

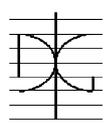
Trabajo de Investigación CST/MIH

“REFUERZO DE PERFILES PULTRUSIONADOS DE GFRP CON HORMIGONES DE ALTAS PRESTACIONES, HRF”

Por:

JOSÉ RAMÓN ALBIOL IBÁÑEZ

JULIO 2013

Autor / Author: ALBIOL IBÁÑEZ; JOSÉ RAMÓN		Fecha / Date: 11/07/2013
Título / Title “REFUERZO DE PERFILES PULTRUSIONADOS DE GFRP CON HORMIGONES DE ALTAS PRESTACIONES HRF”		
Directores del trabajo / Supervisores: Dr. PEDRO SERNA ROS	Código / Code: CST/MIH	Nº páginas / Pages: 175
Departamento / Departament: INGENIERÍA DE LA CONSTRUCCIÓN Y PROYECTOS DE INGENIERÍA CIVIL		
Universidad / University: UNIVERSIDAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA		 UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALÈNCIA
Palabras clave / Keywords: Hormigón de alto rendimiento, Vigas híbridas, pultrusión, hormigón con fibras.		
Código Unesco: 3305-05		

DEDICAT

Especialment a Conxa i Pau, dona i fill.

A Ramón i Reme, pare i mare.

"Tots els anys m'enfronte a reptes molt importants i de diversa índole, enguany ha sigut dur, amb l'ajuda de la meua dona, el meu fill, els meus pares, la família i amics he aconseguit seguir avant i no perdre mai la il·lusió."

Citas....

"Si el siglo XIX fue el de las cerámicas y el XX el de los polímeros,
el XXI será la era de los híbridos".

John Hay, Universidad de Surrey

Agradecimientos

A mi director académico el Dr. D. Pedro Serna Ros, por sus consejos, ayuda y guía.

A Luis V. García Ballester, por sus consejos, ayuda y por aguantarme todos los días.

A Juan Font, Vicente Genovés, Rafa Calabuig y Jesús Martínez, por su ayuda.

A Marta, Begoña, Jorge, Raquel, Vanesa, Javi, Joaquín, Chulia y Nando por su ayuda.

A Vicente Monzó, Marisa Navarro, Héctor Navarro y Arsenio Navarro, por sus ánimos constantes.

A José Luís Bonet y Carmen Castro por darme la oportunidad de trabajar con ellos.

A la Pepe García gerente de "Pinturas José Antonio García, S.L.", por el suministro de las resinas de poliéster y epoxi.

A Helena directora técnica de la empresa "Fibrotec, S.L.", por el suministro de los perfiles pultrusionados.

A Marina Manas de la empresa "Bekaert", por el suministro de fibras metálicas.

A Alberto Rey, José Fortea y Antonio Vargas de la empresa Sika SAU, por el suministro de aditivos, resinas y fibras de carbono.

Al equipo de profesionales de urgencias del Centro de Salud de Puçol.

Al equipo de profesionales de urgencias y la UCI del Hospital de Sagunto.

Al equipo de hemodinámica, al de cardiovascular, a la UCI, al equipo de planta cardio del Hospital Clínico de Valencia.

Especialmente al equipo de cirujanos de cardiovascular **dirigidos por el Dr. Bahamonde**, gracias a todos por permitir que siga disfrutando de la compañía de mi padre.

A los técnicos de laboratorio del ICITECH Paco, Pascual, Jurgen, Juan, Enrique, Bardisa...

A Ramón y Reme; a Carmen y Segundo.

A mi familia. Gracias.

ÍNDICE

- 1.- CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN** _pág. 1
 - 1.1.- Introducción.** _pág. 1
 - 1.2.- Motivación y relevancia del tema.** _pág. 3
 - 1.3.- Estructura de la Tesina.** _pág. 5

- 2.- CAPÍTULO II: OBJETIVOS** _pág. 8
 - 2.1.- Objetivos generales.** _pág. 8
 - 2.2.- Objetivos específicos.** _pág. 8

- 3.- CAPÍTULO III: ESTADO DEL ARTE** _pág. 10
 - 3.1.- Introducción.** _pág. 10
 - 3.2.- Componentes del sistema híbrido.** _pág. 11
 - 3.2.1.- Hormigón. _pág. 11
 - 3.2.2.- FRP, polímero reforzado con fibras. _pág. 31
 - 3.2.3.- Unión. _pág. 39
 - 3.3.- Producción de sistemas híbridos.** _pág. 43
 - 3.3.1.- Materiales compuestos. _pág. 43
 - 3.3.1.1.- Hormigón _pág. 43
 - 3.3.1.2.- GFRP, polímero reforzado con fibras. _pág. 74
 - 3.3.2.- Sistema híbrido. _pág. 53
 - 3.4.- Comportamiento estructural del sistema híbrido.** _pág. 54
 - 3.5.- Modos de fallo del sistema estructural híbrido.** _pág. 59
 - 3.5.1.- Generalidades. _pág. 59
 - 3.5.2.- Cortante en el alma. _pág. 59
 - 3.5.3.- Cortante en el adhesivo. _pág. 61
 - 3.5.4.- Cortante en el hormigón. _pág. 61
 - 3.5.5.- Fallo de adherencia hormigón /FRP. _pág. 61
 - 3.5.6.- Pandeo en el alma. _pág. 64
 - 3.5.7.- Aplastamiento del hormigón. _pág. 66
 - 3.5.8.- Inestabilidad lateral. _pág. 68
 - 3.5.9.- Flexión. _pág. 68
 - 3.5.10.- Ductilidad. _pág. 69
 - 3.6.- Durabilidad ambiental y química del sistema estructural híbrido.** _pág. 74
 - 3.7.- Compatibilidad de los materiales del sistema híbrido.** _pág. 77
 - 3.8.- Resistencia al fuego.** _pág. 77
 - 3.9.- Aplicaciones en la ingeniería civil.** _pág. 78

4.- CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA EXPERIMENTAL _pág. 86**4.1.- Selección de materiales.** _pág. 86**4.1.1.- HRF:** _pág. 86

- 4.1.1.1.- Cemento. _pág. 86
- 4.1.1.2.- Arena fina _pág. 88
- 4.1.1.3.- Arena gruesa _pág. 89
- 4.1.1.4.- Grava. _pág. 90
- 4.1.1.5.- Agua. _pág. 91
- 4.1.1.6.- Aditivos. _pág. 92
- 4.1.1.7.- Fibras. _pág. 93

4.1.2.- GRFP Pultrusión: _pág. 94

- 4.1.2.1.- Resina de poliéster. _pág. 94
- 4.1.2.2.- Fibra de vidrio. _pág. 95
- 4.1.2.3.- Filler. _pág. 96
- 4.1.2.4.- Perfil pultrusionado. _pág. 96

