resina sobre Mat

Fotografía 4.86. Impregnación con rodillo



Una vez impregnada toda la pieza, se envolverá con un plástico tenso alrededor del compuesto, de forma que ejerza presión, sobre el cual se adaptaran sendas tablas de madera a modo de prensa, sujetas con la ayuda de gatos, para homogeneizar el reparto de resina, la superficie y mantener la geometría del molde. Éste “encofrado”, se realizará en los siguientes pasos también.

Posteriormente a alrededor de 1 hora, el módulo ya adquirido un endurecimiento suficiente como para poder extraerlo del molde y proseguir su curado al aire libre, exento de cualquier medio auxiliar que nos ha ayudado en su moldeo.



Fotografía 4.87. Primer módulo de fibra

Hay que tener en cuenta el posterior solape, por lo que se dejará sin impregnar uno de los extremos facilitando la posterior unión de las telas.

4.5.3 Unión de módulos

Realizados los dos módulos, procederemos a su unión central, para ello, y con las dimensiones requeridas, introduciremos el perfil pultrusionado envuelto en plástico la distancia necesaria para la realización del solape (*ver fotografía 4.88*).



Fotografía 4.88. Unión central con perfil pultrusionado como molde

A continuación lijaremos las áreas de solape con una lija o piedra pómez, con el fin de homogeneizar la superficie, eliminar posibles excesos y rebabas de resina y, sobretodo, abrir el poro y mejorar las zonas de contacto con el fin de favorecer la unión.



Fotografía 4.89. Lijado en la parte de los solapes

Seguidamente envolveremos el molde con el Mat de fibra de vidrio preparado con las dimensiones necesarias para completar los 192 cm de viga, y se solapará alrededor de 10 cm con los módulos ya fabricados. Lo siguiente será el impregnado del tejido, procediendo de igual forma que en el caso anterior, siendo especialmente cuidadoso en las zonas de solape.



Fotografía 4.90. Solape de los dos módulos



Para finalizar, procederemos al “prensado” y compactación, envolviendo la zona a polimerizar con plástico y utilizando las tablas y los gatos, obteniendo el resultado final.



Fotografía 4.91. Compactación con plásticos

4.5.4 Conformación base de la viga

Llegados a este punto, se ha conseguido llegar a obtener una base con la geometría y dimensiones deseadas a partir del perfil pultrusionado de dimensiones inferiores. La conformación de la base de la viga consistirá en la realización de otra capa de Mat de fibra de vidrio que envuelva la base en su totalidad, con el fin de obtener una mayor inercia y consistencia.



Fotografía 4.92. y 4.93. Base de la viga con Mat

A partir de ésta base, se comenzará a laminar las diferentes caras de la base, conformando la viga con la mejor disposición de fibras en relación a los esfuerzos a los que se va a someter en el ensayo a flexión. La impregnación se realizará siguiendo las consignas de los pasos anteriores, con la ayuda de un rodillo metálico.



Previamente a la colocación de ésta segunda capa de Mat de fibra de vidrio, es recomendable lijar la totalidad de la superficie, no solo con la intención de eliminar excesos de resina o imperfecciones, sino que especialmente para crear una superficie más porosa y facilitar la unión de la posterior laminación. Éste lijado se realizará tantas veces como se vaya a colocar una nueva capa.

4.5.5 Fabricación de los rigidizadores

Entendemos por la lógica común y la morfología del material, que al tratarse de una viga hueca, a la hora de someterla a un estado de cargas en el ensayo a flexión, en los puntos de apoyo y aplicación de fuerzas, se corre el riesgo de un fallo por aplastamiento. Para evitar este fenómeno, o en su defecto, controlarlo en la medida de lo posible, se opta por la fabricación de unos rigidizadores compuestos por un sándwich de madera de contrachapado y poliestireno extruido.



Fotografía 4.94., 4.95. y 4.96. Preparación de rigidizadores

Éstos, se envolverán con una lámina de velo de fibra de vidrio impregnada en resina, para reforzar la unión madera-poliestireno-madera.



Fotografía 4.97. Mat envolviendo rigidizadores Fotografía 4.98. Impregnación con resina



La colocación de los rigidizadores responde a los puntos de apoyo y a los puntos de aplicación de fuerzas, situando un quinto y un sexto rigidizador en el punto medio del vano formado por el apoyo y la aplicación de la fuerza.

Al utilizar el proceso de moldeo por contacto a mano, es prácticamente imposible conseguir una pieza con una geometría uniformemente idéntica a la del perfil pultrusionado, por lo que los rigidizadores no se ajustarán en su totalidad al volumen interior dejando huecos, debido a los cuales, el movimiento de los rigidizadores no quedará anulado durante el proceso de laminación de la viga. Por éste motivo, se decide realizar unos taladros en los puntos donde se van a colocar para, una vez situados en su lugar, permitirnos la introducción de cola, hasta rebosar por el orificio, y restringir el movimiento.



Fotografía 4.99. Taladro en los puntos de rigidización



Fotografía 4.100. Incorporación de cola en zona de rigidizadores

En un principio, se había planteado la introducción de resina de poliéster, pero se comprobó que durante el proceso exotérmico que se produce en su endurecimiento, la temperatura era tan elevada que consumía el poliestireno extruido del sándwich.

También se tuvo en cuenta que los orificios del taladro se situaran en la cara superior de la viga, en la zona de compresiones, para no debilitar y crear puntos de concentración de tensiones en la cara inferior, donde trabaja a tracción.

Para la introducción de los mismos en el interior de la viga, nos ayudaremos de una maza y un listón de madera, de forma que al golpear con la herramienta, la fuerza que



imprimimos se reparta sobre la superficie del rigidizador y penetre lo más recto posible hasta el punto correspondiente.



Fotografía 4.101. 4.102. y 4.103. Introducción de rigidizadores

con ayuda de una maza y un listón de madera

4.5.6 Laminado de la viga

Una vez se ha conseguido la introducción de todos los rigidizadores, se comenzará el laminado del elemento constructivo con la disposición de refuerzos detallada en el programa experimental, distribuida en 3 capas.



Controlar las cantidades de resina en la elaboración del elemento constructivo es complicado, así que se mezclará la cantidad de resina y catalizador que nos permita su aplicación de forma íntegra, antes de que comience a gelificar, y repitiendo el proceso tantas veces como sea necesario, hasta una total impregnación de las fibras, con el fin de desperdiciar la menor cantidad de resina posible. Para la realización de la resina de poliéster, se seguirán los pasos explicados al respecto de la fabricación de probetas del programa experimental.



Es importante realizar estos trabajos con ayuda de otra persona, ya que mientras una se dedica al impregnado de las fibras, la otra mezcla los componentes de la resina, para aplicar capas de forma consecutiva y obtener un laminado lo más uniforme posible. Además, durante el impregnado, es muy eficiente que mientras una persona se dedica a esparcir la resina con ayuda de una cucharilla, la otra comprima y la reparta con el rodillo metálico de forma más homogénea (*ver fotografía 4.104*).



Fotografía 4.104. Probeta a ensayar

1. **Tipología 3_45°.** La primera capa consta de los refuerzos utilizados en la tipología 3 de probetas de poliéster insaturado ortoftálico, direccionando las fibras a 45°, favoreciendo así la forma de trabajo de las caras laterales de la viga.

Primero se envolverá la totalidad de la viga con una capa de Mat de fibra de vidrio, ayudándonos de pinzas y cinta de carroceros, para sujetar las fibras durante el impregnado de la capa.



Fotografía 4.105. Primera capa de Mat

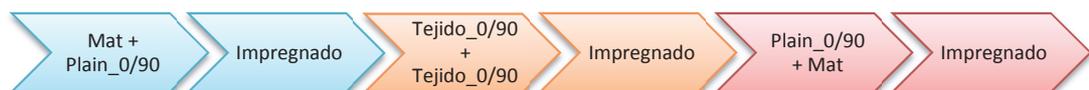


Para el Mat de fibra de vidrio, es indiferente el ángulo de disposición, ya que se trata de fibras cortas multidireccionales, en cambio, para el Plain_0/90 y el Tejido_0/90, se cortaron piezas longitudinales de 5 x 0,40m (ver fotografía 4.106) para realizar un enrollado y acoplado alrededor de la viga (ver fotografía 4.107).



Fotografía 4.106., 4.107. y 4.108. Preparación, colocación e impregnación de segunda capa de Plain_0/90 a 45°

Con el conocimiento y la experiencia adquirida durante el laminado de las probetas del programa experimental, para un proceso más eficiente, y realizar los laminados lo más consecutivos posibles, se decidió dividir la capa envolvente a 45° en tres tandas de colocación consecutivas:



Con esto lo que se conseguía, además de un ahorro de tiempo y reducción de ciclos de impregnado, crear una capa más homogénea, ya que dadas las dimensiones de la viga, al finalizar el impregnado de una de una de las capas, se había conseguido el endurecimiento suficiente para poder manipular la pieza, y proceder a la colocación de la siguiente tela de fibra. Este endurecimiento no quiere decir que la polimerización sea completa, ya que estamos hablando de unos 20 – 30 minutos desde el inicio del proceso de curado de la resina (ver fotografía 4.109 y 4.110).

A continuación, y de igual manera que el Plain_0/90, se colocaron las dos capas de Tejido_0/90 a 45°.



Fotografía 4.109., 4.110. y 4.111. Preparación, colocación e impregnación de tercera capa de Tejido_0/90 a 45°

Una vez repetido el proceso, esta vez con el Tejido_0/90, y finalizado el impregnado, se procederá de igual manera que en la primera capa del laminado a 45°, con las dos láminas de refuerzo restantes, Plain_0/90 + Mat.

- 2. Tipología 3_0°.** Terminada la aplicación de la capa de refuerzo direccionada a 45°, comenzaremos con la colocación del laminado de la parte superior de la viga. El proceso será mucho más fácil que el anterior ya que solo se trata de una aplicación longitudinal en la cara de arriba.

Para ello, enfocamos la aplicación como si se tratase de una probeta del programa experimental pero con dimensiones mayores, de manera que se superponen las telas en su posición repitiendo los ciclos de impregnado. Su colocación se hizo acto seguido a la Tipología 3_45°.

Cortaremos las telas de fibra de vidrio con las dimensiones adecuadas y las dejaremos preparadas para su colocación (*ver fotografía 4.112 y 4.113*).



Fotografía 4.112. y 4.113. Corte y preparación del laminado



La capa anterior, acaba de ser realizada, así que al situar la primera lámina de tela correspondiente a esta parte del laminado de la viga, quedará impregnada y pegada en el sitio para su posterior asentamiento con el rodillo metálico, al igual que los procesos anteriores (*ver fotografía 4.115*).



Fotografía 4.114. y 4.115. Colocación de primera lámina de la zona a compresión de la viga

3. **Tipología 1_0°.** Para finalizar la ejecución de la parte polimérica de la viga, solo queda la capa correspondiente a la cara inferior del elemento estructural, la más importante de todas, ya que es la encargada de soportar las mayores tracciones en un trabajo a flexión (*ver figura 4.5*).

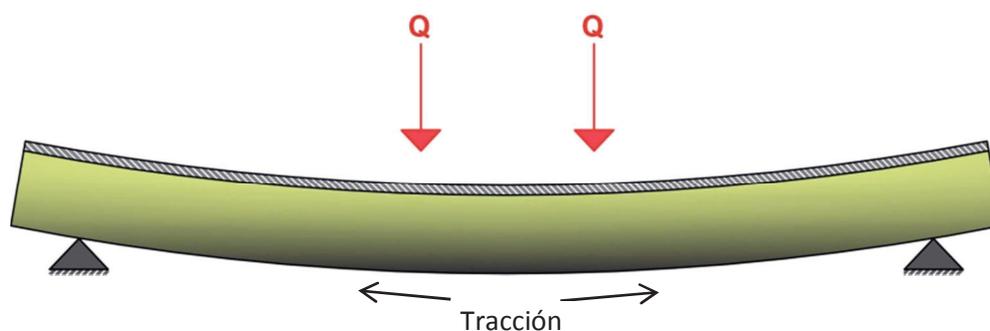


Figura 4.5. Tracción en cara inferior de la viga

Es por ello que es la encargada de contener la fibra de carbono, con el fin de obtener mayor rigidez y capacidad de carga. Se cortarán las piezas de tela con las dimensiones correspondientes (*fotografía 4.116*) y se procederá a su colocación e impregnado, repitiendo los procesos anteriores. Previamente se habrá lijado la superficie correspondiente a la colocación del laminado.



Fotografía 4.116. Piezas cortadas



Fotografía 4.117. Capa de fibra de carbono

La fabricación de la viga correspondiente al laminado de materiales compuestos estará lista, a falta de una capa de fibra de carbono con resina epoxi a modo de refuerzo de la cara inferior (ver fotografía 4.117).

Acto seguido, se laminará el refuerzo de fibra de carbono con resina epoxi. Para ello, se tendrá preparada la tela y, aprovechando que acabamos de finalizar el laminado anterior, en pleno proceso de polimerización, situaremos el refuerzo en el lugar de aplicación y nos dispondremos a la preparación de la resina epoxi para su impregnación (ver fotografía 4.118).



Fotografía 4.118. y 4.119. Última capa de carbono con resina epoxi



Fotografía 4.120.
Resina epoxi

La dosificación de resina epoxi, se realizará atendiendo a lo explicado en el proceso de fabricación de probetas con matriz de resina epoxi (ver tabla 4.3).

Una vez realizado el refuerzo, protegeremos el laminado con un plástico y lo prensaremos con unas tablas de madera, ejerciendo presión con la ayuda de unos gatos, a modo de encofrado, para facilitar el reparto de la resina y extraer en la medida de lo posible el aire ocluido (ver fotografía 4.121).



Fotografía 4.121. Prensa del laminado con tablas



Fotografía 4.122. Viga laminada

Una vez endurecido, habrán finalizado los trabajos de laminado, obteniendo una viga de matriz polimérica realizada con refuerzos de fibra de vidrio y fibra de carbono (ver fotografía 4.122).

4.5.7 Capa de compresión hormigón alta resistencia

Tememos que durante el ensayo a flexión con 4 puntos, la cara superior de la viga falle por aplastamiento, ya que se trata de un elemento hueco, de forma que, además de los rigidizadores situados en los puntos de apoyo y de aplicación de cargas, se decide realizar una capa de compresión de 2 cm de espesor de hormigón “ultra-high” reforzado con fibras metálicas (HRF-60).

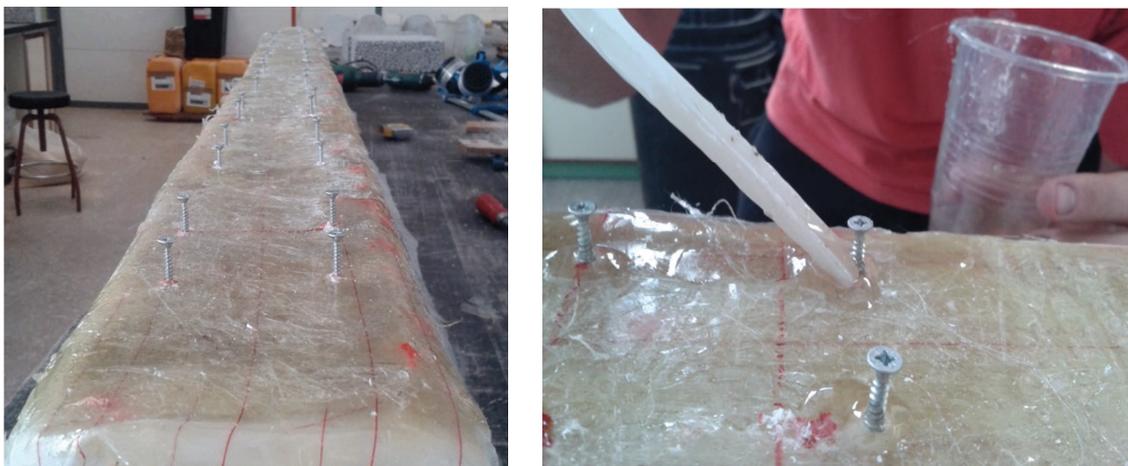
Para la unión solidaria del elemento polimérico con la capa de hormigón, se realizarán unos taladros, aprovechando los puntos donde se encuentran las maderas de los rigidizadores, y se introducirán tornillos, sobresaliendo de la cara superior de la viga en 1,5cm. Se repetirá este proceso en los puntos medios entre rigidizadores (ver fotografía 4.124).



Fotografía 4.123., 4.124. y 4.125. Colocación de conectores en parte superior de la viga

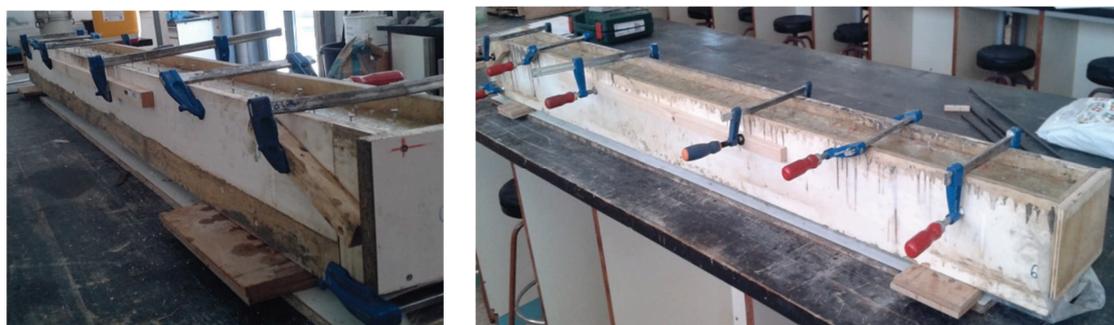


Realizados todos los taladros e introducidos los tornillos, se aplicarán unos puntos de resina alrededor de cada uno, con el fin de fijarlos en su lugar y unirlos con el resto del elemento (*ver fotografía 4.127*).



Fotografía 4.126. y 4.127. Incorporación de puntos de resina en tornillos

El siguiente paso a seguir es la realización de un encofrado que nos permita el hormigonado de 2cm. de espesor en la cara superior del elemento. Para ello colocaremos tabloncitos de madera con la misma altura de la viga alrededor de la misma, y los apoyaremos sobre tacos de 2cm. para anclarlos entre sí con los gatos. Una vez inmobilizados y nivelados en su lugar, se atornillaran entre sí quedando fijados (*ver fotografías 4.128 y 4.129*).



Fotografía 4.128.y 4.129. Encofrado para posterior hormigonado

A continuación, para facilitar la unión de la capa de compresión de hormigón “ultra high” y el elemento constructivo, se repartirá sobre la cara superior una capa de adhesivo para la construcción Sikadur®-31 de la marca Sika. Esta operación se realizará simultáneamente al proceso de amasado del hormigón.



Fotografía 4.130. y 4.131. Preparación del adhesivo Fotografía 4.132. Colocación adhesivo

La dosificación del hormigón de alta resistencia, fue facilitada por uno de los Directores del PFG, José Ramón Albiol. Es importante la utilización de guantes de protección, tanto para su amasado como para su posterior manipulación una vez endurecido, ya que las fibras metálicas que contiene son muy punzantes (ver fotografía 4.135).



Fotografía 4.133. y 4.134. Amasado del hormigón Fotografía 4.135. Fibras metálicas



Preparado el soporte con el Sikadur®-31 y amasado el hormigón, se verterá sobre el encofrado en varias tandas y se nivelara la superficie.



Fotografía 4.136. Vertido del hormigón 1



Fotografía 4.137. Vertido del hormigón 2



Fotografía 4.138. Viga hormigonada con encofrado

Posteriormente se llenarán los moldes de las probetas para los ensayos de resistencia a compresión y flexión programados. Tanto la viga como las probetas se taparán con un plástico para su curado.

Transcurrido un día de hormigonado, procederemos al desencofrado de la viga (*ver fotografía 4.139, 4.140 y 4.141*) y de las probetas (*ver fotografía 4.143*). Para ello, aflojaremos y extraeremos los gatos y desatornillaremos las tablas de madera de contrachapado utilizadas como encofrado



Fotografía 4.139. Retirada de gatos



Fotografía 4.140. y 4.141. Retirada del encofrado



Seguidamente, y una vez las tablas solo quedan ancladas en su sitio por la adhesión al hormigón, con la ayuda de una espátula y una maza se extraera la madera de los laterales, quedando la viga hormigonada exenta de medios auxiliares (ver fotografía 4.142).



Fotografía 4.142. Viga hormigonada sin encofrado



Fotografía 4.143. Probetas hormigón



Las probetas no se introdujeron en cámara ya que la viga no iba a ser introducida y deseábamos obtener resultados comparables en igualdad de condiciones de curado. A continuación se limpiarán todas las herramientas y moldes utilizados y se tapaná la viga y las probetas con un plástico (ver fotografía 4.144).



Fotografía 4.144. Colocación de plástico cubriendo la viga

Para la realización de los ensayos de las probetas a flexión, es necesario realizar una entalla de 1cm de profundidad para provocar la rotura en esa zona.



Fotografía 4.145. Probetas para ensayo a flexión



Fotografía 4.146. Probetas hormigón con entalla

Estos ensayos serán analizados mediante un control de rotura a flexión y compresión a distintos días de curado, extrayendo las conclusiones oportunas.



4.5.8 Ensayo a flexión

Realizaremos el ensayo a flexión con 4 puntos, 2 apoyos y 2 puntos de aplicación de carga, (ver figura 4.5).

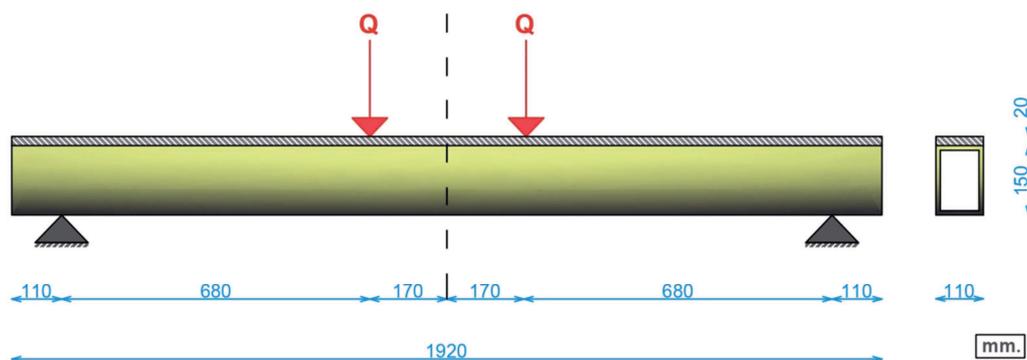


Figura 4.5. Ensayo a flexión con 4 puntos

La máquina utilizada para el ensayo a flexión es la IBERTEST PEF-150-HDA con una capacidad de carga de 150 KN.

Realizado el ensayo, se analizarán los resultados obtenidos, extrayendo las conclusiones necesarias en cuanto a la aplicación práctica del material caracterizado sobre un elemento estructural.



Fotografía 4.147. Ensayo a flexión de la viga



Fotografía 4.148. Rotura viga tras ensayo a flexión



5. ENSAYOS Y RESULTADOS



5. ENSAYOS Y RESULTADOS

Realizados los ensayos de tracción de las probetas con refuerzos de fibra de vidrio y fibra de carbono, resistencia a compresión y flexión de las probetas de hormigón y resistencia a flexión de la viga, nos disponemos a analizar los resultados presentando las conclusiones que se han desarrollado a lo largo de este trabajo y que han influido en la toma de decisiones.

Las máquinas empleadas nos facilitan archivos en formato Excel para su manipulación y elaboración de las gráficas. Estos datos son:

- Fuerza (KN)
- Deformación en carrera (mm), cuando no se ha usado extensómetro.
- Deformación en captador (mm), cuando se ha usado extensómetro.

Para el cálculo de la Tensión (MPa) se utilizará la siguiente fórmula:

$$\frac{\text{Fuerza (KN)} \cdot 1000}{\text{Espesor (mm)} \cdot \text{Sección (mm)}} = \text{Tensión (MPa)}$$

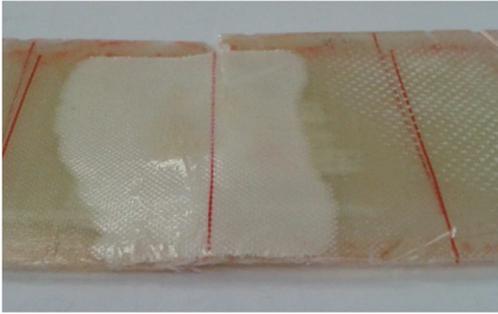
Cuando no se use extensómetro, hay que prevenir medir la distancia entre mordazas para calcular la deformación unitaria según la siguiente fórmula:

$$\frac{\text{Deformación en carrera (mm)}}{\text{L entre mordazas (mm)}} \cdot 100 = \text{Deformación (\%)}$$

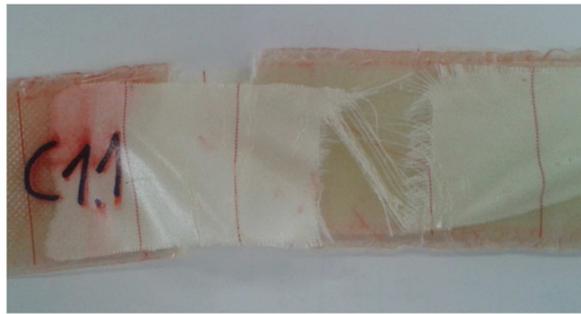
Cuando utilicemos extensómetro, se dividirán los datos obtenidos de la máquina entre la longitud base de deformación, en nuestro caso era de 50mm:

$$\frac{\text{Deformación en captador (mm)}}{50} \cdot 100 = \text{Deformación (\%)}$$

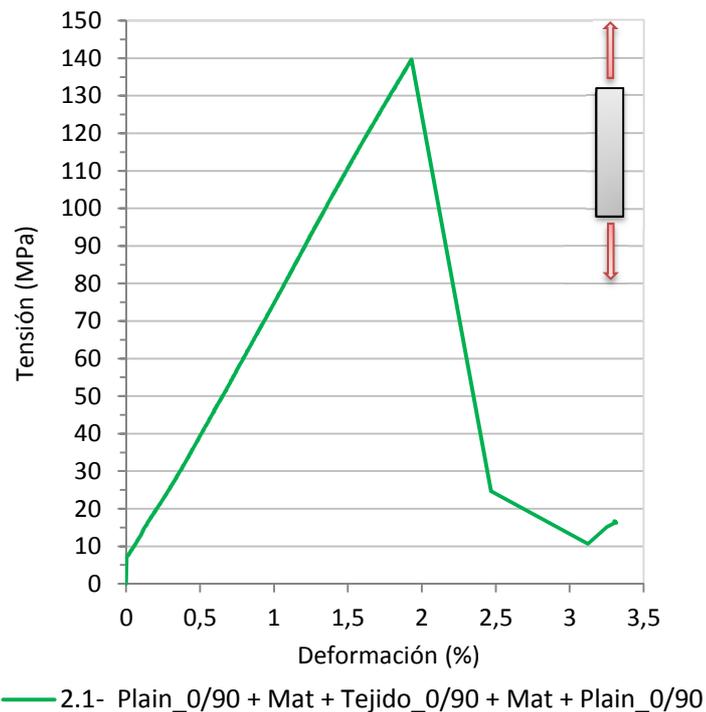
Tras la realización de las primeras gráficas, es evidente que estamos trabajando un material con rotura muy frágil, y la tendencia es que si no se parten la totalidad de las fibras, después de una fuerte caída en fuerza, la máquina volvía a ejercer carga (*ver gráfica 5.1*). Esto pasaba en la mayoría de las probetas ensayadas, ya que el Plain_0/90 no rompía y quedaba al descubierto de la matriz (*ver fotografía 5.1 y 5.2*).



Fotografía 5.1. Rotura Ens. C1.1



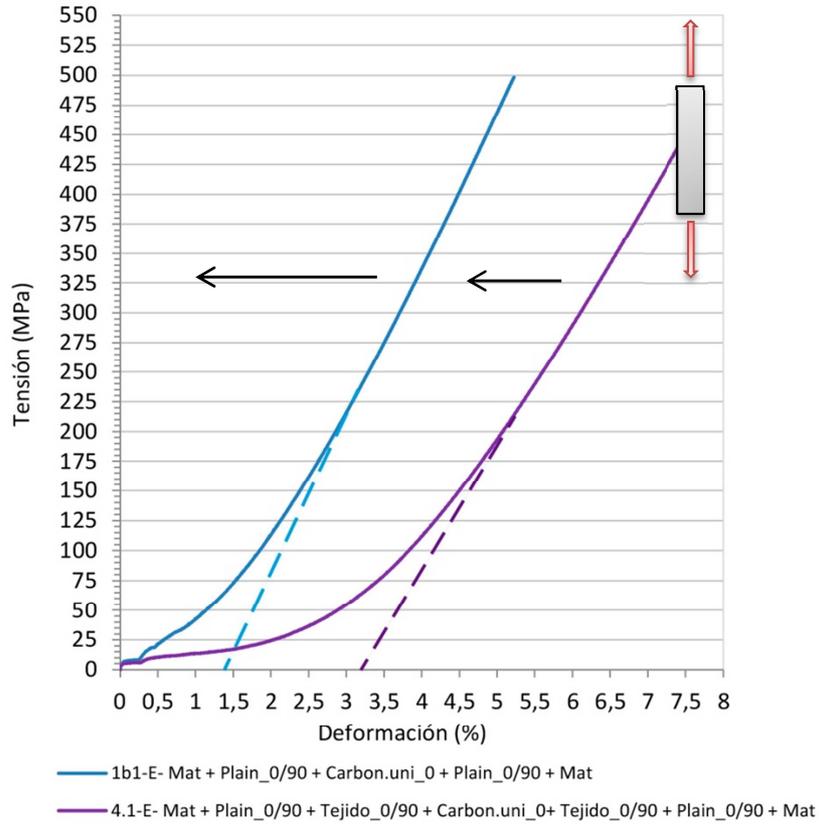
Fotografía 5.2. Rotura Plain_0/90 Ens. C1.1



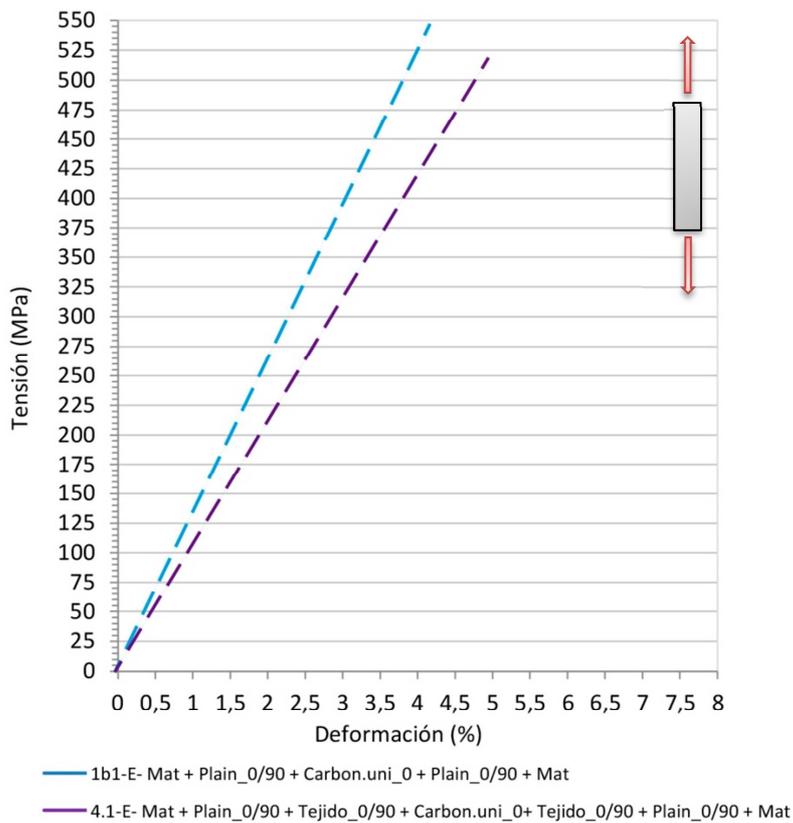
Gráfica 5.1. Comportamiento material post-rotura frágil

Es por éste motivo, que todas las gráficas han sido revisadas, eliminando el comportamiento del material posteriormente a la caída en carga, para facilitar la lectura de las mismas y evitar solapes entre comportamientos de distintas probetas.

También es importante señalar, que por problemas en la utilización de los extensómetros, existen gráficas en los que las curvas de Tensión-Deformación, aparecen claramente desplazadas a la derecha, dando a entender que sufren una mayor deformación cuando sabemos que se trata de una falsedad. Este problema se solucionaría trazando una recta hasta el eje de Deformación (*ver gráfica 5.2*) y posteriormente su paralela hasta el punto (0,0) (*ver gráfica 5.3*)



Gráfica 5.2. Corrección de deformación 1



Gráfica 5.3. Corrección de deformación 2

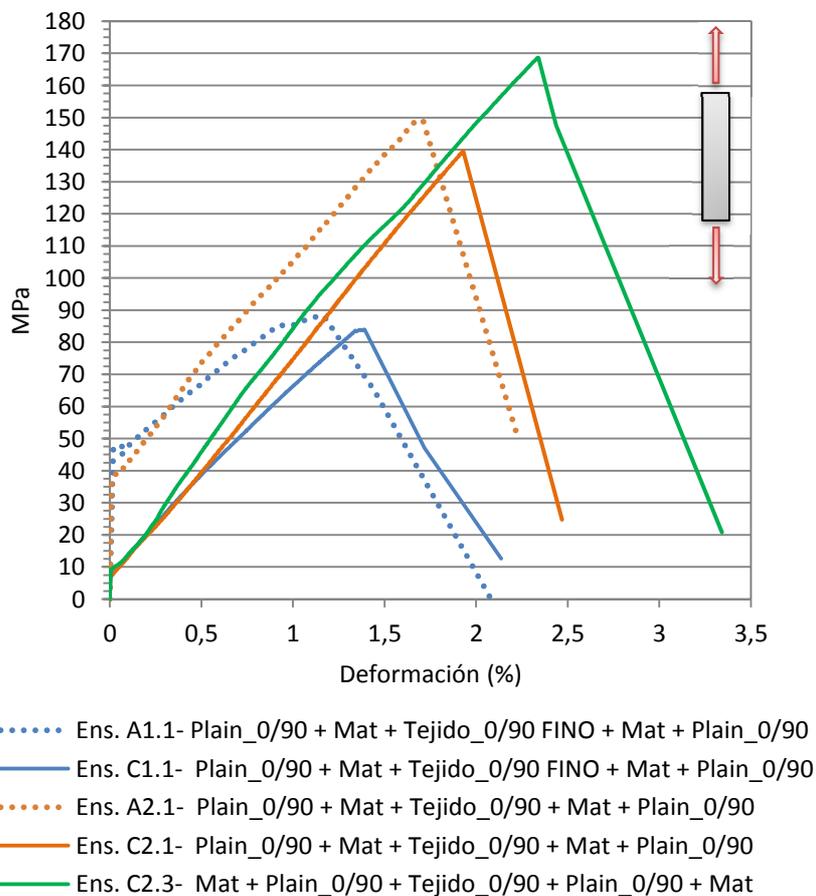


5.1 ENSAYOS PREVIOS

Tras la extracción de resultados mediante los ensayos a tracción de los laminados programados en los ensayos previos, los datos quedarán registrados en la plantilla realizada para ello (*ver tabla 5.1*). Con los archivos Excel facilitados por la máquina de ensayo, y tal y como hemos detallado en la introducción de este apartado, procederemos a elaborar una gráfica que nos ayude a extraer las conclusiones oportunas (*ver gráfica 5.4*).

ENSAYOS PREVIOS									
TIPO	COMPOSICIÓN	MODELO	PROBETA	PESO TELA	PESO TOTAL	ESPESOR	SECCIÓN	KN	MPa
previo	Mat + Velo + Tejido_0/90 + Velo + Mat + Tejido_0/90 + Velo + Tejido_0/90 + Mat	PRUEBA	JOR1	35,92	94,65	3,3	94,35	28,98	93,08
		PRUEBA	MART1	9,37	29,82	1,55	57	35,34	400,00
1	Plain_0/90 + Mat + Tejido_0/90 Fino + Mat + Plain_0/90	1B	Ens A1.1	3,41	5,82	0,85	12,5	0,937	88,19
		C	Ens C1.1	12,07	24,68	1,28	56,8	6,105	83,97
2	Plain_0/90 + Mat + Tejido_0/90 + Mat + Plain_0/90	1B	Ens A2.1	3,65	6,5	1	13,6	2,031	149,34
		C	Ens C2.1	13,19	23,95	1,3	54,75	9,939	139,64
2*	Mat + Plain_0/90 + Tejido_0/90 + Plain_0/90 + Mat	C	Ens C2.3	13	20,02	1,02	54,33	9,349	168,70

Tabla 5.1. Resultados Ensayos Previos



Gráfica 5.4. Tensión-deformación Ensayos Previos



Se puede observar que no existen diferencias sustanciales entre las probetas tipo 1B y 2 (según norma UNE-EN ISO 527-4) con la misma composición, con lo que, si se realizase un estudio muestral más amplio, podría establecerse una relación entre los dos tipos de geometrías. Por este motivo, y dado que la manipulación y el ensayo del tipo C son mucho más fáciles, decidimos continuar con ésta geometría para el resto del trabajo.

Al colocar las láminas de Mat de fibra de vidrio en el exterior, conseguimos que la rotura de la probeta se produjera de manera diferente, aunque en el interior, el Plain_0/90 continuaba sin romperse. A la vez conseguimos un pequeño incremento en la resistencia a tracción, hecho que nos dio la posibilidad de estudiar el comportamiento del material tras éste pequeño cambio. Tras el desarrollo de las conclusiones, nos daremos cuenta de que los resultados no han obtenido la suficiente influencia como para concluir que la colocación de Mat en el exterior mejora la resistencia a tracción.

5.2 PROBETAS CON MATRIZ DE POLIESTER Y EPOXI CURADAS A DIFERENTE TEMPERATURA

Tras el estudio de la documentación al principio de este proyecto, existía información acerca de las mejoras sustanciales que provocaba un post-curado de las piezas a temperaturas elevadas. Es por este motivo, que se decidió insertar en el programa experimental, diferentes temperaturas de curado para una misma tipología de probeta, esperando que los resultados obtenidos reafirmaran lo estudiado.

- Curado ambiente. 24 horas.
- Curado en horno 60°. 2 horas.
- Curado en horno 90°. 2 horas.

Para realizar ésta comparación de una forma ordenada y detallada, ya que por cada tipología se fabricaban 6 probetas, se decidió crear una plantilla que nos ayudara a registrar todos los datos obtenidos en los ensayos, así como las características de cada una de los laminados, introduciendo una fotografía con las diferentes láminas de fibras y la gráfica comparativa de los 6 compuestos, 2 por cada tipo de curado.