4.1.3.- Medios de unión: _pág. 97

- 4.1.3.1.-Química. _pág. 97
- 4.1.3.2.-Mecánica. _pág. 101

4.2.- Equipos y procedimientos experimentales. _pág. 102

- 4.2.1.- Determinación del contenido de agua de los áridos. _pág. 102
- 4.2.2.- Determinación de la granulometría de los áridos. _pág. 102
- 4.2.3.- Determinación de la densidad de conjunto de los áridos.
_pág. 103
- 4.2.4.- Otros ensayos para caracterización de áridos. _pág. 103
- 4.2.5.- Determinación de la fluidez de una pasta mediante el cono de Marsh. _pág. 103
- 4.2.6.- Caracterización de la fluidez de los HAC. _pág. 103
- 4.2.7.- Caracterización mecánica a compresión de las probetas de hormigón. _pág. 104
- 4.2.8.- Caracterización mecánica a flexión de las probetas de hormigón y vigas. _pág. 105
- 4.2.9.- Caracterización mecánica a flexión de las vigas híbridas.
_pág. 106

- 4.3.- Programa experimental.** _pág. 107
 - 4.3.1.- Hormigón de altas prestaciones**_pág. 107
 - 4.3.2.- Perfiles pultrusionados**_pág. 110
 - 4.3.3.- Vigas híbridas** _pág. 112

- 5.- CAPÍTULO V: ELABORACIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS e HÍBRIDOS.** _pág. 118
 - 5.1.- Elaboración de HRF.** _pág. 119
 - 5.2.- Elaboración del perfil de GFRP.** _pág. 126
 - 5.2.1.-Probetas_pág. 126
 - 5.2.2.- Perfil. _pág. 126
 - 5.3.- Elaboración de las vigas híbridas GFRP + HRF.** _pág. 127

- 6.- CAPÍTULO VI: CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES HÍBRIDOS** _pág. 131
 - 6.1.- HRF** _pág. 137
 - 6.2.- Polímero reforzado con fibra de vidrio, GFRP.** _pág. 141

- 7.- CAPÍTULO VII: ANÁLISIS DE RESULTADOS de las VIGAS HÍBRIDAS.** _pág. 144
 - 7.1.- Análisis de las vigas híbridas GFRP + HRF.** _pág. 145
 - 7.1.1.- ALB_HYB_HRF_0_viga_050713 _pág. 145
 - 7.1.2.- ALB_HYB_HRF_30_viga_090713 _pág. 148
 - 7.1.3.- ALB_HYB_HRF_60_viga_090713 _pág. 152
 - 7.1.4.- ALB_HYB_HRF_120_viga_080713 _pág. 154
 - 7.1.5.- Análisis comparativo de las vigas _pág. 158
 - 7.2.- Comparación con vigas de GFRP pultrusionadas Vs vigas HA Vs vigas híbridas “hand lay up”.** _pág. 159

- 8.- CAPÍTULO VIII: CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.** _pág. 167
 - 8.1.- Conclusiones.** _pág. 168
 - 8.2.- Futuras líneas de investigación.** _pág. 170

- 9.- CAPÍTULO IX: BIBLIOGRAFÍA.** _pág. 171

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1.- INTRODUCCIÓN

En los últimos años el uso de materiales compuestos avanzados ha ganado más amplio espacio en el sector de la ingeniería civil, debido a algunas características muy favorables, tales como ligereza en el peso, alta resistencia mecánica, resistencia a la corrosión y la fatiga, así como neutralidad electromagnética (Hull, 1981 [47], Holloway (2010)[45])). Sistemas innovadores que combinan hormigón con materiales compuestos avanzados han demostrado ser una solución viable y eficiente en comparación con los sistemas convencionales.

Existen importantes aplicaciones de los materiales compuestos en ingeniería estructural, gracias al uso de componentes ligeros tales como pasarelas y puentes en entornos agresivos, como es el caso de plantas de productos químicos, plantas de tratamiento de agua, torres de refrigeración de torres, u otros elementos estructurales que no interfieran con las ondas electromagnéticas en edificios (Bakeri (1989)[37], Banck,L.C and Mosallam (1990)[38], Holloway (1990) [44], Plecnik et al. (1990)[49], Johansen et al. (1992)[48], y Deskovic (1993)[40]).

La fabricación de materiales compuestos mediante procesos automatizados puede producir hoy en día componentes de alta calidad a un precio bastante razonable. Uno de tales procesos es la pultrusión, en la que las fibras mediante tracción pasan a través de una matriz calentada en el que la resina es inyectada, para posteriormente el elemento completamente curado se produce con buena estabilidad dimensional.

La pultrusión es un proceso para la fabricación de miembros estructurales de FRP de rápido crecimiento. Un mayor conocimiento de los ingenieros en relación a las características de productos de pultrusión puede traducirse en ahorro de costes, junto a su gran ratio "capacidad estructural/peso" ha hecho que tanto el método como los materiales empiecen a ser considerados frente a los materiales tradicionales.

Las estructuras de polímero reforzado con fibra de vidrio (GFRP) pultruidos de sección de viga en caja , para paredes delgadas las secciones de tipo

caja son muy eficientes para vigas estructurales (Ashhy (1991) [39]), y son, en hecho, comúnmente utilizados en aplicaciones estructurales de pultrusionado de perfiles. Sin embargo, poseen de algunas desventajas:

- 1.- El ala de compresión es más débil que el ala de tracción, porque FRP tiene una resistencia a la compresión, alrededor de la mitad de su resistencia a la tracción y debido a fenómenos locales de pandeo (Banks and Rhodes 1983[39], Holmes and Just (1983)[46]), el fracaso es inminente.
- 2.- El fracaso suele ser catastrófico, sin previo aviso, debido a los materiales compuestos que son elásticos lineales al fracaso.
- 3.- El diseño suele estar regido por la rigidez (debido a la rigidez relativamente baja de FRP), resultando en la necesidad de un uso excesivo de material compuesto para satisfacer ciertos requisitos de deformación en estados límites de servicio.

Del mismo modo tanto para columnas como vigas, se pueden utilizar tubos o encofrados de FRP, que actúan como encofrado perdido y encamisado protector mejorando además el confinamiento, el refuerzo de cortante y de flexión (Mirmiran y Shahawy 1996)[50]. El ahorro de costes por la eliminación del encofrado, la eliminación o disminución del refuerzo a cortante, y el bajo mantenimiento, frente al hormigón armado en ambientes corrosivos, hacen de estos materiales o sistemas híbridos muy interesantes en el campo de la ingeniería civil.

1.2.- MOTIVACIÓN y RELEVANCIA DEL TEMA:

En vista de lo expuesto en la introducción es viable realizar un diseño más eficiente de secciones compuestas, realizando las siguientes consideraciones.

En primer lugar, las tensiones de compresión en la sección debe ser llevadas por un material con mayor resistencia a la compresión, como es el hormigón y así también aumentar la rigidez a mínimo coste, y por lo tanto el ala de FRP podría ser minimizada o eliminada, sustituyéndose así pues con una capa de hormigón. El alma y ala inferior serán del material compuesto de FRP, para maximizar sus características mecánicas a tracción, Deskovic et al. (1995)[42].