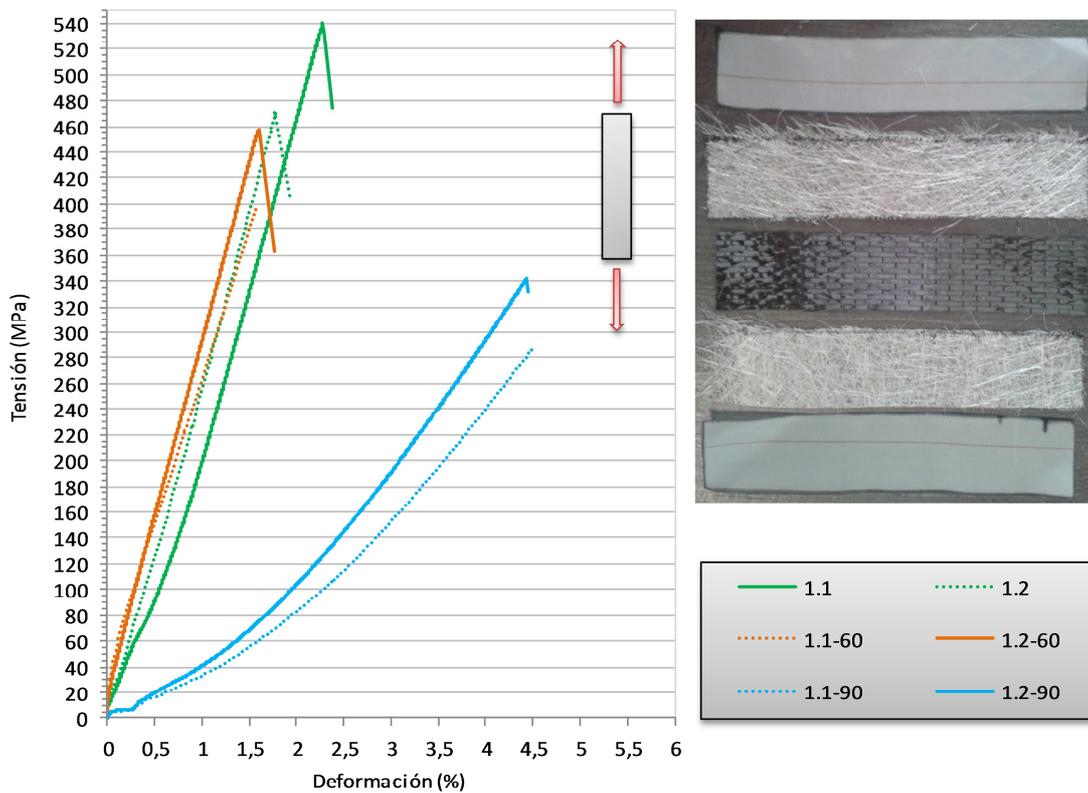
A continuación se muestran las fichas realizadas para este apartado del estudio.



FICHA PROBETAS PROGRAMA EXPERIMENTAL	TIPO 1
--------------------------------------	------------------

COMPONENTES		MATRIZ		COMPOSICIÓN		
Vidrio E + CARBONO		POLIÉSTER		Plain_0/90 + Mat + Carbon.uni_0 + Mat + Plain_0/90		
CURADO	PROBETA	ESPESOR	SECCIÓN	L mordazas (mm)	KN	MPa
AMB.	1.1	1,14	53,56	/50/	33,012	540,66
	1.2	1,18	55,66	/50/	30,957	471,34
60°	1.1-60	1,405	54,895	/50/	30,81	399,47
	1.2-60	1,21	56,18	/50/	31,089	457,34
90°	1.1-90	1,05	56,07	153	16,86	286,38
	1.2-90	1,14	55,21	158	21,55	342,39

L entre mordazas /50/= extensómetro con longitud base de 50mm.



CURADO	PROBETA	PESO TELA	PESO TOTAL	% FIBRAS	Fv (MPa)	Fs
AMB.	1.1	13,92	22,45	62,00	540,66	/
	1.2	13,19	22,41	58,86	471,34	/
60°	1.1-60	12,65	23,2	54,53	399,47	/
	1.2-60	13,77	24,62	55,93	457,34	/
90°	1.1-90	12,95	23,26	55,67	286,38	/
	1.2-90	13,1	23,04	56,86	342,39	/

Límite de rotura (Fv) = Límite elástico (Fs)

OBSERVACIONES:

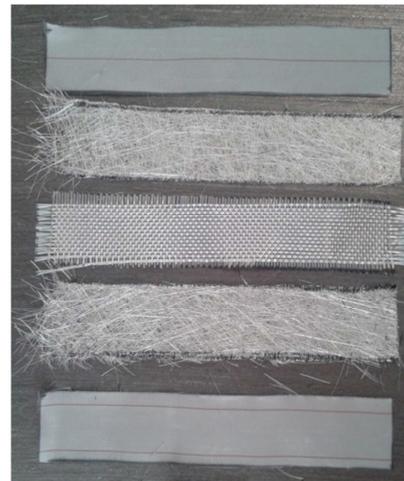
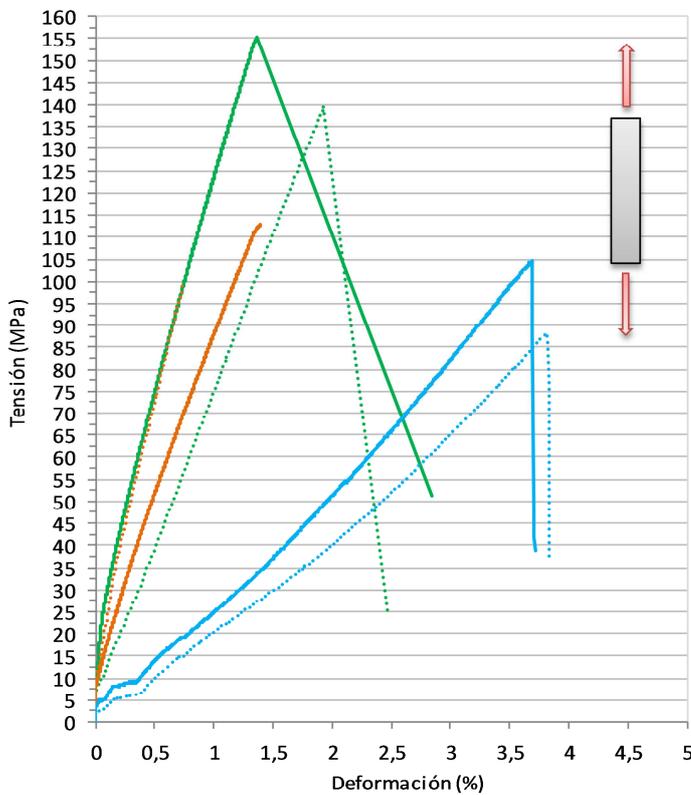
Problemas en los captadores de deformación muestran gráficas con menor módulo de rigidez a simple vista, hecho que se soluciona como se detalla al principio del apartado de Ensayos y Resultados.



FICHA PROBETAS PROGRAMA EXPERIMENTAL	TIPO 2
--------------------------------------	------------------

COMPONENTES		MATRIZ		COMPOSICIÓN		
Vidrio E		POLIÉSTER		Plain_0/90 + Mat + Tejido_0/90 + Mat + Plain_0/90		
CURADO	PROBETA	ESPESOR	SECCIÓN	L mordazas (mm)	KN	MPa
AMB.	2.1	1,3	54,75	/50/	9,939	139,64
	2.2	1,11	55,96	/50/	9,652	155,39
60°	2.1-60	1,06	55,7	/50/	5,85	99,08
	2.2-60	1,15	54,98	/50/	7,132	112,80
90°	2.1-90	1,13	56,02	146	5,59	88,31
	2.2-90	1,03	55,62	163	5,98	104,38

L entre mordazas /50/= extensómetro con longitud base de 50mm.



CURADO	PROBETA	PESO TELA	PESO TOTAL	% FIBRAS	Fv (MPa)	Fs
AMB.	2.1	13,19	23,95	55,07	139,64	/
	2.2	14,65	23,97	61,12	155,39	/
60°	2.1-60	13,17	20,72	63,56	99,08	/
	2.2-60	13,2	22,37	59,01	112,80	/
90°	2.1-90	13,46	22,1	60,90	88,31	/
	2.2-90	13,49	22,48	60,01	104,38	/

Límite de rotura (Fv) = Límite elástico (Fs)

OBSERVACIONES:

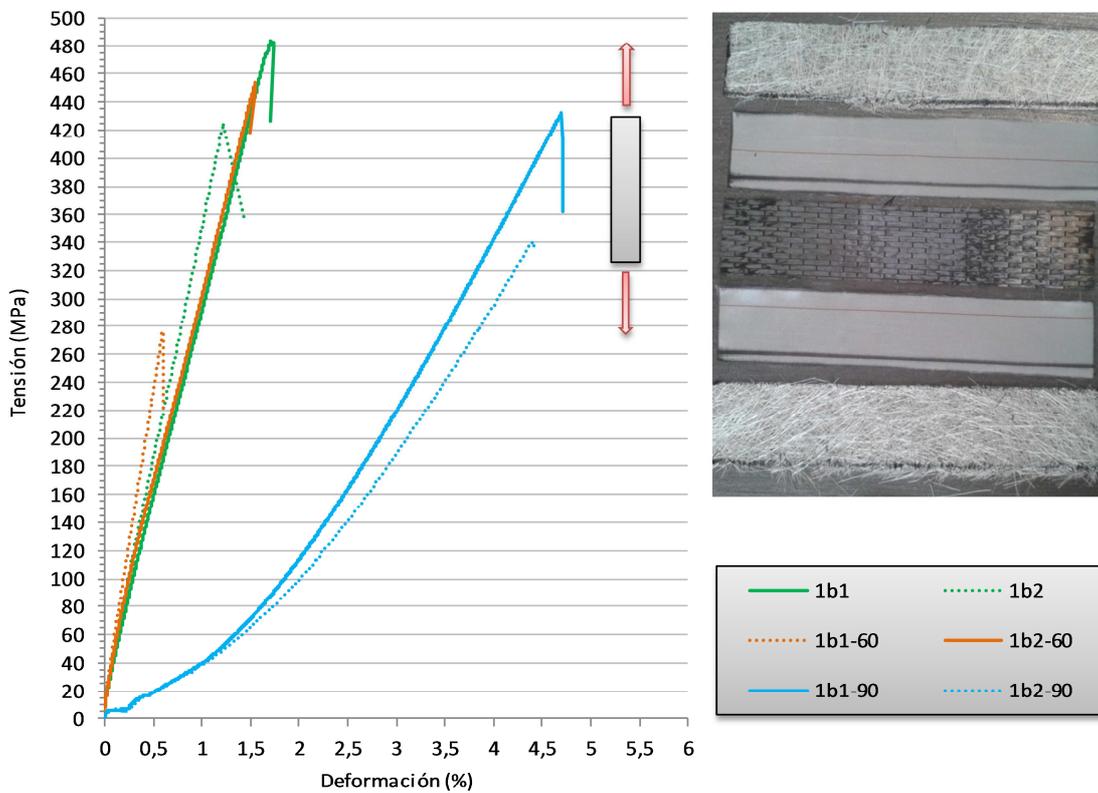
Problemas en los captadores de deformación muestran gráficas con menor módulo de rigidez a simple vista, hecho que se soluciona como se detalla al principio del apartado de Ensayos y Resultados.



FICHA PROBETAS PROGRAMA EXPERIMENTAL	TIPO 1B
--------------------------------------	-------------------

COMPONENTES		MATRIZ		COMPOSICIÓN		
Vidrio E + CARBONO		POLIÉSTER		Mat + Plain_0/90 + Carbon.uni_0 + Plain_0/90 + Mat		
CURADO	PROBETA	ESPESOR	SECCIÓN	L mordazas (mm)	KN	MPa
AMB.	1b1	1,14	55,04	/50/	30,362	483,89
	1b2	1,145	56,24	/50/	27,356	424,82
60°	1b1-60	1,11	56,78	/50/	17,441	276,73
	1b2-60	1,145	57,42	/50/	29,829	453,70
90°	1b1-90	1,07	52,94	169	24,51	432,69
	1b2-90	1,07	51,37	166	18,76	341,30

L entre mordazas /50/= extensómetro con longitud base de 50mm.



CURADO	PROBETA	PESO TELA	PESO TOTAL	% FIBRAS	Fv (MPa)	Fs
AMB.	1b1	13,84	23,56	58,74	483,89	/
	1b2	13,83	24,44	56,59	424,82	/
60°	1b1-60	13,59	23,01	59,06	276,73	/
	1b2-60	13,85	23,73	58,36	453,70	/
90°	1b1-90	13,78	21,41	64,36	432,69	/
	1b2-90	13,82	21	65,81	341,30	/

Límite de rotura (Fv) = Límite elástico (Fs)

OBSERVACIONES:

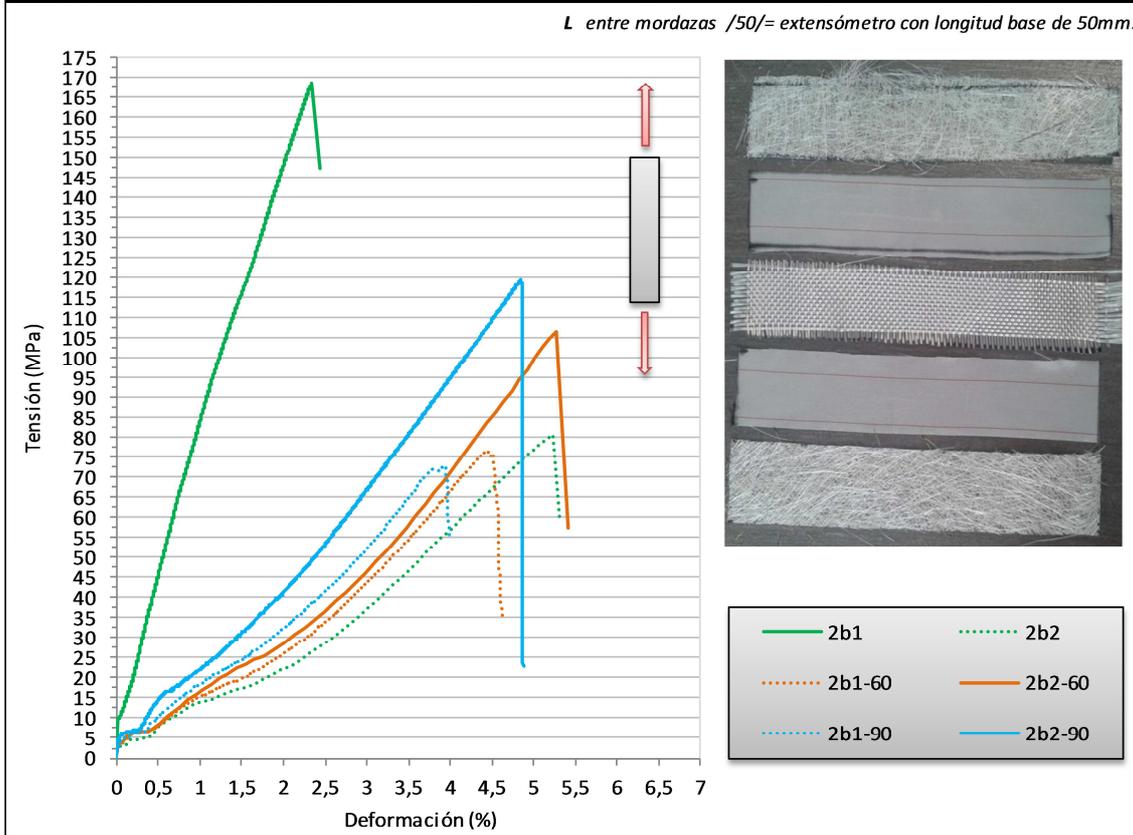
Problemas en los captadores de deformación muestran gráficas con menor módulo de rigidez a simple vista, hecho que se soluciona como se detalla al principio del apartado de Ensayos y Resultados.



FICHA PROBETAS PROGRAMA EXPERIMENTAL	TIPO 2B
--------------------------------------	-------------------

COMPONENTES		MATRIZ		COMPOSICIÓN		
Vidrio E		POLIÉSTER		Mat + Plain_0/90 + Tejido_0/90 + Plain_0/90 + Mat		
CURADO	PROBETA	ESPESOR	SECCIÓN	L mordazas (mm)	KN	MPa
AMB.	2b1	1,02	54,33	/50/	9,349	168,70
	2b2	1,74	55,35	144	7,79	80,89
60°	2b1-60	1,17	52,56	139	4,72	76,75
	2b2-60	1,18	54,71	143	6,89	106,73
90°	2b1-90	1,14	52,48	146	4,37	73,04
	2b2-90	1,095	52,62	145	6,88	119,41

L entre mordazas /50/= extensómetro con longitud base de 50mm.



CURADO	PROBETA	PESO TELA	PESO TOTAL	% FIBRAS	Fv (MPa)	Fs
AMB.	2b1	13	20,02	64,94	168,70	/
	2b2	12,77	25,46	50,16	80,89	/
60°	2b1-60	14,01	21,78	64,33	76,75	/
	2b2-60	13,77	22,18	62,08	106,73	/
90°	2b1-90	13,21	20,52	64,38	73,04	/
	2b2-90	12,82	20,89	61,37	119,41	/

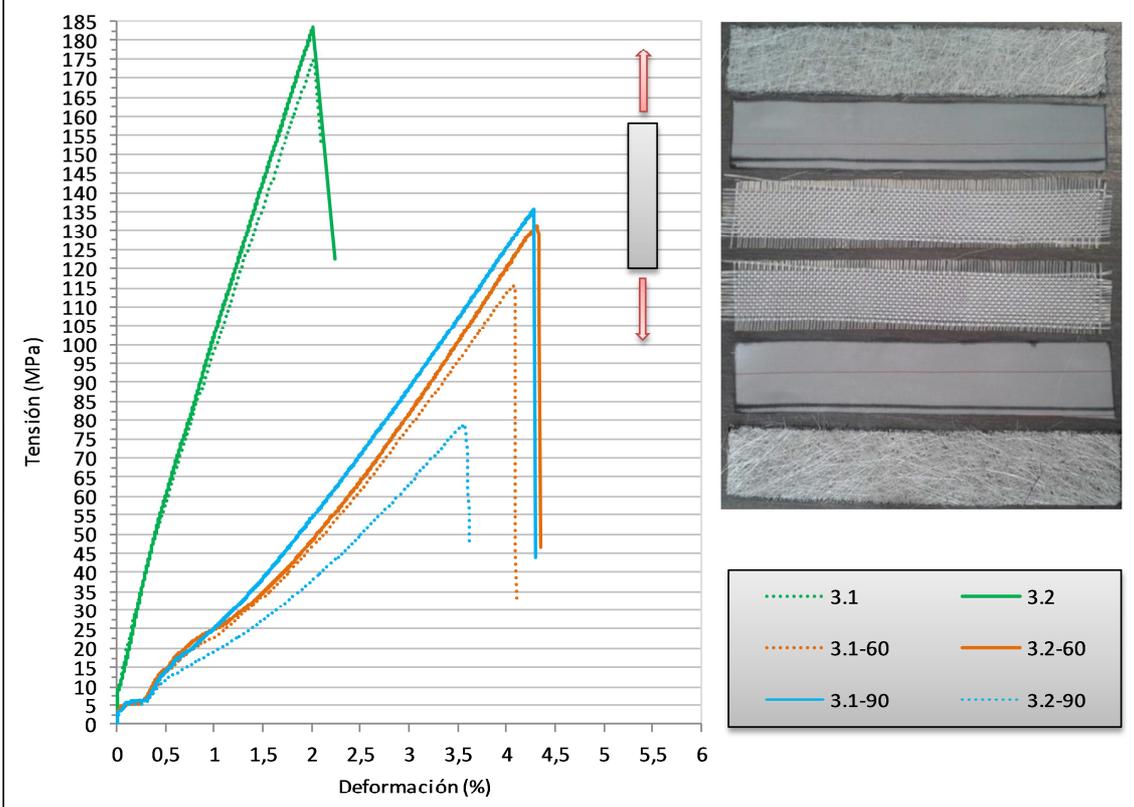
Límite de rotura (Fv) = Límite elástico (Fs)

OBSERVACIONES:
Problemas en los captadores de deformación muestran gráficas con menor módulo de rigidez a simple vista, hecho que se soluciona como se detalla al principio del apartado de Ensayos y Resultados.

FICHA PROBETAS PROGRAMA EXPERIMENTAL **TIPO 3**

COMPONENTES		MATRIZ		COMPOSICIÓN		
Vidrio E		POLIÉSTER		Mat + Plain_0/90 + Tejido_0/90 + Tejido_0/90 + Plain_0/90 + Mat		
CURADO	PROBETA	ESPESOR	SECCIÓN	L mordazas (mm)	KN	MPa
AMB.	3.1	1,245	55,28	/50/	12,012	174,53
	3.2	1,245	53,5	/50/	12,212	183,34
60°	3.1-60	1,3	53,8	149	8,08	115,53
	3.2-60	1,18	55,12	143	8,53	131,15
90°	3.1-90	1,32	55,49	161	9,93	135,57
	3.2-90	1,29	56,1	151	5,7	78,76

L entre mordazas /50/= extensómetro con longitud base de 50mm.