Es importantísimo para garantizar este sistema híbrido Hormigón –FRP, transferir los esfuerzos de cizalla y arrancamiento entre ambos materiales a través de su interfaz. Esto es posible gracias, a una buena adherencia entre el hormigón y el FRP, que se puede lograr utilizando adhesivos o proporcionando uniones mecánicas a la superficie, o incluso, por una combinación de ambos. Un mejor conocimiento y aportaciones a la mejora de esta unión entre ambos materiales hacen viable el máximo aprovechamiento del concepto de estos sistemas híbridos.

Todo este conjunto unido a que ambos materiales tienen una durabilidad excelente, el mantenimiento sería mínimo frente estructuras tradicionales como las de acero o de hormigón armado. Es por ello que el ahorro económico, es importante, debido a un mantenimiento nulo. Obtenemos un sistema híbrido, en el cual mejoramos la capacidad del conjunto a mínimo coste.

En la presente Tesina de Master, estos nuevos sistemas híbridos son estudiados, están compuestos por una losa superior de hormigón de alta resistencia reforzado con fibra metálica (HARF) colocado sobre un perfil estructural de fibra polimérica reforzado (FRP) elaborado por laminación industrial, pultrusión.

El hormigón de altas prestaciones, es utilizado para mejorar la rigidez de la viga y aumentar la resistencia mecánica del FRP, minimizando en la necesidad de un uso excesivo de material compuesto para satisfacer ciertos requisitos de deformación en estados límites de servicio, puesto que es relativamente costoso, (Donna S. M. Chen & Raafat El-Hacha, 2010 [43]). Además el hormigón de alta resistencia (HAR) tiene la ventaja de tener alta durabilidad, que permitirá seguir colocando el material en ambientes agresivos.

Para que esta estructura híbrida funcione, la unión entre ambos materiales debe ser perfecta. Sin embargo, la falta de pérdida de adherencia a menudo gobierna el comportamiento de cizallamiento FRP-hormigón y les impide alcanzar su capacidad plena carga. Para ello hay que reforzar la unión con medios mecánicos y químicos, así como un diseño seccional donde tengamos el eje neutro lo más próximo en la interface para minimizar las tensiones.

1.3.- ESTRUCTURA DE LA TESINA

La presente Tesina se ha dividido en ocho capítulos.

En el **Capítulo I** se plantea una breve introducción. Se destaca en este apartado la relevancia del tema en estudio, así como la estructura interna de la Tesina.

En el **Capítulo II** se exponen de forma clara y concisa los objetivos de la Tesina, planteando el objetivo general y los objetivos específicos.

El **Capítulo III** se centra en la revisión bibliográfica de los temas vinculados a la investigación, siendo éstos, los hormigones de alta resistencia de matriz cementicia, reforzados con fibras metálicas, su dosificación, confección y propiedades físico químicas, mecánicas y de durabilidad. Por otra parte, se definen los materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con fibras, sus propiedades físico químicas, el proceso de confección, propiedades mecánicas y de durabilidad. Una vez conocidos ambos materiales podemos estudiar su unión formando un material híbrido, del que veremos la revisión bibliográfica que existe.

El **Capítulo IV** aborda la metodología experimental empleada durante el desarrollo de la Tesina. Complementariamente, se lleva a cabo una descripción general de los materiales seleccionados, equipos y procedimientos empleados, así como el programa experimental para la realización de la tesina.

El **Capítulo V** describe el proceso de elaboración de los materiales compuestos e híbridos. Como se confeccionan los dos materiales por separado, el hormigón de altas prestaciones reforzado con fibra metálica, HRF y el polímero reforzado con fibra, FRP, para posteriormente unirlos mediante diversas técnicas y procedimientos, con el fin de maximizar el comportamiento ambos materiales.

El **Capítulo VI** describe los resultados obtenidos en la caracterización mecánica de los materiales compuestos e híbridos, se incluyen los efectos observados durante los ensayos, y se lleva a cabo una descripción del nivel de respuesta al finalizar el ensayo.

En el **Capítulo VII** se presentan al análisis de los resultados sobre los materiales compuestos y vigas híbridas, estudiándose la influencia del hormigón reforzado con fibra de acero en el comportamiento estructural de la viga híbrida.

Se incluye un análisis de los resultados de la resistencia y capacidad de deformación obtenidos en los ensayos experimentales de las vigas híbridas, incluyendo los siguientes aspectos: identificación del tipo de fallo que presentó cada uno de los materiales híbridos; comparación de los resultados experimentales de carga y momentos máximos resistentes; análisis de la capacidad de deformación a nivel de la sección y del elemento completo; y evaluación de la rigidez del material híbrido. En cada uno de los análisis mencionados, se ha realizado el estudio de la influencia de los parámetros considerados en esta investigación.

El **Capítulo VIII** se expone las principales conclusiones obtenidas en la tesina. Asimismo, se plantea una serie de propuestas para futuras líneas de investigación.

El **Capítulo IX** se expone la bibliografía.

CAPÍTULO II

OBJETIVOS

2.1- OBJETIVO GENERAL

Influencia del refuerzo de perfiles pultrusionados de GFRP con hormigones de altas prestaciones, mediante capa de compresión de hormigón reforzado con fibras de acero, HRF.

2.2.- OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Caracterización mecánica de hormigones de altas prestaciones, en función de las cantidades de fibras metálicas para su refuerzo, para ello se estudiarán 30, 60 y 120 Kg/m³ de fibra metálica.

Influencia del hormigón reforzado con fibras, HRF, en la capa de compresión de la viga, y su influencia en el comportamiento dúctil del sistema.

Comparación de los perfiles híbridos con las vigas de hormigón armado, innovación frente a la estructura tradicional.

CAPÍTULO III

ESTADO DEL ARTE

CAPÍTULO III.- ESTADO DEL ARTE

3.1.- INTRODUCCIÓN

Un sistema híbrido es la unión de dos o más materiales de origen orgánico e inorgánico, con el fin de mejorar las características mecánicas y de durabilidad de cada uno de ellos por separado. [1]

Es de reciente interés, la aplicación de materiales o estructuras híbridas, en los campos de la ingeniería aeronáutica y la ingeniería naval, ya que se aprovechan las altas capacidades mecánicas de los materiales y el bajo peso resultante al combinarlos. Si bien es cierto en el sector de la ingeniería civil se han realizado algunas estructuras siendo este un campo muy prometedor.

Hasta el momento en ingeniería civil, el uso de estructuras híbridas, están configuradas en el campo de la rehabilitación y refuerzo, donde polímeros reforzados con fibra de carbono, se combinan reforzando la estructura de hormigón armado, para mejorar el comportamiento a flexión y cortante fundamentalmente, además de mejorar el confinamiento del hormigón [3].

En estos últimos años, la configuración ingenieril toma un giro, en el cual, no se pretende reforzar el hormigón utilizando compuestos poliméricos, sino todo lo contrario, es el hormigón el que refuerza al composite polimérico, fundamentalmente para dotar a la estructura híbrida de mejoras mecánicas, aumentar la rigidez del material y dotar de mayor durabilidad al material. Un claro ejemplo, es el primer puente en España, donde se realiza la estructura híbrida consistente en vigas tipo artesa de fibra de carbono con capa de compresión de hormigón. Fotografía 1.