CURADO	PROBETA	PESO TELA	PESO TOTAL	% FIBRAS	Fv (MPa)	Fs
AMB.	3.1	16,97	25,26	67,18	174,53	/
	3.2	17,03	25,35	67,18	183,34	/
60°	3.1-60	16,7	26,6	62,78	115,53	/
	3.2-60	17,36	27,43	63,29	131,15	/
90°	3.1-90	16,15	27,82	58,05	135,57	/
	3.2-90	16,41	26,64	61,60	78,76	/

Limite de rotura (Fv) = Limite elástico (Fs)

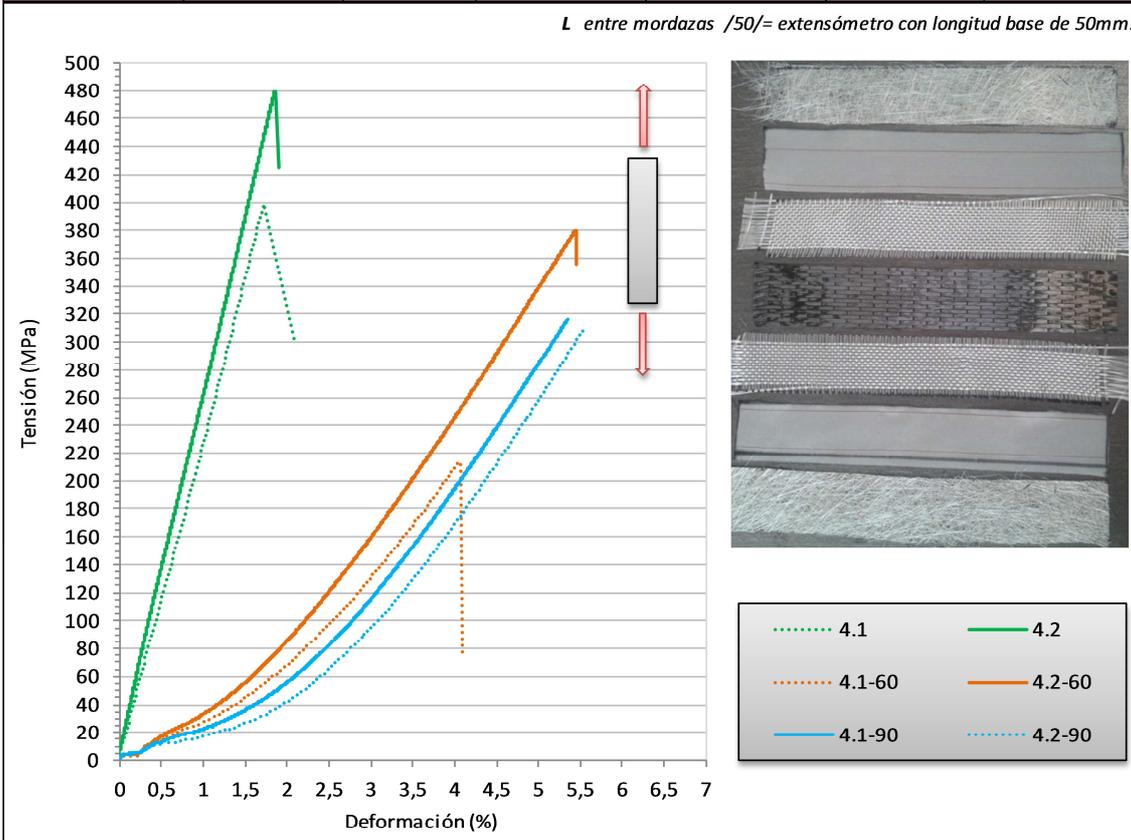
OBSERVACIONES:
Problemas en los captadores de deformación muestran gráficas con menor módulo de rigidez a simple vista, hecho que se soluciona como se detalla al principio del apartado de Ensayos y Resultados.

FICHA PROBETAS PROGRAMA EXPERIMENTAL

TIPO
4

COMPONENTES		MATRIZ		COMPOSICIÓN		
Vidrio E + CARBONO		POLIÉSTER		Mat + Plain_0/90 + Tejido_0/90 + Carbon.uni_0 + Tejido_0/90 + Plain_0/90 + Mat		
CURADO	PROBETA	ESPESOR	SECCIÓN	L mordazas (mm)	KN	MPa
AMB.	4.1	1,625	54,3	/50/	35,202	398,95
	4.2	1,36	53,71	/50/	35,002	479,18
60°	4.1-60	1,5	55,59	153	17,81	213,59
	4.2-60	1,5	55,91	153	31,88	380,13
90°	4.1-90	1,47	55,7	150	25,89	316,20
	4.2-90	1,46	55,8	155	25,26	310,06

L entre mordazas /50/= extensómetro con longitud base de 50mm.



..... 4.1	——— 4.2
..... 4.1-60	——— 4.2-60
——— 4.1-90	..... 4.2-90

CURADO	PROBETA	PESO TELA	PESO TOTAL	% FIBRAS	Fv (MPa)	Fs
AMB.	4.1	19,3	31,25	61,76	398,95	/
	4.2	19,02	29,05	65,47	479,18	/
60°	4.1-60	21,03	31,42	66,93	213,59	/
	4.2-60	20,23	30,68	65,94	380,13	/
90°	4.1-90	19,54	29,98	65,18	316,20	/
	4.2-90	20,02	32,49	61,62	310,06	/

Límite de rotura (Fv) = Límite elástico (Fs)

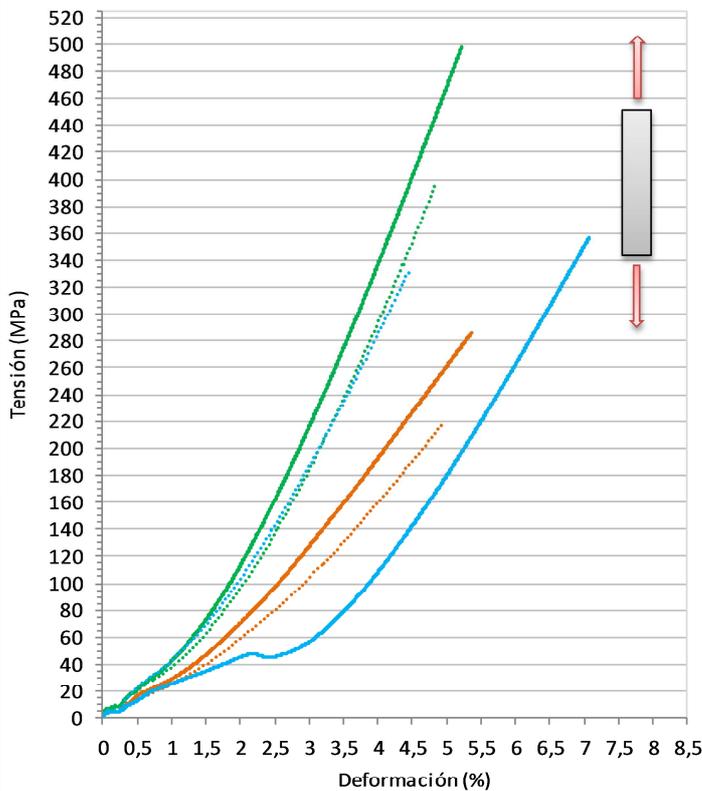
OBSERVACIONES:
Problemas en los captadores de deformación muestran gráficas con menor módulo de rigidez a simple vista, hecho que se soluciona como se detalla al principio del apartado de Ensayos y Resultados.



FICHA PROBETAS PROGRAMA EXPERIMENTAL	TIPO 1B-E
--------------------------------------	---------------------

COMPONENTES		MATRIZ		COMPOSICIÓN		
Vidrio E + CARBONO		EPOXI		Mat + Plain_0/90 + Carbon.uni_0 + Plain_0/90 + Mat		
CURADO	PROBETA	ESPESOR	SECCIÓN	L mordazas (mm)	KN	MPa
AMB.	1b1-E	1,03	53,5	166	27,48	498,68
	1b2-E	1,09	52,77	160	22,83	396,91
60°	1b1-60-E	1,91	53,33	154	29,19	286,57
	1b2-60-E	1,81	52,7	161	20,85	218,58
90°	1b1-90-E	1,66	53,1	155	31,48	357,13
	1b2-90-E	1,325	53,07	163	23,4	332,78

L entre mordazas /50/= extensómetro con longitud base de 50mm.



CURADO	PROBETA	PESO TELA	PESO TOTAL	% FIBRAS	Fv (MPa)	Fs
AMB.	1b1-E	13,15	20,02	65,68	498,68	/
	1b2-E	13,36	21,25	62,87	396,91	/
60°	1b1-60-E	14,08	25,57	55,06	286,57	/
	1b2-60-E	13,77	24,49	56,23	218,58	/
90°	1b1-90-E	14,05	22,71	61,87	357,13	/
	1b2-90-E	13,32	19,99	66,63	332,78	/

Límite de rotura (Fv) = Límite elástico (Fs)

OBSERVACIONES:

Problemas en los captadores de deformación muestran gráficas con menor módulo de rigidez a simple vista, hecho que se soluciona como se detalla al principio del apartado de Ensayos y Resultados.

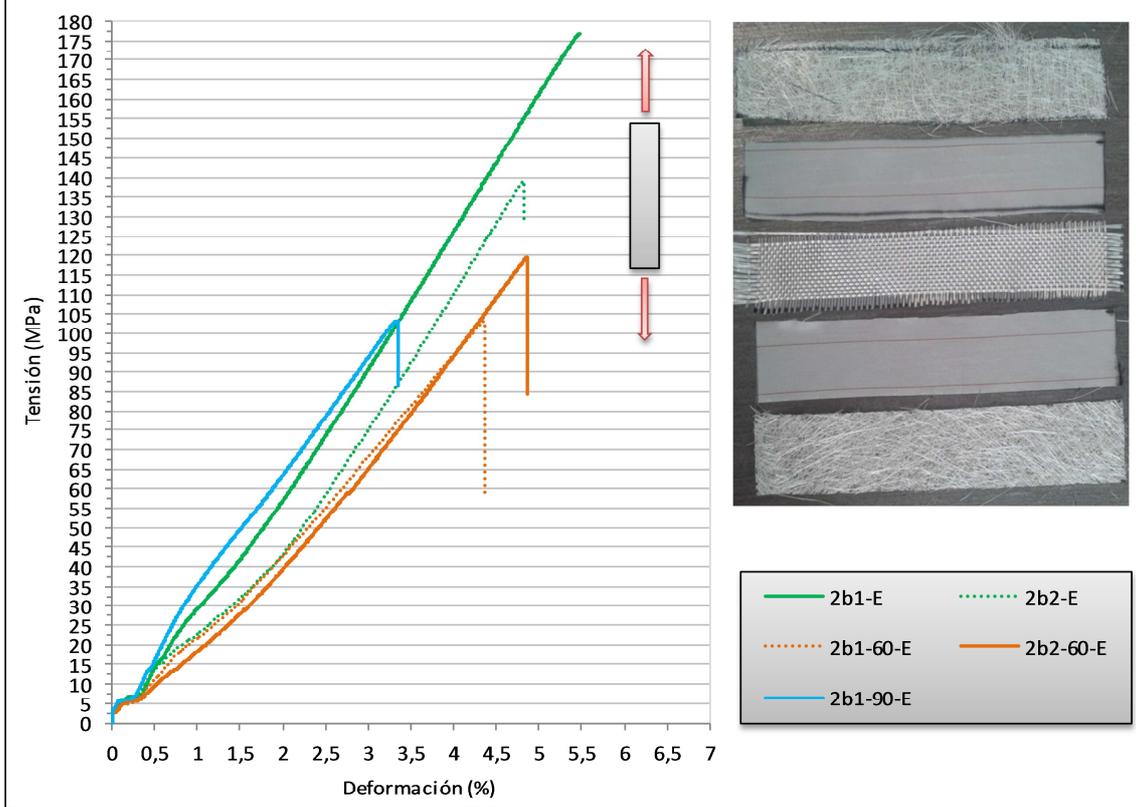


FICHA PROBETAS PROGRAMA EXPERIMENTAL

TIPO
2B-E

COMPONENTES		MATRIZ		COMPOSICIÓN		
Vidrio E		EPOXI		Mat + Plain_0/90 + Tejido_0/90 + Plain_0/90 + Mat		
CURADO	PROBETA	ESPESOR	SECCIÓN	L mordazas (mm)	KN	MPa
AMB.	2b1-E	1,19	53,65	145	11,3	177,00
	2b2-E	1,28	52,87	151	9,41	139,05
60°	2b1-60-E	1,7	51,35	163	9,02	103,33
	2b2-60-E	1,45	51,62	169	8,95	119,57
90°	2b1-90-E	1,41	53,07	167	7,73	103,30
	2b2-90-E	...	...	...	...	...

L entre mordazas /50/= extensómetro con longitud base de 50mm.



CURADO	PROBETA	PESO TELA	PESO TOTAL	% FIBRAS	Fv (MPa)	Fs
AMB.	2b1-E	12,98	23	56,43	177,00	/
	2b2-E	13,68	23,54	58,11	139,05	/
60°	2b1-60-E	13,55	24,76	54,73	103,33	/
	2b2-60-E	13,59	24,92	54,53	119,57	/
90°	2b1-90-E	12,93	21,13	61,19	103,30	/
	2b2-90-E	13,08	...	...	...	/

Límite de rotura (Fv) = Límite elástico (Fs)

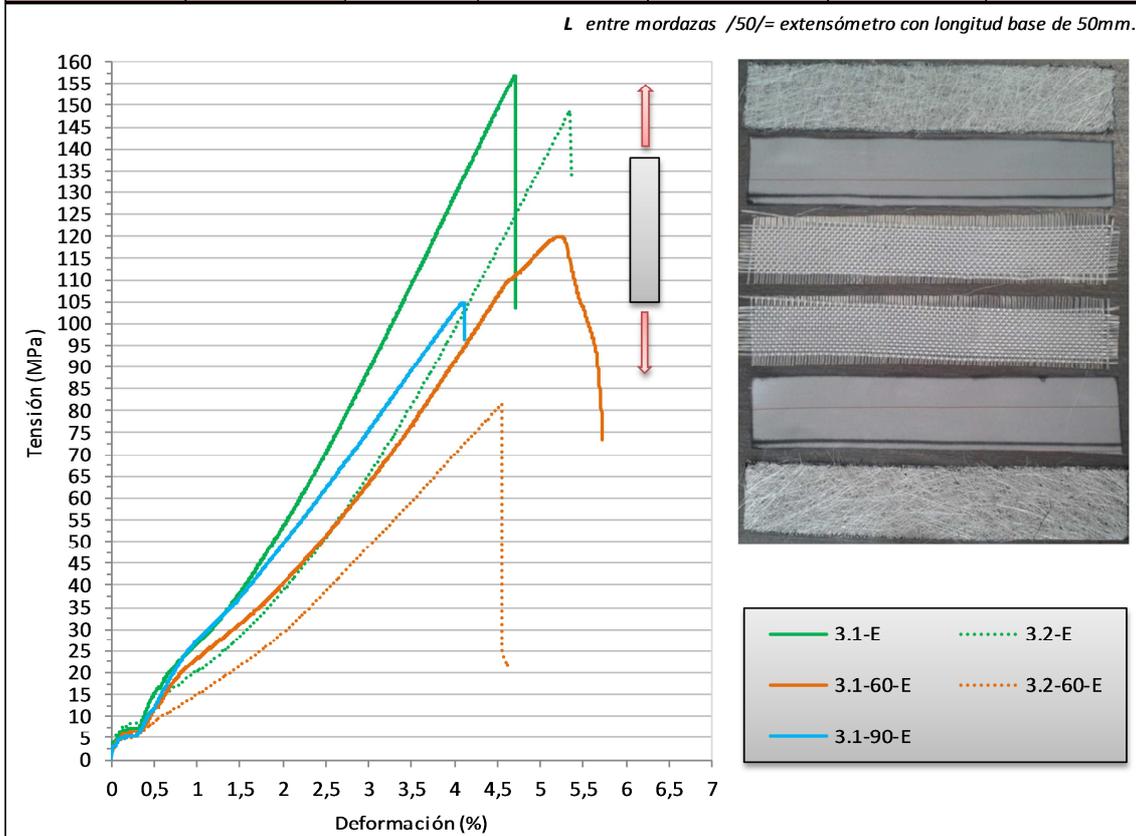
OBSERVACIONES:
Problemas en los captadores de deformación muestran gráficas con menor módulo de rigidez a simple vista, hecho que se soluciona como se detalla al principio del apartado de Ensayos y Resultados.



FICHA PROBETAS PROGRAMA EXPERIMENTAL	TIPO 3-E
--------------------------------------	--------------------

COMPONENTES		MATRIZ		COMPOSICIÓN		
Vidrio E		EPOXI		Mat + Plain_0/90 + Tejido_0/90 + Tejido_0/90 + Plain_0/90 + Mat		
CURADO	PROBETA	ESPESOR	SECCIÓN	L mordazas (mm)	KN	MPa
AMB.	3.1-E	1,23	53,33	153	10,28	156,72
	3.2-E	1,27	52,96	145	10,01	148,83
60°	3.1-60-E	1,89	52,11	164	11,82	120,01
	3.2-60-E	1,92	52,52	165	8,22	81,52
90°	3.1-90-E	1,86	52,78	150	10,28	104,72
	3.2-90-E	...	...	...	...	...

L entre mordazas /50/= extensómetro con longitud base de 50mm.



CURADO	PROBETA	PESO TELA	PESO TOTAL	% FIBRAS	Fv (MPa)	Fs
AMB.	3.1-E	15,63	24,66	63,38	156,72	/
	3.2-E	16,88	26,09	64,70	148,83	/
60°	3.1-60-E	16,91	32,05	52,76	120,01	/
	3.2-60-E	17,07	27,27	62,60	81,52	/
90°	3.1-90-E	16,46	25,7	64,05	104,72	/
	3.2-90-E	16,55	...	...	...	...

Límite de rotura (Fv) = Límite elástico (Fs)

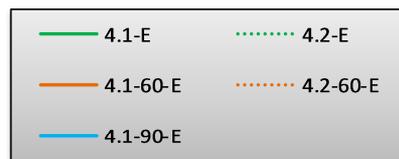
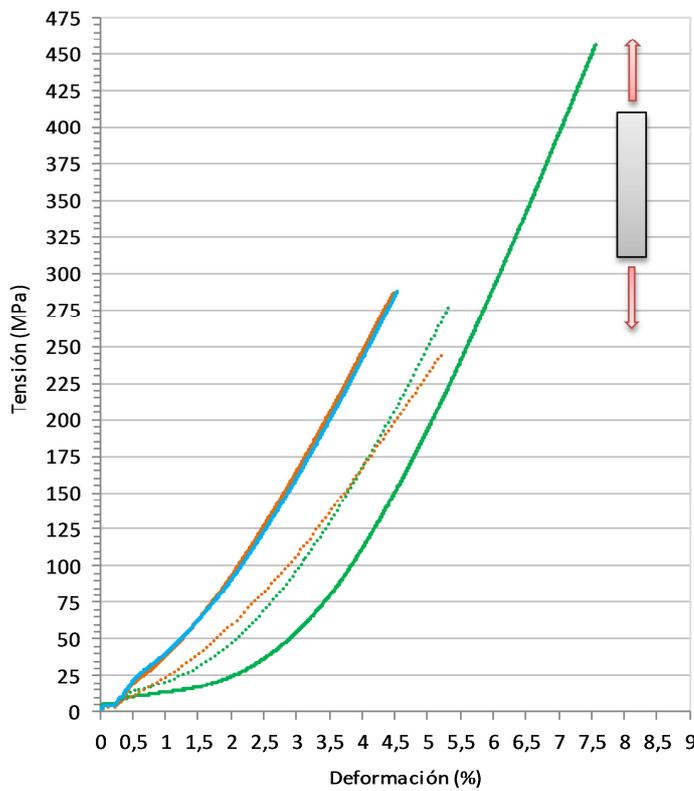
OBSERVACIONES:
Problemas en los captadores de deformación muestran gráficas con menor módulo de rigidez a simple vista, hecho que se soluciona como se detalla al principio del apartado de Ensayos y Resultados.