Fotografía 1: Primer puente de materiales compuestos construido en España (2004)

En la presente tesina se estudia como dotar a los sistemas híbridos de comportamiento dúctil frente al fallo, ya que tienen una respuesta frágil, comportamiento no deseable en estructuras ingenieriles. Es necesario por ello el conocimiento de los materiales que componen la estructura híbrida, en este caso los materiales compuestos hormigón y el polímero reforzado (FRP) que hasta el momento se están utilizando. Se introducirá además el material híbrido "laminado metal fibra" (FML), innovadora solución para estas estructuras híbridas en la ingeniería civil. Serán estos materiales unidos los que se utilicen para llevar a cabo los futuros trabajos de investigación. También es necesario conocer el comportamiento estructural y los modos de fallo de las estructuras híbridas.

Estos materiales compuestos FRP, están formados de fibras continuas de vidrio, aramida, o carbono embebidas en una matriz de resina polimérica como poliéster, epoxi o viniléster. En estos compuestos, las fibras se encuentran en gran volumen en las direcciones gran esfuerzo tensional. Las propiedades de interés ofrecidas por estos materiales son las altas resistencias a tracción, bajo peso, nula corrosión, alta resistencia a la fatiga y neutralidad electromagnética [12].

La fabricación de materiales compuestos mediante procesos automatizados puede producir hoy en día componentes de alta calidad a un precio razonable. Dicho proceso automatizado es el denominado, proceso por pultrusión, en la que las fibras pasan a través de una matriz con una sección en I o cajón, en el que la resina es calentada e inyectada, obteniéndose un elemento completamente curado con buena estabilidad dimensional.

3.2.- COMPONENTES DEL SISTEMA HÍBRIDO.

3.2.1.- Hormigón.

Los hormigones que se podrían utilizar para el sistema híbrido, pueden ser, tanto los hormigones convencionales usados hasta el momento, como los hormigones de alta resistencia HAR, hormigones autocompactantes HAC y los hormigones reforzados con fibras HRF; son hormigones a la carta. Depende el elemento estructural que se diseñe se puede utilizar el que me mejores prestaciones tenga para su uso particular.

En el presente trabajo de investigación se utiliza un hormigón que combina las prestaciones de tres hormigones especiales, HAR, HAC y HRF, para obtener un hormigón de alto rendimiento. Puesto que los hormigones de alta resistencia HAR, se utilizan para dotar de grandes capacidades mecánicas al hormigón, en este caso utilizaremos una f_c de 80 MPa. Para mejorar las prestaciones mecánicas de ductilidad

en compresión y tracción y dotar de una mejora en los esfuerzos de tracción y flexión incorporaremos fibras al hormigón, tendremos pues un hormigón reforzado con fibras de acero HRF. Puesto que la colocación y compactación de estos hormigones con grandes cantidades de fibras de acero es compleja realizaremos un hormigón con una gran trabajabilidad y que se autocompacte por sí mismo, el HAC.

También podemos utilizar este tipo de hormigón de ultra alta resistencia denominado UHPC, posee una gran capacidad mecánica a compresión, tracción y flexión, debida al diseño de la dosificación.

Tabla 1: Características mecánicas de distintos tipos de hormigones.

CARACTERÍSTICAS	HA	HAR	HAC	UHPC	UHPC-CV
fck _Mpa	25-40	50-120	50-100	100-140	150-180
fc,flx _MPa	8	10	10	15-30	30-50
fct _MPa	2	4	4	6	10
fct, w = 0.3 mm	-	-	-	3	8
E _GPa	30	32	32	45	50
POISSON	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,2	0,2
RETRACCIÓN _ $\mu\text{m}/\text{m}$	-	-	-	550	<10
FLUENCIA	-	-	-	0,8	0,3
COEF. DILATACIÓN					
TÉRMICA _ $\mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{C}$	12	12	12	11.8	11.8

El comportamiento en compresión está definido por la resistencia a compresión y el modulo de elasticidad. Para los cálculos a flexión a los estados límites últimos se adopta una ley de comportamiento convencional lineal con un campo plástico.

El Inicio del campo plástico corresponde al $(85\%f_{ck})/d$, la futura instrucción EHE-08, se añade un factor respecto a la fluencia del hormigón.

En la tabla 1, podemos comprobar la diferencia entre los 25-40 MPa de un hormigón convencional y el UHPC curado al vapor con 150-180 MPa.

El comportamiento de este hormigón de alto rendimiento se caracteriza por un dominio de deformación elástico para la resistencia a tracción, de la matriz cementicia y un dominio post fisuración caracterizado por la resistencia a la tracción del material compuesto una vez se ha fisurado la matriz.

El tiempo de amasado es muy importante y de él depende un buen comportamiento de la matriz cementante. La cantidad de fibras que pueden llevar estos hormigones reforzados está generalmente entre 30 y 60 kg/m^3 para refuerzos estructurales convencionales; para un mejor comportamiento estructural de 70 a 90 kg/m^3 y para capacidades mecánicas elevadas a tracción y flexión se utilizan de 100 a 150 kg/m^3 ,

trabajar con cantidades superiores es muy complicado ya que no hay trabajabilidad en la masa y debes ir a sistemas de colocación tipo SIFCON, estos procedimientos no están en la línea de trabajo que se realiza. La resistencia a la tracción proporcionada por las fibras depende en gran medida de la alineación de las fibras en función del llenado en el encofrado, las fibras en la zona cercana al encofrado o molde se alinean a él, por el efecto pared, este fenómeno decrece a medida que aumenta la longitud de la fibra.

La esbeltez de las fibras es otro factor importantísimo, a medida que aumenta la esbeltez de la fibra mejoramos la capacidad de tracción del material, por varios motivos, en primer lugar la existencia de una mayor cantidad de fibras en la masa, garantiza mayor probabilidad de coser las fisuras allí donde se inician y en segundo lugar un mayor rendimiento de la fibra ya que la mayor longitud de fibra tiene mayor superficie de adhesión con la matriz cementante.

En la tabla 1, se muestra la diferencia entre los 2 MPa a tracción de un hormigón convencional y el UHPC curado al vapor con 10 MPa.

Se aprecia en la tabla 1, la diferencia entre los 8 MPa a flexión de un hormigón convencional y el UHPC curado al vapor con valores entre 30-50 MPa. El refuerzo de fibras metálicas puede llegar hasta 150 Kg/m³.

Los materiales que se utilizan serán acordes con las características físicas y de durabilidad exigibles al material. Los materiales son cemento, agua, arena, grava, fillers, adiciones, aditivos y fibras de acero.

El cemento, sus características resistentes son fundamentales por ello será conveniente utilizar cementos de alta categoría como son los CEM I -52.5 R, de altas resistencias, con un grado de finura muy alto, con el fin de que los granos de cemento se hidraten completamente y de forma rápida. Pero no solo hay que tener en cuenta su resistencia mecánica sino también los compuestos químicos que lo forman. La fluidez de la pasta está influida por las fases de aluminatos [21] .

Y en la figura 1, se puede observar que a medida que aumenta la cantidad de C_3A , y $F-CaO$ (cal libre), aumenta la superficie de cemento hidratado con ello la reacción será más exotérmica, sobre todo a tempranas edades. Hay que tener especial precaución puesto que este calor de hidratación inicial perjudica la fluidez del hormigón con ello dificulta la trabajabilidad de este en su puesta en obra. La utilización de un superplastificante a base de naftalenos, mejora la superficie de cemento hidratado frente a la utilización de policarboxílicos [21].

Los altos contenidos en C_3A , álcalis solubles, y CaO libre, produce un alto calor de hidratación. Si el calor de hidratación es menor, la fluidez de la mezcla será mayor, por ello a medida que exista una menor cantidad de $F-CaO$ (cal libre), tendrá menor viscosidad mejorando su aplicación. [21]

Los áridos finos predominan sobre el árido grueso, habitualmente se utiliza una arena cuya fracción granulométrica es 0/2 o 0/4, que consigue minimizar los riesgos de fisuración e inicio de grieta en la interfase árido pasta. Es conveniente para obtener un mayor empaquetamiento del material combinar distintos tipos de árido fino. Se obtiene una resistencia máxima con una mezcla de 60-70% de áridos finos 0/2 y 30-40% de árido grueso 4/16, con el fin de mejorar el empaquetamiento de los áridos. [22]

Las propiedades del hormigón en estado fresco y endurecido son fundamentales a la hora de determinar, la forma de los áridos, su rugosidad, esfericidad, la distribución por tamaños, y el empaquetamiento. En la figura 5, podemos observar como el mayor empaquetamiento lo obtenemos con el exponente de Fuller 0.5 y para una esfericidad de 1.10, con árido natural y poco rugoso. [23]

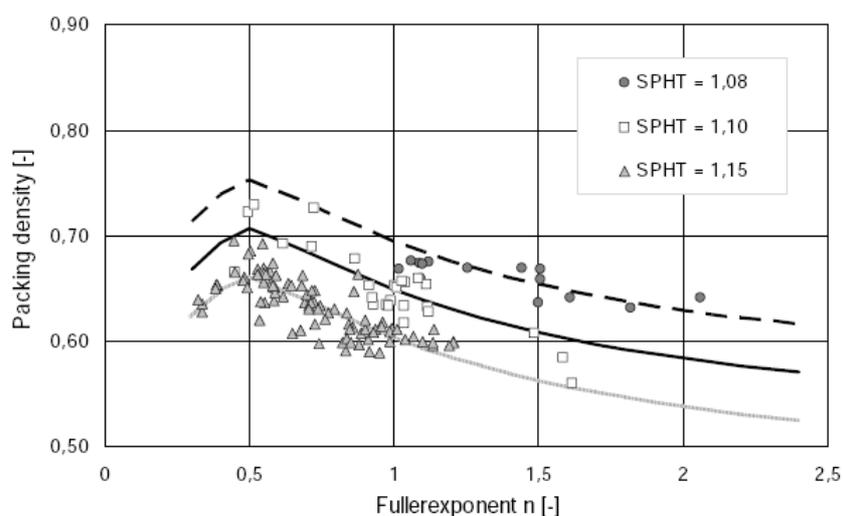


Figura 1: Relación entre la densidad de empaquetamiento y el exponente de Fuller.

Al mejorar la densidad del empaquetamiento la tendencia es utilizar menor cantidad de aditivo, consiguiéndolo con el árido natural, mejor que con el árido triturado, al mismo tiempo que mejoramos la trabajabilidad de la mezcla. No obstante, mejoramos la trabajabilidad de la mezcla cuando la rugosidad es menor en el árido y la tendencia es la esfericidad de estos. [23]

Los áridos finos normalmente suelen ser silíceos, graníticos o basálticos, debido a su gran capacidad resistente, con ello mejoramos la resistencia mecánica del hormigón, en el caso de hormigones de más de 100 MPa a compresión, para menores resistencias se utilizan normalmente áridos calizos más económicos y abundantes.

La trabajabilidad mejora disminuyendo la cantidad y el tamaño del árido grueso, aunque con árido grueso fino 2/5 las diferencias no son importantes, como se aprecia en los resultados de la tabla 2, según el estudio realizado por Ma, J., et al., 2008, [24].

Tabla 2: trabajabilidad con y sin árido grueso. Ma, J., et al., 2008, [24].

	Without coarse aggregate	With coarse aggregate
Slump flow (mm)	790	765
t ₅₀₀ (sec.)	4.0	7.0
V-funnel test (sec.)	8.6	15.6
L-box-test (H ₁ /H ₂)	0.9	0.92
U-box-test (Δh)	0	0
Air content	4.0-5.5%	2.5-3.5%

Los áridos con mayor dureza presenta valores del módulo elástico superiores como podemos observar en la figura 7, donde los áridos basálticos elevan el módulo elástico frente a los silíceos.

Los fillers utilizados pueden ser reactivos o no, los reactivos como el humo de sílice, la ceniza volante, el metacaolin, y los no reactivos como el filler calizo y otros que tan solo tapan los poros. Estas partículas tienen como misión generar productos de hidratación resistentes al mismo tiempo que se depositan en los huecos más pequeños, confiriendo así al material más resistencia mecánica y durabilidad. Las partícula ultra finas que no son reactivas simplemente tapan los huecos, con ello también mejoramos las características mecánicas, pero en menor cuantía que los productos anteriores. Se

aumenta la durabilidad de producto resultante al depositarse las partículas finas en los poros más pequeños.

El humo de sílice y el metacaolín son los que tienen una mayor actividad puzolánica. El metacaolín se obtiene de la calcinación de la arcilla a una temperatura determinada, esta temperatura afecta a la actividad puzolánica (600 – 800 °C)[26]. El metacaolín posee buenos beneficios para el hormigón como son las tempranas resistencias, disminución y taponamiento de la estructura del poro, reduce la reacción álcali árido. [27]

El "phonolith" pulverizado, proveniente de roca volcánica contiene un 45 % de zeolitas. Posee también reactividad puzolánica. Originalmente el término puzolana natural fue asociado a las cenizas volcánicas y tierras calcinadas que reaccionaban con los limos a temperatura ambiente en presencia de agua. Hoy en día este término se ha extendido a la capa silico-aluminosa la cual finamente dividida y en presencia de agua, reaccionara químicamente con el óxido de calcio para formar componentes con propiedades cementicias.[26]

Los fillers poseen distinta actividad puzolánica debido a su composición química como se observa en la tabla 4, aquellos con una mayor cantidad de SiO_2 o Al_2O_3 tendrán una mayor actividad puzolánica.

Un estudio realizado por Rougeau, P: y Boyrs, B., 2006 [28], donde se utilizan distintos tipo de fillers, aun siendo la granulometría del humo de sílice más fina frente a la ceniza volante, no implica que necesite más agua para su trabajabilidad ya que para obtener la misma relación agua/material cementante (W/B), la cantidad de material cementante que necesito es mucho mayor con ceniza volante, por tener mayor superficie específica, necesitando más agua, esto es debido a la microestructura porosa de gran superficie de la ceniza volante. Aunque he podido comprobar que habitualmente el que suscribe ha utilizado humo de sílice densificado y ceniza volante y he necesitado más cantidad de agua en las dosificaciones de humo de sílice que en las de ceniza volante para obtener una trabajabilidad similar.