FICHA PROBETAS PROGRAMA EXPERIMENTAL	TIPO 4-E
--------------------------------------	--------------------

COMPONENTES		MATRIZ		COMPOSICIÓN		
Vidrio E + CARBONO		EPOXI		Mat + Plain_0/90 + Tejido_0/90 + Carbon.uni_0 + Tejido_0/90 + Plain_0/90 + Mat		
CURADO	PROBETA	ESPESOR	SECCIÓN	L mordazas (mm)	KN	MPa
AMB.	4.1-E	1,39	54,77	144	34,7	455,80
	4.2-E	1,53	54,71	139	23,28	278,12
60°	4.1-60-E	1,85	52,86	165	28,07	287,04
	4.2-60-E	1,99	52,54	157	25,62	245,04
90°	4.1-90-E	1,785	53,41	159	27,45	287,93
	4.2-90-E	...	...	...	...	...

L entre mordazas /50/= extensómetro con longitud base de 50mm.



CURADO	PROBETA	PESO TELA	PESO TOTAL	% FIBRAS	Fv (MPa)	Fs
AMB.	4.1-E	19	28,01	67,83	455,80	/
	4.2-E	20,06	31,13	64,44	278,12	/
60°	4.1-60-E	18,77	30,01	62,55	287,04	/
	4.2-60-E	19,34	30,12	64,21	245,04	/
90°	4.1-90-E	19,64	30,72	63,93	287,93	/
	4.2-90-E	19,55	...	...	...	/

Límite de rotura (Fv) = Límite elástico (Fs)

OBSERVACIONES:

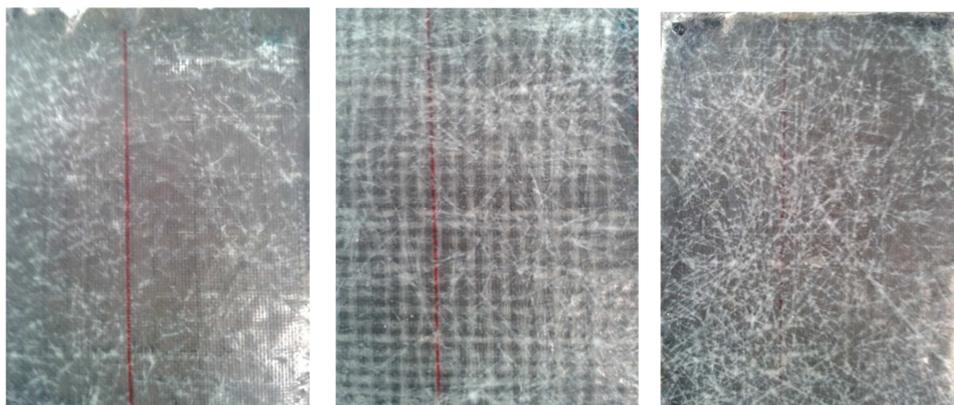
Problemas en los captadores de deformación muestran gráficas con menor módulo de rigidez a simple vista, hecho que se soluciona como se detalla al principio del apartado de Ensayos y Resultados.



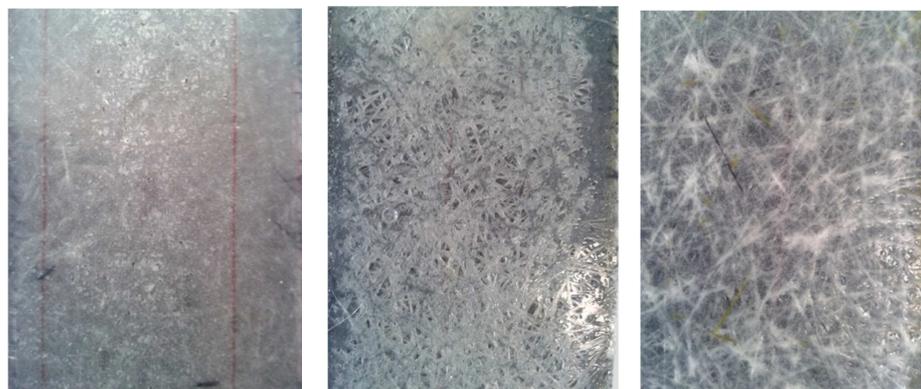
Los resultados obtenidos en cuanto a la mejora de la resistencia a medida que aumentamos la temperatura de curado no son los esperados. Tanto en resina de poliéster como en resina epoxi, la resistencia sufre una caída del curado ambiente al curado en horno. No se aprecian diferencias notables entre curado en horno a 60° y 90°.

Esto puede ser por el proceso de moldeo, contacto a mano, ya que, aun intentando estandarizarlo lo máximo posible, existen muchos factores incontrolables por la persona, como el aire ocluido en los laminados o la capacidad de conseguir piezas idénticas, con porcentajes de fibras y matriz iguales. Deberíamos continuar estudiando éste comportamiento mediante otros procesos de moldeo, ya que por contacto a mano los resultados no han sido satisfactorios.

Las probetas 2b2-90-E, 3.2-90-E y 4.2-90-E, no se realizaron por falta de material, en concreto, resina epoxi.



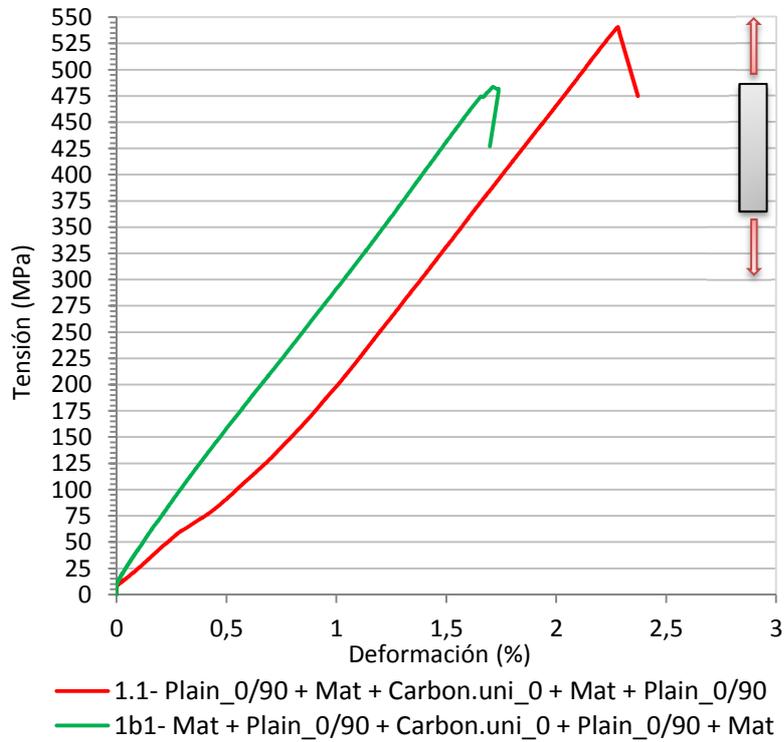
Fotografía 5.3 Curado poliéster ambiente/60/90



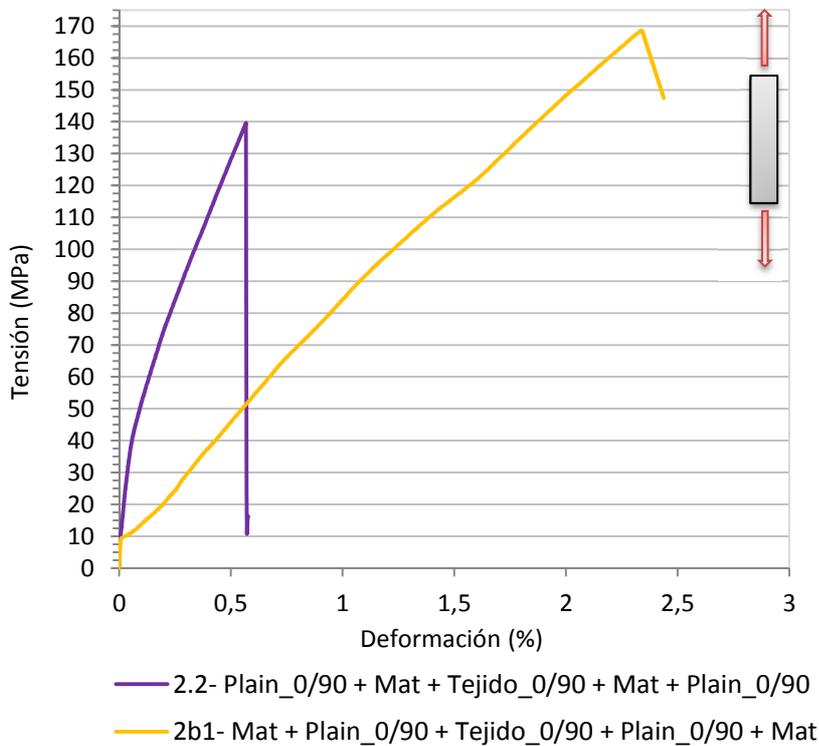
Fotografía 5.4 Curado epoxi ambiente/60/90



5.2 PROBETAS SEGÚN COLOCACIÓN DE FIBRA PLAIN_0/90 EN INTERIOR/EXTERIOR EN MATRIZ DE RESINA DE POLIÉSTER



Gráfica 5.5 Tensión-deformación probeta tipo 1.1-1b1



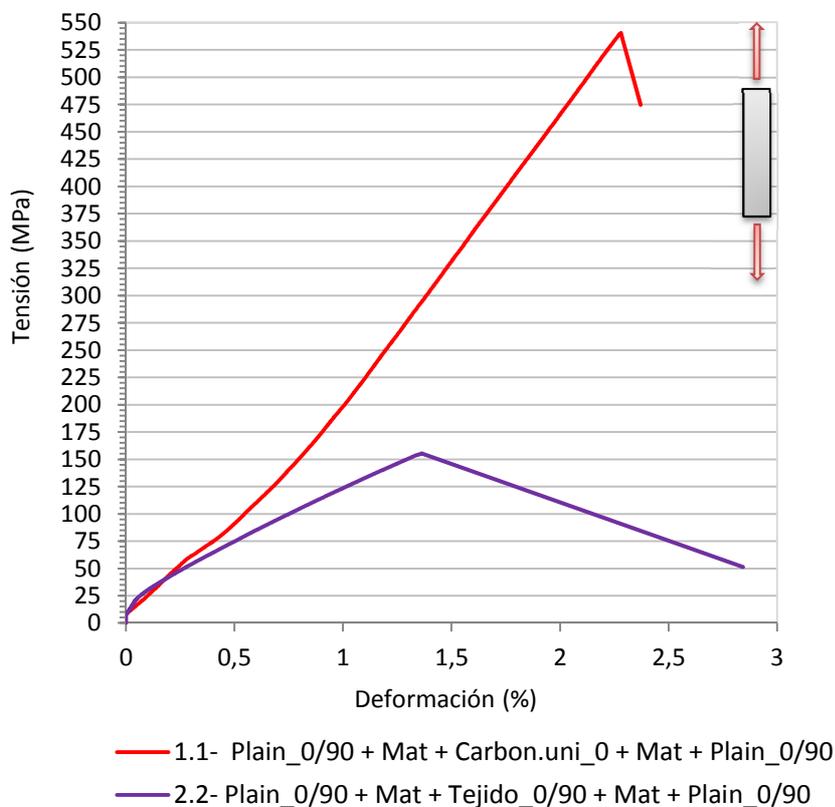
Gráfica 5.6 Tensión-deformación probeta tipo 2.2-2b1



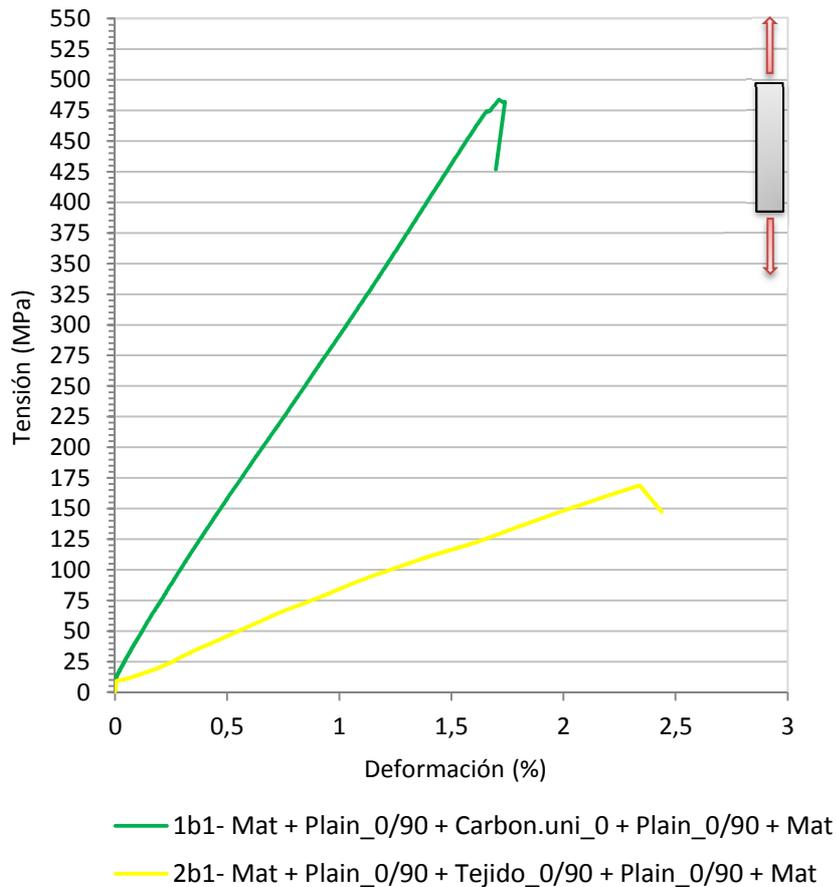
Tras los ensayos previos, se decidió programar probetas que alternaran ésta colocación de la fibra Plain_0/90. Observamos que no se muestran evidencias claras que permitan concluir que la colocación de Mat en el exterior mejore las características mecánicas siendo útil el cambio (ver gráfica 5.5 y 5.6).

5.3 PROBETAS CON SUSTITUCIÓN DE TEJIDO_0/90 POR FIBRA DE CARBONO EN MATRIZ DE RESINA DE POLIÉSTER

Con la incorporación de la fibra de carbono, esperamos obtener una mejora sustancial, dando un gran salto en cuanto a resistencia a tracción. El aumento de la resistencia es considerable (ver gráfica 5.7 y 5.8). Además, el módulo de rigidez es mayor al utilizar la fibra de carbono, permitiéndonos una mayor capacidad de carga mientras que obtenemos una deformación menor. Esto es un dato interesante ya que al utilizarlo estructuralmente, nos permitiría reducir la flecha de una viga situándolo como refuerzo en la cara inferior de la misma.



Gráfica 5.7 Tensión-deformación probeta tipo 1.1-2.2

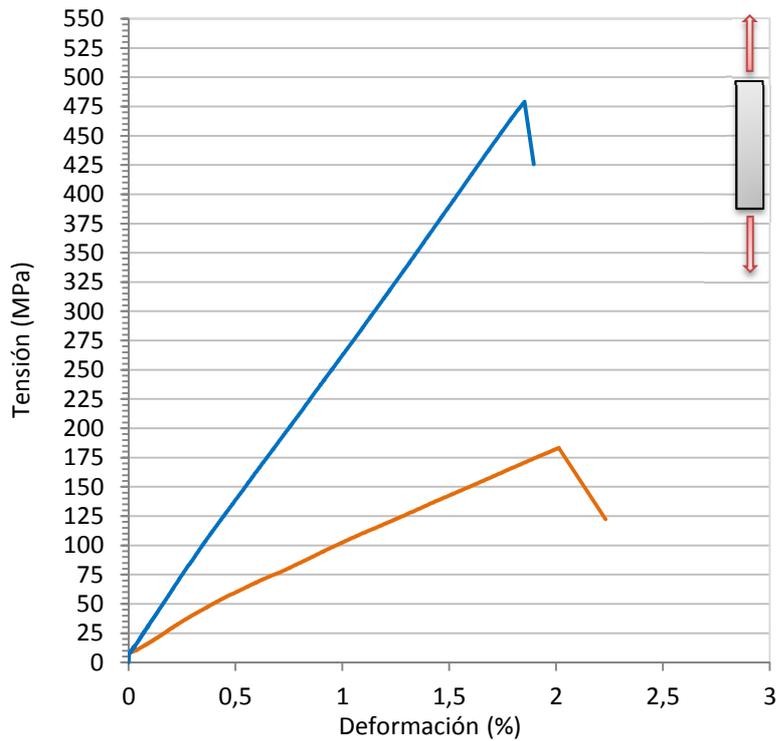


Gráfica 5.8 Tensión-deformación probeta tipo 1b1-2b1

5.4 PROBETAS CON INTRODUCCIÓN DE FIBRA DE CARBONO EN LAS FIBRAS EXISTENTES EN MATRIZ DE RESINA DE POLIÉSTER

Al igual que en el caso anterior, cuando se sustituía el Tejido_0/90, la mejora en cuanto a resistencia, así como el aumento del módulo de rigidez, es sustancial y satisfactorio. En éste caso se introducía una lámina de fibra de carbono en la parte central del laminado, entre dos capas de Tejido_0/90 de fibra de vidrio obteniendo los mismos resultados (ver gráfica 5.9).

Con ésta, y las anteriores comparaciones, podemos concluir de manera firme que la utilización de fibra de carbono aumenta la resistencia a tracción y el módulo de rigidez.



— 3.2- Mat + Plain_0/90 + Tejido_0/90 + Tejido_0/90 + Plain_0/90 + Mat

— 4.2- Mat + Plain_0/90 + Tejido_0/90 + Carbon.uni_0+ Tejido_0/90 + Plain_0/90 + Mat

Gráfica 5.9 Tensión-deformación probeta tipo 3.2-4.2

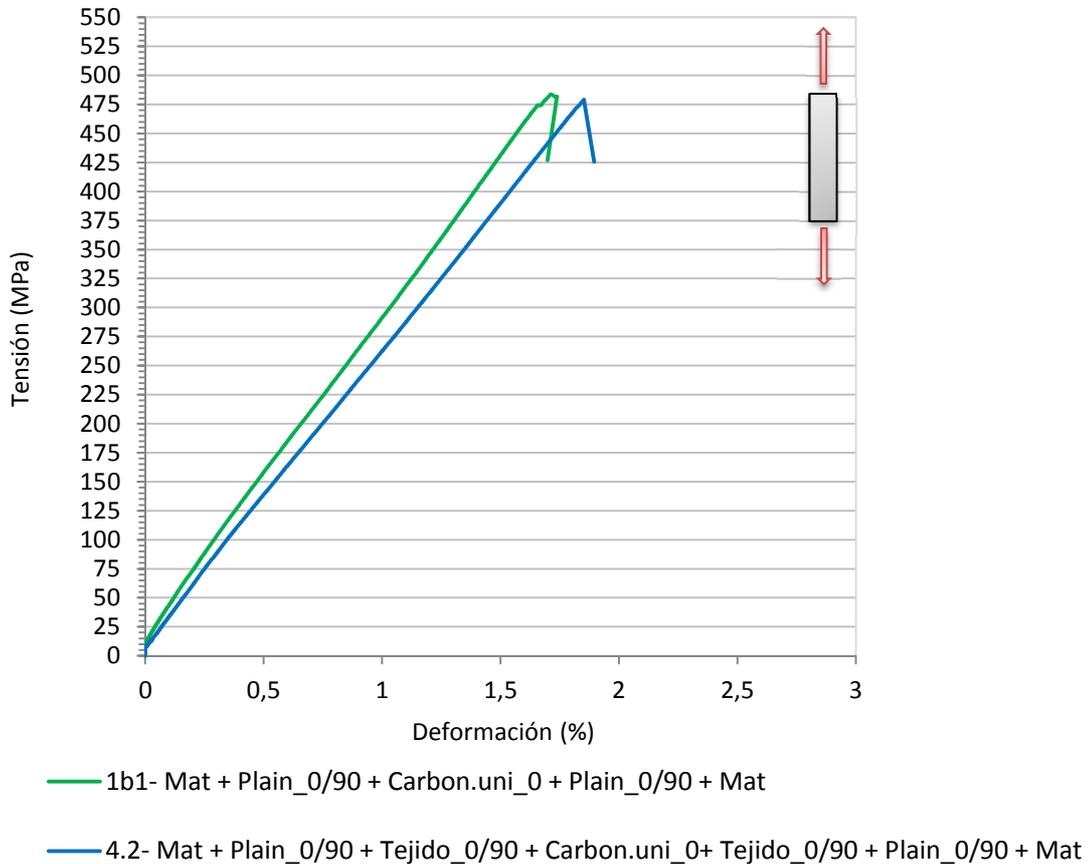
5.5 PROBETAS CON AUMENTO DE VOLUMEN DE FIBRAS DE VIDRIO EN MATRIZ DE RESINA DE POLIÉSTER

Parecía interesante estudiar el comportamiento de un laminado y su homólogo aumentando la cantidad de fibra de vidrio. Para ello se realizó un laminado con las mismas características al que comparar y se le añadieron dos láminas de Tejido_0/90. Los resultados obtenidos aparecen en la siguiente gráfica (*ver gráfica 5.10*).