Los valores del ensayo de escurrimiento "Flow test" indican una buena fluidez con el filler calizo y la "phonolith", en los hormigones dosificados con metacaolín, ceniza volante y el filler silíceo necesitan una mayor cantidad de aditivo superplastificante y agua para una misma trabajabilidad.

El que tiene una peor trabajabilidad es el metacaolin por su gran demanda de agua y superplastificante, debido a su estructura porosa microscópica, mayor con respecto a los demás fillers.

La distribución por tamaños de poro y porosidad total con distintos tipos de fillers el tamaño del poro está entre 0.01 y 0.03 micras, la distribución del tamaño del poro más baja se muestra con el metacaolin siendo el humo de sílice el segundo más pequeño con 0.008 micras. En el caso del humo de sílice la porosidad total es la más baja con un 2.2%. La porosidad corresponde al espacio intercrystalino [30].

El efecto físico de las partículas ultra finas de relleno de los huecos en el cemento densificando la microestructura de la pasta, depende de la distribución del tamaño de partículas. El efecto químico de reacción con el cemento hidratado, produciendo reacciones secundarias C-S-H gel que mejora la microestructura de la matriz cementante. Figura 2.

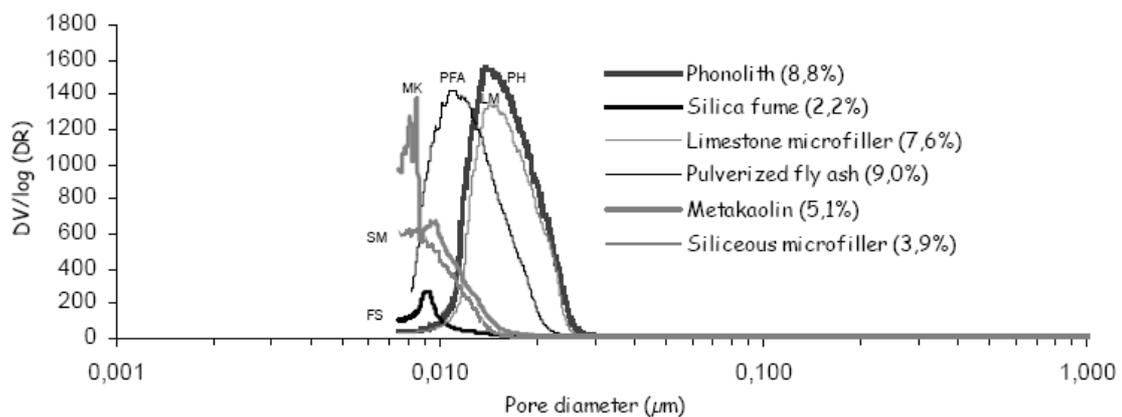


Figura 2: Relación distribución por tamaños de poro y porosidad total con distintos tipos de fillers, a 90 días.

Existen tres factores elementales de la contribución de las partículas ultra finas en la resistencia mecánica, el efecto filler (de efecto inmediato), la influencia en la hidratación del cemento pòrtland en las primeras 24 horas y una eventual reacción puzolànica. Como podemos observar en la figura 3, el humo de sílice proporciona mejores resistencia mecánicas a compresión y flexión frente al resto de filler empleados (metacaolin, ceniza volante, filler calizo...)

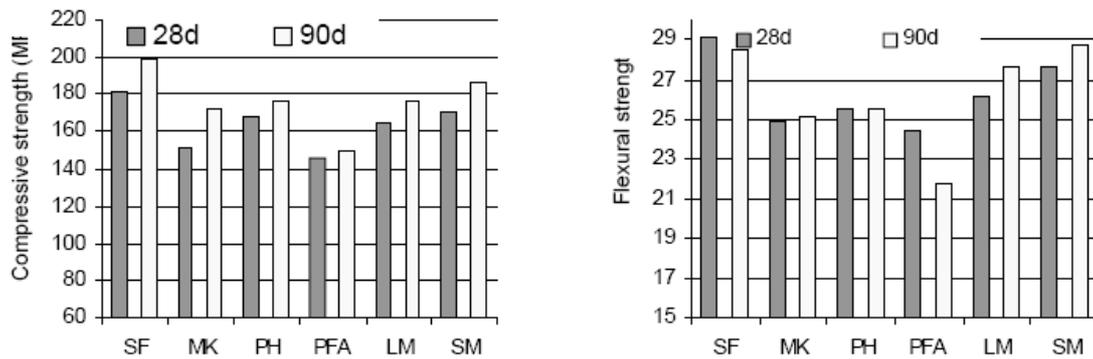


Figura 3: Resistencias mecánicas a compresión y flexión a 28 días y 90 días del hormigón con distintos tipos de fillers.

El filler calizo causa un buen empaquetamiento en la estructura granular del cemento [12] ya que actúa como núcleo de cristalización favoreciendo la aceleración de la hidratación de los granos del cemento. A medida que aumentamos el filler calizo aumenta el grado de hidratación incluso con relaciones agua cemento bajas. [30]. Cuando utilizamos combinadamente filler de escoria y metacaolín, reaccionan con la portlandita producida tras hidratarse el cemento, produciendo geles C-S-H, que densifican la microestructura de la matriz. [27]

La cinética de la carbonatación está esencialmente ligada a la compacidad de la matriz cementante y al volumen de portlandita liberado en el proceso de hidratación.

Cuando la relación A/C es muy baja la capilaridad de los poros empieza a ser discontinua pronto, quizá la precipitación de calcita induce a un descenso de la porosidad ambos mecanismos inducen a una buena resistencia a la carbonatación.

Agua.

En cuanto al agua, se utilizará agua potable, con una cantidad baja alrededor de los 195 lt, con el fin de obtener una A/C = 0.4 baja, los problemas de trabajabilidad y puesta en obra se suplen con la adición a la mezcla de un aditivo superfluidificante.

El agua utilizada, tanto para el amasado como para el curado del hormigón en obra, no debe contener ningún ingrediente dañino en cantidades tales que afecten a las propiedades del hormigón o a la protección de las armaduras frente a la corrosión. En general, podrán emplearse todas las aguas sancionadas como aceptables por la práctica.

Cuando no se posean antecedentes de su utilización, o en caso de duda, deberán analizarse las aguas, y salvo justificación especial de que no alteran perjudicialmente las propiedades exigibles al hormigón.

Aditivos.

Los superplastificantes utilizados en el hormigón son polielectrolitos o polímeros solubles en agua, desde el punto de vista cronológico son los siguientes tipos: primera generación, polinaftalenos sulfonados PNS; segunda generación, polimelaminas sulfonadas PMS; tercera generación, policarboxilatos PC, e híbridos con sulfonatos; cuarta generación, Policarboxilatos- poliox PCP y los polisulfonatos –poliox.

Se están utilizando superplastificantes con gran poder de reducción de agua de hasta un 30 % y excelente fluidez, los más utilizados son los policarboxilatos de tercer y cuarta generación.

Los mecanismos de actuación debido a la adsorción superficial y el efecto esteárico, que separan las partículas ligantes, consiguen un rápido desarrollo de las resistencias iniciales. Esta reducción de agua de amasado confiere al hormigón alta densidad, resistencia y reducida permeabilidad al agua.

Los aditivos superplastificantes generan plasticidad a la masa, fluidez. Disminuye la retracción. No deben contener cloruros ni sustancias que puedan provocar o favorecer la corrosión del acero y por lo tanto pueden utilizarse sin restricciones en hormigones armados o pretensados.

Las cantidades utilizadas en la dosificación de hormigones de alto rendimiento, están entre los 1 – 1.5 % del peso del cemento, dependiendo de la cantidad y tipo de cemento, siendo variable la aportación en función de la actividad del principio activo sólido (valor no indicado por el fabricante del aditivo).

Fibras.

Las fibras en general se utilizan fundamentalmente para evitar que el hormigón tenga un comportamiento frágil, aunque también le confieren un buen comportamiento reduciendo el riesgo de fisuración por retracciones autógenas y de secado, actúan confinando la masa.

El confinamiento proporciona mecánicamente una gran capacidad de absorción de energía respecto del pétreo inicial. Por contra la adición de fibras limita la trabajabilidad de la masa del hormigón en estado fresco.

Los tipos de fibras atendiendo a su clasificación material son de tipo metálicas, de polipropileno y de fibra de vidrio resistente al álcalis de cemento, aunque las más utilizadas en el hormigón de altísimas prestaciones son las metálicas, en algunos casos se han utilizado fibras de vidrio o polipropileno en el denominado hormigón flexible (ECC) desarrollado por Victor Li,[31].

Para mejorar la ductilidad de un elemento muy rígido de comportamiento frágil, se utilizan fibras que tengan módulos de elasticidad muy elevados, para que el hormigón resista la apertura y el crecimiento de la fisura, incrementándose con ello la energía de fractura y consecuentemente su ductilidad. Las fibras metálicas de alta tenacidad, retrasan el inicio y crecimiento de la fisura. Los fallos mecánicos de las fibras se trasladan a la adherencia de las fibras con la pasta (siendo este el eslabón más débil).

La utilización de fibras de polipropileno no dota mecánicamente al hormigón de las elevadas resistencias a flexión del hormigón con fibras de acero, ya que se deforman, permitiendo que crezca rápidamente la fisura.

La figura 4, muestra los mecanismos de rotura del acero, su deformación o fallo por deslizamiento con la matriz cementante del hormigón, siendo las variables de las características resistentes del hormigón de alto rendimiento. De las tres mecanismos propuestos, el deslizamiento del acero en la matriz cementante, es el más débil, habitualmente el fallo del material es por este factor.

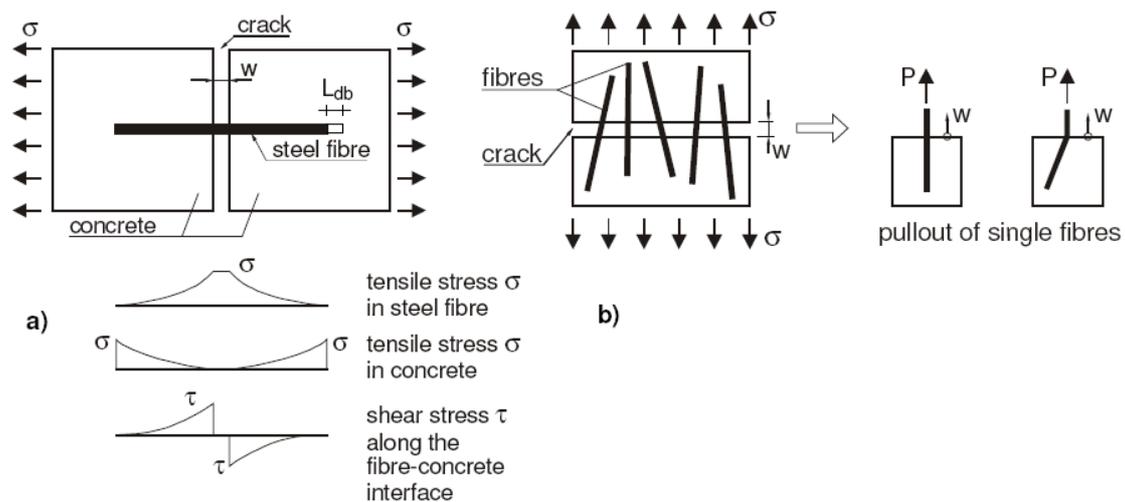


Figura 4: a) estado tensional en la fisura, b) arranque fibra en función del grado de inclinación respecto al esfuerzo.

Los factores que influyen en el arranque (“pull out”) de las fibras metálicas son:

Forma de la fibra y su geometría: Las fibras que más agarre tengan a la matriz, como son las que están dobladas en su extremo en forma de patilla de anclaje, las que tienen la sección en forma de estrella o reviradas en espiral, mejoran todas ellas considerablemente la tensión de arranque de las fibras mejorando la ductilidad del material, frente a las de sección circular lisa. [Van Gysel, 2000; Chanvillard, 1993; Groth, 2000; Naaman, 1999.]

El material con que estén fabricadas: El acero mejor frente las fibras poliméricas. Las fibras de acero con enganche o patilla en su extremo final mejoran notablemente el anclaje. Utilizar fibras metálicas con un límite elástico $f_y=2200 - 2600$ MPa, frente a un acero de tipo medio con $f_y=1200$ MPa, significa aumentar en un 50-100% el esfuerzo de arrancamiento. [Van Gysel, 2000].

Diámetro de la fibra: no solo afecta a la capacidad tensional sino además la cantidad de energía para conseguir una deformación plástica.

Longitud de fibra embebida: A mayor longitud de la fibra adherida a la matriz mayor superficie de adherencia siendo los esfuerzos de arrancamiento mayores. En el caso de fibras con enganche al final de la fibra, no es tan importante la longitud de fibra adherida ya que el mecanismo más importante en el arrancamiento es la deformación del gancho.

El ángulo de inclinación de las fibras con respecto a la dirección de los esfuerzos:

En la figura 5, comprobamos como en el caso de una apertura de fisura de 0.5 mm, el grado de inclinación óptimo para la mayoría de los investigadores está entre 10 y 15° de inclinación de las fibras respecto la dirección de la carga. Se llega a un 20 % más de esfuerzo de arrancamiento comparándolo cuando el esfuerzo está alineado con la fibra. A medida que el ángulo crece, por ejemplo con 45°, el esfuerzo de arrancamiento es solo del 30 % respecto a de los esfuerzos y fibras alineados.