La resistencia del material no mejora por más volumen de fibras que se coloquen. Sabemos que la cantidad óptima de fibras en un laminado es del 60%, por lo que éste dato es el que tendrá influencia a la hora de controlar las cantidades. El constituir un laminado con más cantidad de fibras, necesitará mayor cantidad de resina para su impregnado, manteniendo la relación refuerzo/matriz.



Además, es evidente que la resistencia a tracción no presenta mejoras, por lo que se tendrá en cuenta siempre la economía del material, ahorrando en cantidad de fibras y obteniendo piezas con las mismas prestaciones.

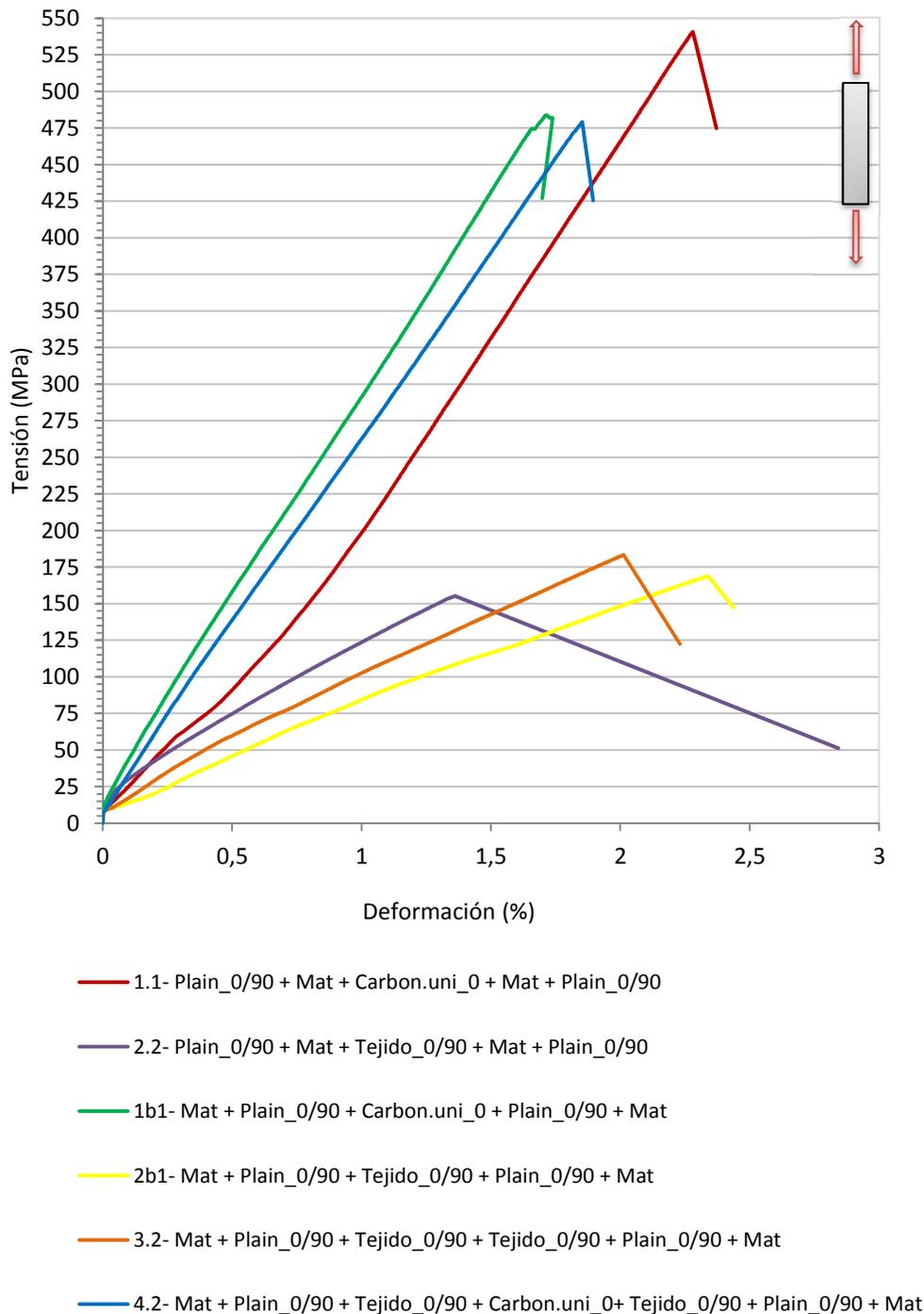


Gráfica 5.10 Tensión-deformación probeta tipo 1b1-4.2

5.6 RESULTADOS TENSIÓN-DEFORMACIÓN DE PROBETAS CON MATRIZ DE POLIÉSTER

A modo de resumen, comparamos la totalidad de las tipologías conformadas con matriz de resina de poliéster (*ver gráfica 5.11*). Se distingue a simple vista las tipologías que contienen fibra de carbono de las que únicamente están laminadas con fibra de vidrio, tanto por su elevada resistencia como por la pendiente de la gráfica, que nos indica el módulo de rigidez.

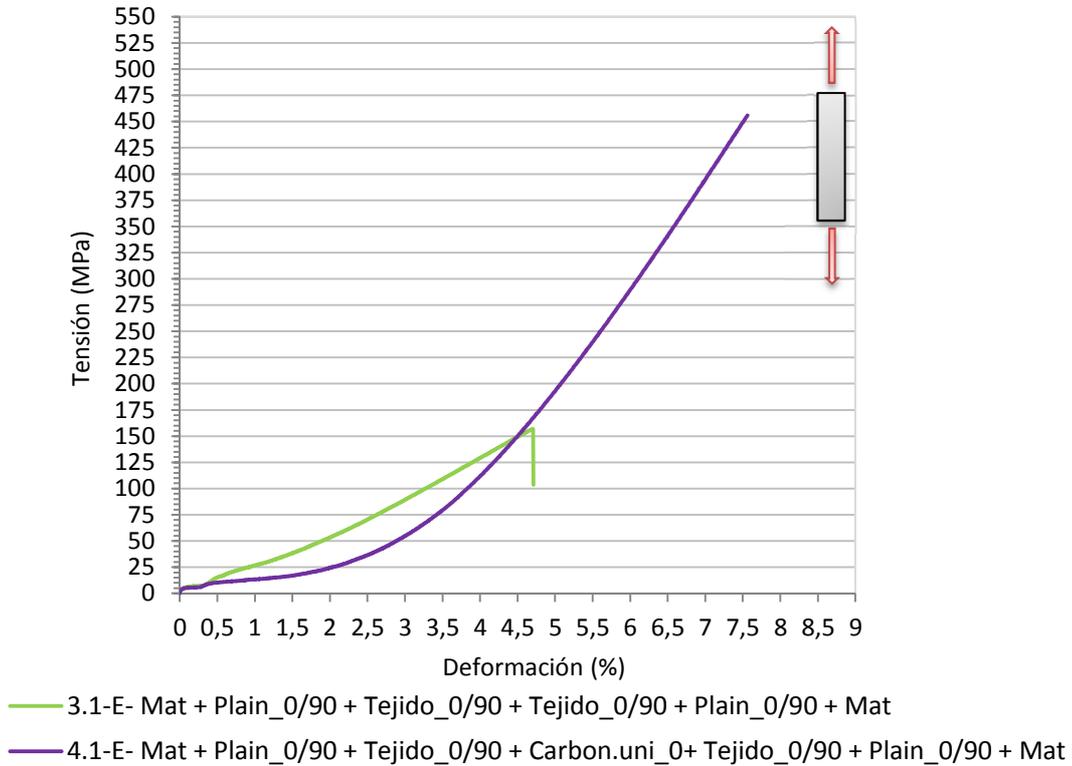
También observamos que no hay ninguna disposición de láminas, dentro del grupo de probetas que contienen fibra de carbono y del grupo de probetas que únicamente llevan fibra de vidrio, que destaque sobre las demás.



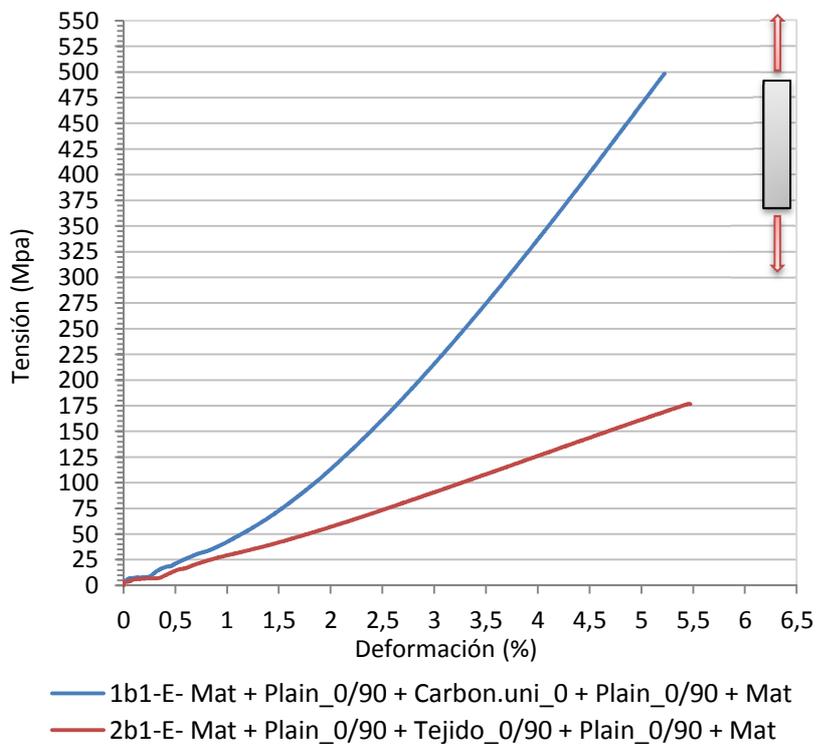
Gráfica 5.11 Tensión-deformación probetas con matriz de poliéster



5.7 PROBETAS CON INTRODUCCIÓN DE FIBRA DE CARBONO EN LAS FIBRAS EXISTENTES EN MATRIZ DE RESINA EPOXI



Gráfica 5.12 Tensión-deformación probeta tipo 3.1E-4.1E

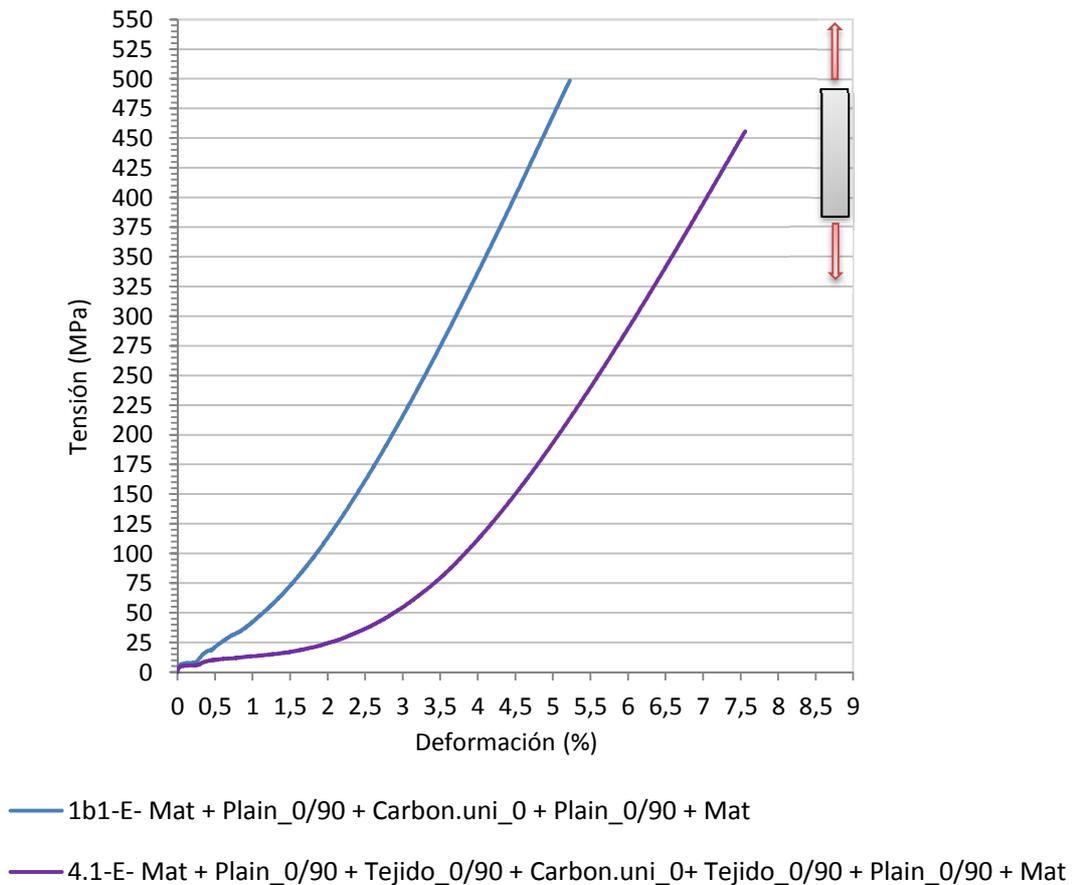


Gráfica 5.13 Tensión-deformación probeta tipo 1b1E-2b1E



El comportamiento del laminado de resina epoxi con la introducción de una lámina de fibra de carbono, nos lleva a las mismas conclusiones extraídas que en una pieza conformada con resina de poliéster, mayor resistencia y mayor módulo de rigidez (ver gráfica 5.12 y 5.13).

5.8 PROBETAS CON AUMENTO DE VOLUMEN DE FIBRAS DE VIDRIO EN MATRIZ DE RESINA EPOXI

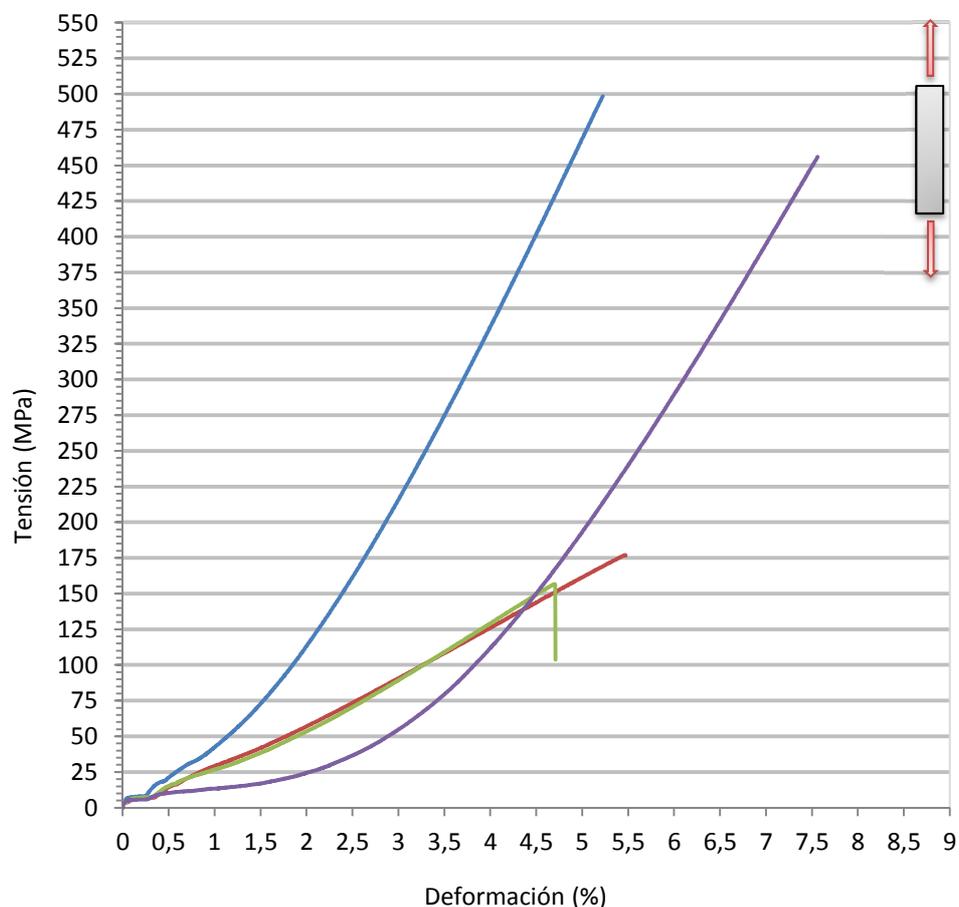


Gráfica 5.14 Tensión-deformación probeta tipo 1b1E-4.1E

No se aprecian apenas mejoras al incorporar más láminas de fibra de vidrio, lo que realmente da resistencia y rigidez a la probeta es la incorporación de fibra de carbono (ver gráfica 5.14). No sería rentable colocar gran número de fibras de vidrio con la finalidad de obtener más resistencia, ya que no varía.



5.9 RESULTADOS TENSIÓN-DEFORMACIÓN DE PROBETAS CON MATRIZ EPOXI



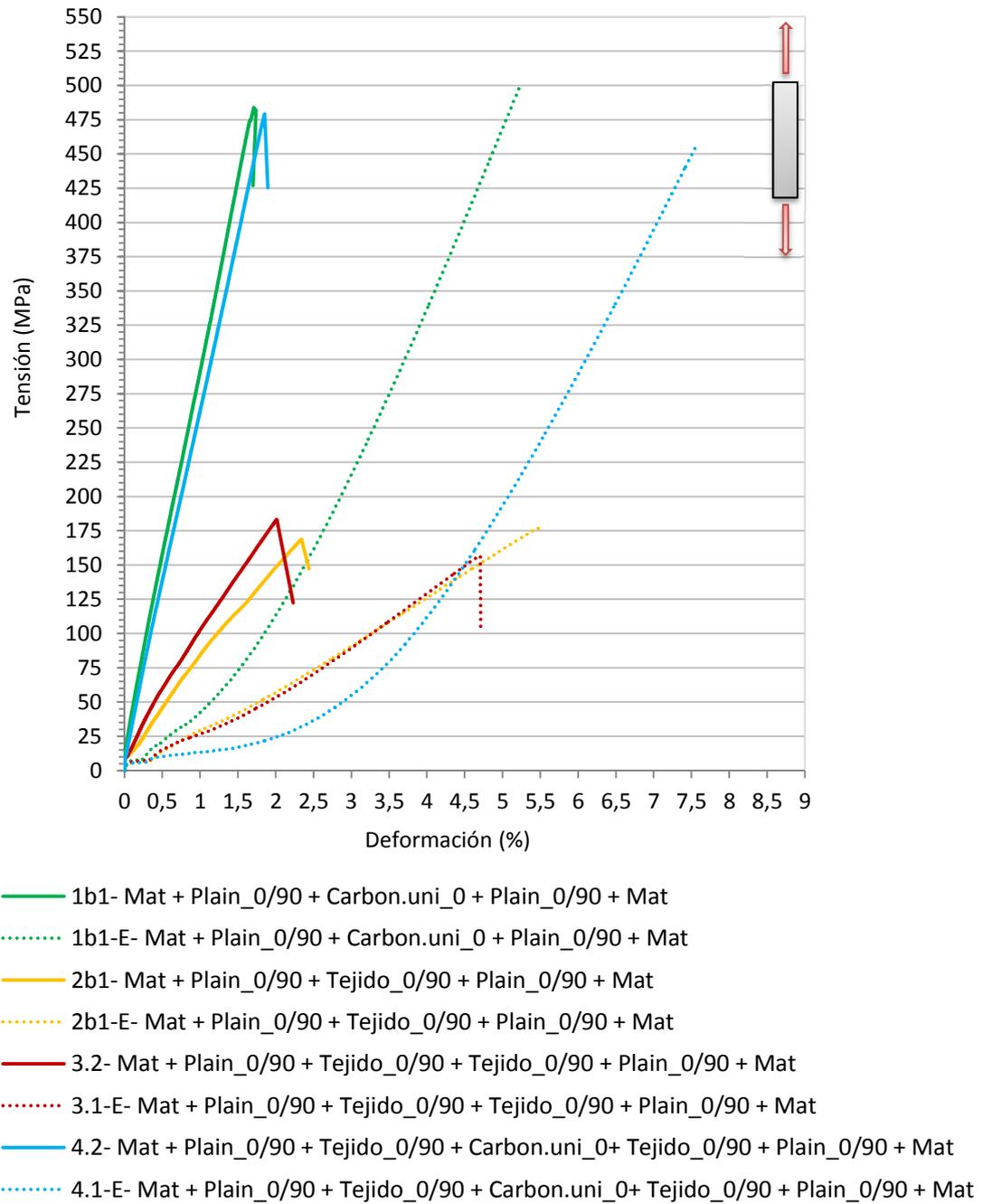
- 1b1-E- Mat + Plain_0/90 + Carbon.uni_0 + Plain_0/90 + Mat
- 2b1-E- Mat + Plain_0/90 + Tejido_0/90 + Plain_0/90 + Mat
- 3.1-E- Mat + Plain_0/90 + Tejido_0/90 + Tejido_0/90 + Plain_0/90 + Mat
- 4.1-E- Mat + Plain_0/90 + Tejido_0/90 + Carbon.uni_0+ Tejido_0/90 + Plain_0/90 + Mat

Gráfica 5.15 Tensión-deformación probeta con matriz epoxi

En las distintas tipologías realizadas con matriz de resina epoxi, existe una clara diferencia entre las probetas que contiene fibra de carbono y las que no. Si bien, comercialmente, la fibra de carbono suele utilizarse siempre combinada con algún tipo de resina epoxi.



5.10 RESULTADOS TENSIÓN-DEFORMACIÓN DE PROBETAS DE FIBRA DE VIDRIO Y FIBRA DE CARBONO CON MATRIZ DE POLIÉSTER / EPOXI



Gráfica 5.16 Tensión-deformación probetas con matriz epoxi/poliéster

Un mismo tipo de probeta utilizando matriz epoxi por un lado y matriz de poliéster por otro, no muestra evidencias claras de mejora respecto a resistencia, por lo que sería aconsejable utilizar laminados con matriz de poliéster, al ser ésta más económica y presentar características mecánicas similares (ver gráfica 5.16).



En teoría, la resina epoxi consigue mejorar la rigidez del compuesto frente a la resina de poliéster, pero hay que tener en cuenta el problema de realizar los laminados a mano, sin los medios adecuados, imposibilitando la eliminación del aire ocluido dentro de las probetas, hecho que se acentúa más en el caso de la resina epoxi.

Tras la realización de todos los ensayos y análisis de todas las gráficas, es evidente que nos encontramos ante un material que colapsa mediante una rotura frágil, bajando su capacidad de resistencia de forma brusca (*ver fotografía 5.5*).



Fotografía 5.5 Diferentes roturas de los laminados

Su límite de elástico coincide con su límite de rotura, por lo que no existe una zona plástica, como pudiera ser el acero, que al superar la zona elástica, mantenga propiedades mecánicas que no provoque la caída en picado de la resistencia.

Para la elaboración de las gráficas comparativas, se han escogido los laminados que más resistencia han obtenido en los ensayos de tracción de los pares de probetas, siendo en todos los casos, una de las dos piezas curadas a temperatura ambiente durante 24 horas.

Para llevar un control ordenado y que los datos obtenidos tras los ensayos queden registrados para su posterior uso en la elaboración de las gráficas, se rellenarán las plantillas programadas en el programa experimental para las probetas de matriz de resina de poliéster y matriz de resina epoxi (*ver tabla 5.2 y 5.3*).

PROGRAMA EXPERIMENTAL											
PROBETAS VIDRIO E/ CARBONO + RESINA DE POLIESTER INSATURADO ORTOFTÁLICO											
TIPO	COMPOSICIÓN	CURADO	PROBETA	PESO TELA	PESO TOTAL	% FIBRAS	Lentre mordazas (mm)	ESPESOR	SECCIÓN	KN	MPa
1	Plain_0/90 + Mat + Carbon.uni_0 + Mat + Plain_0/90	AMB.	1.1	13,92	22,45	62,00	/50/	1,14	53,56	33,012	540,66
			1.2	13,19	22,41	58,86	/50/	1,18	55,66	30,957	471,34
		60°	1.1-60	12,65	23,2	54,53	/50/	1,405	54,895	30,81	399,47
			1.2-60	13,77	24,62	55,93	/50/	1,21	56,18	31,089	457,34
		90°	1.1-90	12,95	23,26	55,67	153	1,05	56,07	16,86	286,38
			1.2-90	13,1	23,04	56,86	158	1,14	55,21	21,55	342,39
2	Plain_0/90 + Mat + Tejido_0/90 + Mat + Plain_0/90	AMB.	2.1	13,19	23,95	55,07	/50/	1,3	54,75	9,939	139,64
			2.2	14,65	23,97	61,12	/50/	1,11	55,96	9,652	155,39
		60°	2.1-60	13,17	20,72	63,56	/50/	1,06	55,7	5,85	99,08
			2.2-60	13,2	22,37	59,01	/50/	1,15	54,98	7,132	112,80
		90°	2.1-90	13,46	22,1	60,90	146,00	1,13	56,02	5,59	88,31
			2.2-90	13,49	22,48	60,01	163,00	1,03	55,62	5,98	104,38
1bis	Mat + Plain_0/90 + Carbon.uni_0 + Plain_0/90 + Mat	AMB.	1b1	13,84	23,56	58,74	/50/	1,14	55,04	30,362	483,89
			1b2	13,83	24,44	56,59	/50/	1,145	56,24	27,356	424,82
		60°	1b1-60	13,59	23,01	59,06	/50/	1,11	56,78	17,441	276,73
			1b2-60	13,85	23,73	58,36	/50/	1,145	57,42	29,829	453,70
		90°	1b1-90	13,78	21,41	64,36	169,00	1,07	52,94	24,51	432,69
			1b2-90	13,82	21	65,81	166,00	1,07	51,37	18,76	341,30
2bis	Mat + Plain_0/90 + Tejido_0/90 + Plain_0/90 + Mat	AMB.	2b1	13	20,02	64,94	/50/	1,02	54,33	9,349	168,70
			2b2	12,77	25,46	50,16	144,00	1,74	55,35	7,79	80,89
		60°	2b1-60	14,01	21,78	64,33	139,00	1,17	52,56	4,72	76,75
			2b2-60	13,77	22,18	62,08	143,00	1,18	54,71	6,89	106,73
		90°	2b1-90	13,21	20,52	64,38	146,00	1,14	52,48	4,37	73,04
			2b2-90	12,82	20,89	61,37	145,00	1,095	52,62	6,88	119,41
3	Mat + Plain_0/90 + Tejido_0/90 + Tejido_0/90 + Plain_0/90 + Mat	AMB.	3.1	16,97	25,26	67,18	/50/	1,245	55,28	12,012	174,53
			3.2	17,03	25,35	67,18	/50/	1,245	53,5	12,212	183,34
		60°	3.1-60	16,7	26,6	62,78	149,00	1,3	53,8	8,08	115,53
			3.2-60	17,36	27,43	63,29	143,00	1,18	55,12	8,53	131,15
		90°	3.1-90	16,15	27,82	58,05	161,00	1,32	55,49	9,93	135,57
			3.2-90	16,41	26,64	61,60	151,00	1,29	56,1	5,7	78,76
4	Mat + Plain_0/90 + Tejido_0/90 + Carbon.uni_0 + Tejido_0/90 + Plain_0/90 + Mat	AMB.	4.1	19,3	31,25	61,76	/50/	1,625	54,3	35,202	398,95
			4.2	19,02	29,05	65,47	/50/	1,36	53,71	35,002	479,18
		60°	4.1-60	21,03	31,42	66,93	153,00	1,5	55,59	17,81	213,59
			4.2-60	20,23	30,68	65,94	153,00	1,5	55,91	31,88	380,13
		90°	4.1-90	19,54	29,98	65,18	150,00	1,47	55,7	25,89	316,20
			4.2-90	20,02	32,49	61,62	155,00	1,46	55,8	25,26	310,06

*Nota: L entre mordazas = /50/ se utilizó extensómetro con longitud base de 50mm.

Tabla 5.2 Resultados probetas resina de poliéster



PROBETAS VIDRIO E/ CARBONO + RESINA EPOXI												
PROGRAMA EXPERIMENTAL	TIPO	COMPOSICIÓN	CURADO	PROBETA	PESO TELA	PESO TOTAL	%FIBRAS	L _{entre mordazas} (mm)	ESPESOR	SECCIÓN	KN	MPa
	1bis-E	Mat + Plain_0/90 + Carbon.uni_0 + Plain_0/90 + Mat	AMB.	1b1-E	13,15	20,02	65,68	166	1,03	53,5	27,48	498,68
				1b2-E	13,36	21,25	62,87	160	1,09	52,77	22,83	396,91
			60°	1b1-60-E	14,08	25,57	55,06	154	1,91	53,33	29,19	286,57
				1b2-60-E	13,77	24,49	56,23	161	1,81	52,7	20,85	218,58
			90°	1b1-90-E	14,05	22,71	61,87	155	1,66	53,1	31,48	357,13
				1b2-90-E	13,32	19,99	66,63	163	1,325	53,07	23,4	332,78
	2bis-E	Mat + Plain_0/90 + Tejido_0/90 + Plain_0/90 + Mat	AMB.	2b1-E	12,98	23	56,43	145	1,19	53,65	11,3	177,00
				2b2-E	13,68	23,54	58,11	151	1,28	52,87	9,41	139,05
			60°	2b1-60-E	13,55	24,76	54,73	163	1,7	51,35	9,02	103,33
2b2-60-E				13,59	24,92	54,53	169	1,45	51,62	8,95	119,57	
90°			2b1-90-E	12,93	21,13	61,19	167	1,41	53,07	7,73	103,30	
			2b2-90-E	13,08	...	...	...	...	...	...	...
3-E	Mat + Plain_0/90 + Tejido_0/90 + Tejido_0/90 + Plain_0/90 + Mat	AMB.	3.1-E	15,63	24,66	63,38	153	1,23	53,33	10,28	156,72	
			3.2-E	16,88	26,09	64,70	145	1,27	52,96	10,01	148,83	
		60°	3.1-60-E	16,91	32,05	52,76	164	1,89	52,11	11,82	120,01	
			3.2-60-E	17,07	27,27	62,60	165	1,92	52,52	8,22	81,52	
		90°	3.1-90-E	16,46	25,7	64,05	150	1,86	52,78	10,28	104,72	
			3.2-90-E	16,55	...	...	...	...	...	...	...
4-E	Mat + Plain_0/90 + Tejido_0/90 + Carbon.uni_0 + Tejido_0/90 + Plain_0/90 + Mat	AMB.	4.1-E	19	28,01	67,83	144	1,39	54,77	34,7	455,80	
			4.2-E	20,06	31,13	64,44	139	1,53	54,71	23,28	278,12	
		60°	4.1-60-E	18,77	30,01	62,55	165	1,85	52,86	28,07	287,04	
			4.2-60-E	19,34	30,12	64,21	157	1,99	52,54	25,62	245,04	
		90°	4.1-90-E	19,64	30,72	63,93	159	1,785	53,41	27,45	287,93	
			4.2-90-E	19,55	...	...	...	...	...	...	...

*Nota: L entre mordazas = /50/ se utilizó extensómetro con longitud base de 50mm.

Tabla 5.3 Resultados probetas resina epoxi





5.11 RESULTADOS ELEMENTO CONSTRUCTIVO. VIGA

Según el programa experimental, para la caracterización del hormigón utilizado en la capa de compresión de la viga, ADIRA C/G FIBER, se programan ensayos de resistencia a flexión y compresión (*ver tabla 5.4*).

Ensayo	TIEMPO DE CURADO			Σ/n (MPa)
	1 DÍA	3 DÍAS	6 DÍAS	
Compresión Fc. (MPa)	58.72	-	-	69.525
	-	68.91	-	
	-	66.01	-	
	-	-	84.46	
Flexión Fflex. (MPa)	-	7.539	-	7.584
	-	7.628	-	

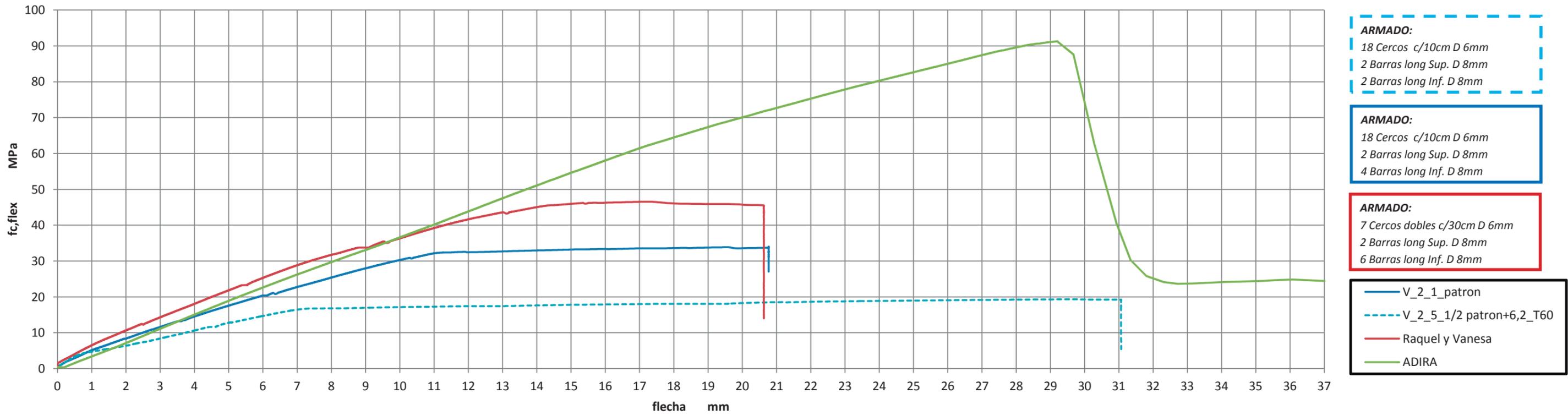
Tabla 5.4 Resultados ensayos resistencia del hormigón

Colocados los captadores para extraer los datos necesarios con los que elaboraremos la gráfica, procederemos al ensayo a flexión con 4 puntos obteniendo un sorprendente resultado de 60 KN (*ver fotografía 5.6*).

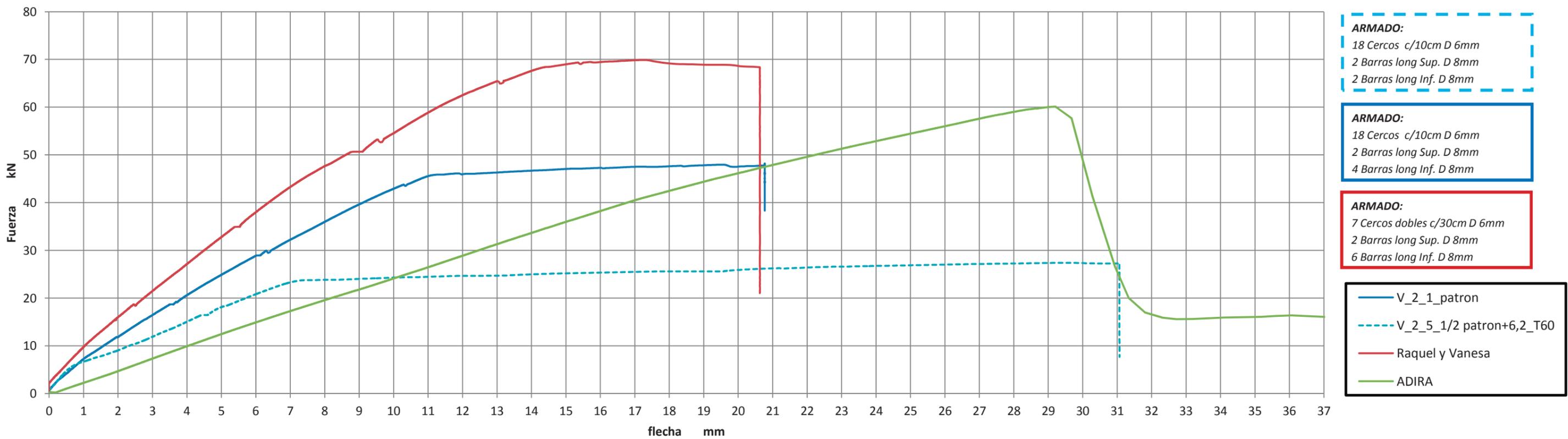


Fotografía 5.6 Rotura ADIRA C/G FIBER

A continuación se muestran las gráficas obtenidas, comparando los resultados con vigas de hormigón realizadas por los alumnos Vanesa Armero, Raquel Pardo, Vicente Chulia y Fernando Garrido en sus respectivos proyectos.



Gráfica 5.17 Comparación rotura vigas de hormigón VS matriz polimérica (MPa)



Gráfica 5.18 Comparación rotura vigas de hormigón VS matriz polimérica (KN)

ARMADO:
 18 Cercos c/10cm D 6mm
 2 Barras long Sup. D 8mm
 2 Barras long Inf. D 8mm

ARMADO:
 18 Cercos c/10cm D 6mm
 2 Barras long Sup. D 8mm
 4 Barras long Inf. D 8mm

ARMADO:
 7 Cercos dobles c/30cm D 6mm
 2 Barras long Sup. D 8mm
 6 Barras long Inf. D 8mm

— V_2_1_patron
 - - - V_2_5_1/2 patron+6,2_T60
 — Raquel y Vanesa
 — ADIRA

ARMADO:
 18 Cercos c/10cm D 6mm
 2 Barras long Sup. D 8mm
 2 Barras long Inf. D 8mm

ARMADO:
 18 Cercos c/10cm D 6mm
 2 Barras long Sup. D 8mm
 4 Barras long Inf. D 8mm

ARMADO:
 7 Cercos dobles c/30cm D 6mm
 2 Barras long Sup. D 8mm
 6 Barras long Inf. D 8mm

— V_2_1_patron
 - - - V_2_5_1/2 patron+6,2_T60
 — Raquel y Vanesa
 — ADIRA



Podemos concluir que no existen problemas de esfuerzo rasante entre la capa de compresión de hormigón de alta resistencia y la parte polimérica de la viga. Tampoco se detecta que la fibra de carbono, es decir, la cara inferior del elemento, haya sido afectada.

La rotura se ha producido a cortante en la capa de compresión en la zona de carga. Comparando gráficamente los resultados con los datos obtenidos por los compañeros que realizaron vigas de hormigón, se observa que ADIRA C/G FIBER tiene una menor rigidez respecto a las demás realizadas con hormigón.

Al comparar una pieza maciza de hormigón, frente a un elemento constructivo hueco, la tensión que soporta este último, en este caso la viga de matriz polimérica, se dispara considerablemente, ya que está soportando fuerzas similares con una menor inercia, obteniendo resultados sorprendentes.

El comportamiento tras la rotura de la viga realizada con material polimérico presenta una rotura frágil, disminuyendo la capacidad de carga de forma brusca, siendo nulo su comportamiento plástico. En cambio, las de hormigón obtienen una ductilidad que tras agotar su comportamiento elástico permiten continuar soportando cargas.

Hay que destacar que estamos hablando de una viga cuyo peso, capa de compresión de hormigón incluida, ha resultado ser de 21 Kg. consiguiendo un ahorro en peso de alrededor del 80% respecto a las de hormigón, además de tener un núcleo hueco y no macizo como sus homólogas más pesadas.



6. CONCLUSIONES



6. CONCLUSIONES

Acabado el estudio de materiales poliméricos reforzados con fibra de vidrio y fibra de carbono, realizados la totalidad de los ensayos y analizados todos los datos extraídos, podemos concluir que:

- Mediante el método de moldeo por contacto a mano, es imposible realizar probetas con idénticas características físicas, así como controlar el aire ocluido entre las distintas capas del laminado. Hecho que no nos permite extraer conclusiones fiables en cuanto a la comparación de resistencia a tracción de piezas con una misma composición de fibras curadas a diferente temperatura, tanto con matriz de resina de poliéster como con matriz de resina epoxi
- El intercambio de láminas situando el Mat de fibra de vidrio en las caras exteriores y el Plain_0/90 en el interior, intentando concentrar las tensiones lo más cercanas al núcleo de la pieza, no muestra evidencias claras en cuanto a la mejora de resistencia a tracción.
- La utilización de fibra de carbono incrementa considerablemente la resistencia a tracción así como el módulo de rigidez, permitiendo una mayor capacidad de carga y restringiendo la deformación, tanto en matrices de resina de poliéster como con matriz de resina epoxi.
- Un mayor volumen de fibras en el laminado no da lugar a un incremento en la resistencia a tracción, siendo las matrices que lo conforman de resina de poliéster y resina epoxi. Lo fundamental es encontrar un equilibrio en la relación refuerzo/matriz, siendo el 60% el volumen óptimo de fibras para un compuesto.
- La utilización de la resina epoxi no favorece un aumento de la resistencia frente a la resina de poliéster, siendo el método de moldeo el de contacto a mano. El módulo de rigidez tampoco experimenta grandes cambios. El elevado coste de la resina epoxi, no justifica su uso, ya que con la de poliéster se obtienen características mecánicas similares a un menor coste.
- La utilización de materiales poliméricos en elementos estructurales abre una gran ventana de posibilidades para su estudio con los resultados obtenidos, alcanzando resistencias a flexión similares a vigas elaboradas con hormigón armado.



- El problema de éste tipo de materiales es que si el elemento agota su límite elástico, la capacidad de carga cae considerablemente debido a su rotura frágil. En cambio, un elemento de las mismas características realizado con hormigón, presenta una ductilidad que permite la capacidad de carga una vez superado el límite elástico.
- El ahorro en peso del elemento estructural realizado con materiales compuestos, en nuestro caso, laminados de fibra de vidrio y fibra de carbono, es de alrededor de un 80% con respecto a las vigas de hormigón, obteniendo resultados en cuanto a resistencia similares a elementos elaborados con hormigón armado.
- La gran deformación, en cuanto a flecha, que se produce en un elemento estructural con las características del realizado, restringe bastante su uso, ya que para una misma carga, mientras que un elemento de hormigón cumpliría la flecha máxima en los rangos establecidos por la normativa, la viga ensayada podría ver superada esta restricción.
- El elevado coste de los materiales utilizados, así como la mano de obra para la elaboración de los compuestos, hace plantearse su uso mientras existan materiales que no presenten estos inconvenientes con prestaciones similares y utilizados más comúnmente.



7. FUTURAS LÍNEAS DE ESTUDIO



7. FUTURAS LÍNEAS DE ESTUDIO

Tras realizar el análisis de los resultados de este proyecto, se plantean una serie de aspectos sin concretar interesantes para ser estudiados en futuros trabajos, entre los que podemos destacar:

- Hacer un análisis comparativo de los diferentes tipos de probetas, realizando un mayor número de muestras por cada tipología, siendo un total de 5 probetas tal y como indica la Norma UNE-EN ISO 527-1, para ensayos a tracción.
- Realizar un estudio más exhaustivo sobre la diferencia de situar en las capas exteriores las láminas de Mat, en lugar de las láminas Plain, suponiendo que al situar el Plain en las zonas interiores, concentraremos las tensiones más cerca del núcleo del laminado.
- Estudiar el tiempo óptimo de curado en horno tanto para 60°C como a 90°C, tras comprobar que no se observan mejoras considerables en las probetas curadas en horno durante dos horas a 60°C y curadas en horno durante dos horas a 90°C.
- Continuar con la segunda línea de estudio contemplada en el programa experimental inicial y comprobar la influencia de la incorporación de los fillers calizos en una matriz de poliéster para materiales compuestos en porcentajes del 5%, 10% y 20%.
- Estudiar la solución al problema de cortante en la cabeza de compresión de hormigón del elemento estructural, para averiguar realmente la resistencia final del laminado, sin que se produzca el fallo de ésta por culpa de la compresión en la parte superior.
- Comprobar la rentabilidad económica de la utilización de materiales compuestos en construcción e ingeniería civil frente a los convencionalmente usados, estudiando si se evidencian mejoras sustanciales que justifiquen el pago de su elevado coste.



8. BIBLIOGRAFÍA



8. BIBLIOGRAFÍA

- Miravete, Antonio. *Materiales Compuestos* (Tomos I y II). Zaragoza, 2000.
- Nguyen Duc Hai, Hiroshi Mutsuyoshi, Shingo Asamoto, Takahiro Matsui. *Structural behavior of hybrid FRP composite I-beam*. *Construction and Building Materials* 24: 956–969, 2010.
- Miravete, Antonio. *Los nuevos materiales en la Construcción*. Zaragoza, 1994.
- París Carballo, F., Cañas Delgado, J. *Materiales Compuestos 95*. Asociación Española de Materiales Compuestos (AEMAC). Actas del I Congreso Nacional de Materiales Compuestos, 1995.
- Antequera, Pablo; Jiménez, Lorenzo; Miravete, Antonio. *Los materiales compuestos de fibra de vidrio*. Zaragoza, 1991.



ANEXO A



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Representaciones esquemáticas de varias características geométricas y espaciales de partículas de fase dispersa que repercuten en las propiedades de los materiales compuestos: (a) concentración, (b) tamaño, (c) forma, (d) distribución y (e) orientación.

Figura 2.2. Clasificación materiales compuestos según forma de refuerzo

Figura 2.3. Reforzados con fibras

Figura 2.4. Fibras continuas y alineadas/ discontinuas y alineadas/ discontinuas y al azar

Figura 2.5. Materiales compuestos estructurales. Laminares/panel sandwich

Figura 2.6. Unidireccional (a), Tejido (c), Multiaxial (d), Aleatorio (b)

Figura 2.7. Propiedades mecánicas de la matriz, del refuerzo, y del material compuesto por combinación de ambos

Figura 2.8. Fases de reactividad de la resina de poliéster

Figura 3.1. Probeta tipo 1B según UNE-EN ISO 527-4

Figura 3.2. Probeta tipo 2 según UNE-EN ISO 527-4

Figura 3.3 Esquema programa experimental definitivo

Figura 3.4. Perfil pultrusionado. Molde de la viga

Figura 3.5. Composición del laminado de la viga

Figura 3.6. Ensayo a flexión por cuatro puntos

Figura 4.1. Probeta tipo 1B según UNE-EN ISO 527

Figura 4.2. Probeta tipo 2 según UNE-EN ISO 527

Figura 4.3. Viga planteada

Figura 4.4. Perfil pultrusionado

Figura 4.5. Ensayo a flexión con 4 puntos



ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 2.1. Roving carbono

Fotografía 2.2. Preimpregnado carbono + epoxi

Fotografía 2.3. Tejido unidireccional

Fotografía 2.4. Tejido bidireccional

Fotografía 2.5. Carbono + aramida (Kevlar®)

Fotografía 2.6. Carbono + vidrio

Fotografía 2.7. Mat de hilos cortados

Fotografía 2.8. Roving fibra de vidrio

Fotografía 2.9. Tejido equilibrado

Fotografía 2.10. Tejido Plain

Fotografía 2.11. Hilos cortados

Fotografía 2.12. Fibra de vidrio molida

Fotografía 2.13. Preimpregnado en autoclave (www.bassobikes.com)

Fotografía 2.14. Preimpregnado sin autoclave (www.airtechintl.com)

Fotografía 2.15. Enrollamiento filamentario (www.directindustry.es)

Fotografía 2.16. Moldeo por contacto a mano (www.tecnologiadelosplasticos.blogspot.com)

Fotografía 2.17. Moldeo por proyección simultánea (www.directindustry.es)

Fotografía 2.18. Pultrusión (www.fibrotec.es)

Fotografía 2.19. Sistema de moldeo compound (www.indicomposites.com)

Fotografía 2.20. Prensa (www.constructor.educarex.es)

Fotografía 2.21. Moldeo por inyección de termoestables (www.constructor.educarex.es)

Fotografía 2.22. Moldeo de transferencia de resina (www.directindustry.es)

Fotografía 4.1. Resina de poliéster

Fotografía 4.2. Catalizador

Fotografía 4.3. Mascarilla

Fotografía 4.4. Guantes de protección

Fotografía 4.5. Resina epoxi

Fotografía 4.10 y 4.11. Fibra de vidrio E- MAT

Fotografía 4.8 y 4.9. Fibra de vidrio E- TEJIDO 0_90

Fotografía 4.6 y 4.7. Fibra de vidrio E- PLAIN

Fotografía 4.12 y 4.13. Fibra de carbono

Fotografía 4.14. Maquinaria ensayo tracción

Fotografía 4.15. Captador de deformación



- Fotografía 4.16. Maquinaria ensayo tracción*
- Fotografía 4.17. Molde pultrusionado*
- Fotografía 4.18. Sección molde pultrusionado*
- Fotografía 4.19 y 4.20. Maquinaria ensayo flexión*
- Fotografía 4.21: Tablones de madera*
- Fotografía 4.22: Refuerzos seleccionados*
- Fotografía 4.23. Dibujo probetas*
- Fotografía 4.24: Refuerzos recortados*
- Fotografía 4.25. Organización probetas*
- Fotografía 4.26. Peso probetas con balanza electrónica*
- Fotografía 4.27. Poliéster sin catalizar*
- Fotografía 4.28. Poliéster catalizado*
- Fotografía 4.29. Capa resina sobre plástico*
- Fotografía 4.30. Incorporación resina*
- Fotografía 4.31. Colocación láminas*
- Fotografía 4.32. Impregnación con rodillo*
- Fotografía 4.33. Plásticos entre el molde*
- Fotografía 4.34. Molde*
- Fotografía 4.35. Molde con incorporación de gatos*
- Fotografía 4.36. Desmoldeo*
- Fotografía 4.37. Desbardado de probetas*
- Fotografía 4.38. Probetas tras desbardado*
- Fotografía 4.39. Probetas con fibra de carbono*
- Fotografía 4.40. Probetas de fibra de vidrio*
- Fotografía 4.41. Mediciones con calibre*
- Fotografía 4.42. Extensómetro*
- Fotografía 4.43 y 4.44. Máquina de ensayo a tracción*
- Fotografía 4.45. Rotura de probeta*
- Fotografía 4.46. Tablones de madera*
- Fotografía 4.47: Organización probetas*
- Fotografía 4.48. Balanza electrónica Fotografía*
- Fotografía 4.49. Resina poliéster sin catalizador*
- Fotografía 4.50. Homogenización resina poliéster-calizador*
- Fotografía 4.51. Resina poliéster catalizada*



- Fotografía 4.52. Capa resina sobre plástico*
- Fotografía 4.53. Impregnación con rodillo*
- Fotografía 4.54. Colocación láminas*
- Fotografía 4.55. Incorporación resina*
- Fotografía 4.56. Colocación plástico*
- Fotografía 4.57. Probetas en el molde*
- Fotografía 4.58. Incorporación gatos en molde*
- Fotografía 4.59. Molde con gatos*
- Fotografía 4.60. Horno*
- Fotografía 4.61. Probetas en horno*
- Fotografía 4.62. Probetas tras post-curado*
- Fotografía 4.63. Comprobación sección probetas*
- Fotografía 4.64. Comprobación espesor probetas*
- Fotografía 4.65. Ensayo probeta con extensómetro*
- Fotografía 4.66. Probeta ensayada a tracción*
- Fotografía 4.67. Refuerzos recortados*
- Fotografía 4.68. Organización probetas*
- Fotografía 4.69. Homogeneización resina epoxi-catalizador*
- Fotografía 4.70. Capa resina sobre plástico*
- Fotografía 4.71. Colocación láminas*
- Fotografía 4.72. Impregnación con rodillo*
- Fotografía 4.73. Colocación lámina final tipo MAT*
- Fotografía 4.74. Incorporación gatos en molde*
- Fotografía 4.75. Probetas tras post-curado*
- Fotografía 4.76. Desbardado de probetas*
- Fotografía 4.77. Maquinaria ensayo a tracción*
- Fotografía 4.78. Probeta a ensayar*
- Fotografía 4.79. Perfil pultrusionado*
- Fotografía 4.80. Incorporación de plástico al perfil pultrusionado*
- Fotografía 4.81 y 4.82. Preparación del material*
- Fotografía 4.83 y 4.84. Primera capa de mat*
- Fotografía 4.85. Aplicación resina sobre mat*
- Fotografía 4.86. Impregnación con rodillo*
- Fotografía 4.87. Primer módulo de fibra*



Fotografía 4.88. Unión central con perfil pultrusionado como molde

Fotografía 4.89. Lijado en la parte de los solapes

Fotografía 4.90. Solape de los dos módulos

Fotografía 4.91. Compactación con plásticos

Fotografía 4.92. y 4.93. Base de la viga con mat

Fotografía 4.94., 4.95. y 4.96. Preparación de rigidizadores

Fotografía 4.97. Mat envolviendo rigidizadores

Fotografía 4.98. Impregnación con resina

Fotografía 4.99. Taladro en los puntos de rigidización

Fotografía 4.100. Incorporación de cola en zona de rigidizadores

Fotografía 4.101. 4.102. y 4.103. Introducción de rigidizadores con ayuda de una maza y un listón de madera

Fotografía 4.104. Probeta a ensayar

Fotografía 4.105. Primera capa de mat

Fotografía 4.106., 4.107. y 4.108. Preparación, colocación e impregnación de segunda capa de Plain_0/90 a 45°

Fotografía 4.109., 4.110. y 4.111. Preparación, colocación e impregnación de tercera capa de Tejido_0/90 a 45°

Fotografía 4.112. y 4.113. Corte y preparación del laminado

Fotografía 4.114. y 4.115. Colocación de primera lámina de la zona a compresión de la viga

Fotografía 4.116. Piezas cortadas

Fotografía 4.117. Capa de fibra de carbono

Fotografía 4.118. y 4.119. Última capa de carbono con resina epoxi

Fotografía 4.120. Resina epoxi

Fotografía 4.121. Prensado del laminado con tablas

Fotografía 4.122. Viga laminada

Fotografía 4.123., 4.124. y 4.125. Colocación de tornillos en parte superior de la viga

Fotografía 4.126. y 4.127. Incorporación de puntos de resina en tornillos

Fotografía 4.128. y 4.129. Encofrado para posterior hormigonado

Fotografía 4.130. y 4.131. Preparación del adhesivo

Fotografía 4.132. Colocación adhesivo

Fotografía 4.133. y 4.134. Amasado del hormigón

Fotografía 4.135. Fibras metálicas

Fotografía 4.136. Vertido del hormigón 1



Fotografía 4.137. Vertido del hormigón 2

Fotografía 4.138. Viga hormigonada con encofrado

Fotografía 4.139. Retirada de gatos

Fotografía 4.140. y 4.141. Retirada del encofrado

Fotografía 4.142. Viga hormigonada sin encofrado

Fotografía 4.143. Probetas hormigón

Fotografía 4.144. Colocación de plástico cubriendo la viga

Fotografía 4.145. Probetas para ensayo a flexión

Fotografía 4.146. Probetas hormigón con entalla

Fotografía 4.147. Ensayo a flexión de la viga

Fotografía 4.148. Rotura viga tras ensayo a flexión

Fotografía 5.1. Rotura Ens. C1.1

Fotografía 5.2. Rotura Plain_0/90 Ens. C1.1

Fotografía 5.3 Curado poliéster ambiente/60/90

Fotografía 5.4 Curado epoxi Ambiente/60/90

Fotografía 5.5 Diferentes roturas de los laminados

Fotografía 5.6 Rotura de la viga ADIRA C/G FIBER



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Clasificación de las fibras en función de su origen

Tabla 2.2. Resumen de materias primas que componen un material compuesto

Tabla 2.3. Propiedades de las diferentes fibras de carbono provenientes de PAN

Tabla 2.4 Propiedades de distintos tipos de fibra de vidrio

Tabla 2.5. Principales componentes del ensimaje.

Tabla 2.6. Propiedades del Kevlar®29 y Kevlar®49

Tabla 2.7. Propiedades de la fibra de boro

Tabla 2.8. Propiedades de la fibra de Carburo de Silicio

Tabla 2.9. Propiedades de la fibra de cuarzo

Tabla 2.10. Clasificación de las resinas termoestables en función de la temperatura de utilización

Tabla 2.11. Cuadro resumen resina de poliéster

Tabla 2.12. Cuadro resumen resinas de alta temperatura

Tabla 2.13. Resumen procesos de fabricación de materiales compuestos

Tabla 3.1. Programa experimental inicial

Tabla 3.2 Glosario composición del laminado

Tabla 3.3. Plantilla ensayos previos.

Tabla 3.4. Tipos de curado

Tabla 3.5. Programa experimental definitivo

Tabla 3.6. Plantilla probetas resina de poliéster (1)

Tabla 3.7. Plantilla probetas resina epoxi (2)

Tabla 3.8. Plantilla ficha para registro de probetas

Tabla 3.9. Plantilla para ensayo de resistencia probetas de hormigón

Tabla 4.1. Dosificación de resina poliéster insaturada ortoftálica

Tabla 4.2. Características resina epoxi

Tabla 4.3. Dosificación resina epoxi

Tabla 4.4. Características del tejido de refuerzo

Tabla 4.5. Propiedades de la fibra de vidrio tipo E

Tabla 4.6. Dosificación de resina poliéster insaturada ortoftálica

Tabla 4.7. Dosificación de resina poliéster insaturada ortoftálica

Tabla 4.8. Dosificación de resina epoxi



Tabla 5.1. Resultados Ensayos Previos

Tabla 5.2 Resultados probetas resina de poliéster

Tabla 5.3 Resultados probetas resina epoxi

Tabla 5.4 Resultados ensayos resistencia del hormigón

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 5.1. Comportamiento material post-rotura frágil

Gráfica 5.2. Corrección de deformación 1

Gráfica 5.3. Corrección de deformación 2

Gráfica 5.4. Tensión-deformación Ensayos Previos

Gráfica 5.5 Tensión-deformación probeta tipo 1.1-1b1

Gráfica 5.6 Tensión-deformación probeta tipo 2.2-2b1

Gráfica 5.7 Tensión-deformación probeta tipo 1.1-2.2

Gráfica 5.8 Tensión-deformación probeta tipo 1b1-2b1

Gráfica 5.9 Tensión-deformación probeta tipo 3.2-4.2

Gráfica 5.10 Tensión-deformación probeta tipo 1b1-4.2

Gráfica 5.11 Tensión-deformación probetas con matriz de poliéster

Gráfica 5.12 Tensión-deformación probeta tipo 3.1E-4.1E

Gráfica 5.13 Tensión-deformación probeta tipo 1b1E-2b1E

Gráfica 5.14 Tensión-deformación probeta tipo 1b1E-4.1E

Gráfica 5.15 Tensión-deformación probeta con matriz epoxi

Gráfica 5.16 Tensión-deformación probetas con matriz epoxi/poliéster

Gráfica 5.17 Tensión-deformación ensayo a flexión ADIRA C/G FIBER