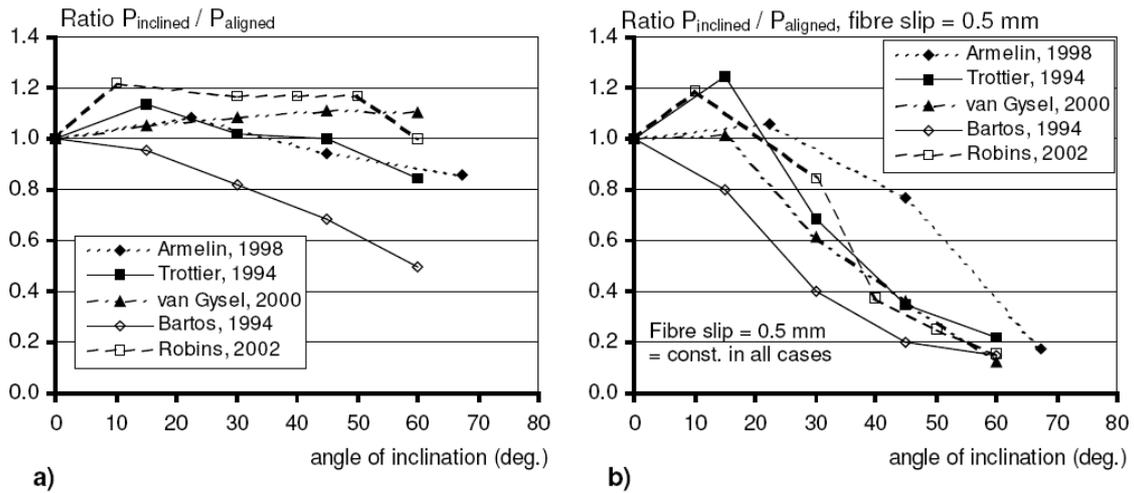


Figura 5: a) Ratios entre la carga alineada/inclinada en función del ángulo de inclinación de las fibras, b) Ratios entre la carga alineada/inclinada en función del ángulo de inclinación de las fibras, para una apertura de fisura de 0.5 mm.

Otro fenómeno que se puede observar es la rotura de la fibra metálica en un punto de máxima tensión debido a una concentración de tensiones en dicho punto. [Van Gysel, 2000] En los estudios realizados por Van Gysel, la mayoría de las fibras metálicas con patilla de anclaje al final de la fibra, rompen en el punto de máxima tensión debido a la concentración de tensiones antes de ser arracadas de la matriz. En este punto de máxima tensión se han llegado a encontrar desconchados en la matriz, en la interfase fibra matriz.

La calidad de la matriz de hormigón:

Bajos valores de A/C, W/B .

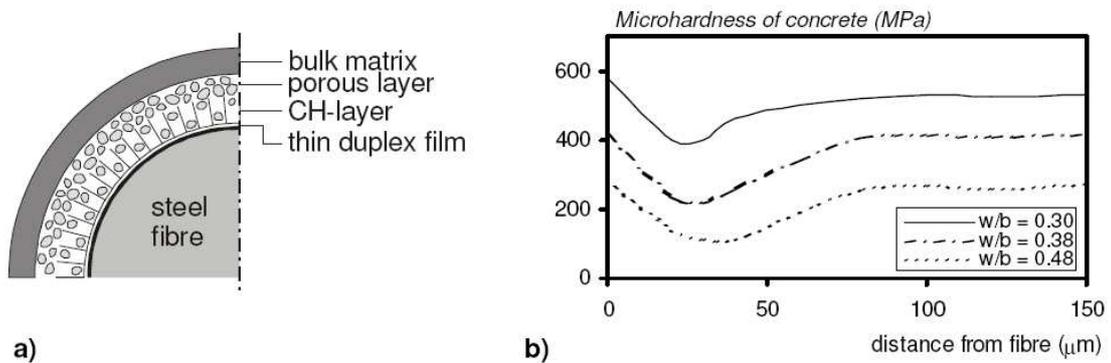


Figura 6: a) Sección transversal de la fibra de acero, intercara con zona de poros y cristales de hidróxido cálcico y masa de matriz de hormigón. [Bentur, Mindess, 1991]; b) Resultados de microdureza alrededor de las fibras de acero para diferentes relaciones W/B [Wei et al., 1986].

Los valores mostrados en la figura 6 b, por Wiet et al., 1986, muestran como a medida que la relación agua /material cementante (W/B) es menor, la microdureza del hormigón es mayor con lo cual el efecto de confinamiento en la zona de la intercara fibra /matriz es mejor y el esfuerzo de deslizamiento será mayor.

En la figura 6 a, podemos observar la formación de varias capas alrededor de la intercara fibra de acero /matriz, donde nos encontramos con una capa más débil formada por poros entre los cristales de hidróxido cálcico y el grueso de la matriz.

Los factores que a continuación se especifican, son fundamentales para aumentar la capacidad de arrancamiento de las fibras metálicas:

Tipo y calidad del cemento, su menor tamaño (45 micras) y máxima finura, mayor área específica y su composición química, hacen que la matriz sea más resistente mecánicamente.

Presencia de filler fino, porcentaje de áridos y tamaño máximo.:

El tamaño de las partículas de humo de sílice (0.15 micras), ceniza volante (70 micras), metacaolín (20 micras), es más bajo con respecto al grano de cemento. Estas adiciones y fillers rellenan eficientemente los espacios entre las partículas de cemento y las fibras, incrementando la compacidad en la intercara. En la reacción puzolánica del humo de sílice, los cristales de hidróxido cálcico (portlandita) son reemplazados por cristales de silicatos cálcicos mucho más resistentes, ello supone una mejora en la resistencia de la intercara, [Bentur, Mindess, 1991]. La retracción del hormigón puede ser de 2 a 3 veces mayor con humo de sílice que sin el, esto significa que la presión de anclaje que ejerce la matriz sobre la fibra es más alta, mejorando la resistencia a fricción de la fibra durante los esfuerzos de arrancamiento, [Li & Stang, 1997].

En cuanto a la granulometría de los áridos y el tamaño máximo de árido, al estar utilizando morteros, el tamaño de los áridos es muy pequeño, en los estudios de Guerrero et al., 2000; $D_{m\acute{a}x.} = 1$ micra, el máximo esfuerzo de arrancamiento de las fibras con patilla al final de la fibra incrementa con un 10 -20 %, por eso la tensión de tracción es tan alta, comparada con los morteros don una fracción granulométrica 5/7. La zona de la intercara fibra matriz hay una disminución de la dureza, un factor a tener en cuenta es la capa de poros; quizá la composición de los áridos tenga una influencia indirecta a través de su trabajabilidad y facilidad de eliminación del aire ocluido.

Presencia de fibras secundarias que incrementen el grado de confinamiento del hormigón alrededor de la fibra. Podemos utilizar fibras de polipropileno PP, o de acero. El incremento de la resistencia durante el arrancamiento podemos mejorarla incluso en un 200% [Naaman et al., 1991], con la utilización de "SIFCON" con un 11 % volumen de fibras.

En cuanto al esfuerzo o la cinética del empuje (pull out), destacan los ensayos realizados por Vanita et al., 1991, con fibras metálica con anclaje (al fibra de la fibra), donde la velocidad de arrancamiento de 2.12 mm/s, muestran un incremento del valor de arrancamiento del 10- 40 %, comparado con bajos valores de velocidad de arrancamiento con 8.5 micras/s. Las altas velocidades de arrancamiento cambian el modo de fallo, de deslizamiento a la rotura de la fibra en el instante del tirón. Para materiales o estructuras sometidas a impactos el comportamiento es ideal.

Ahora bien, en el caso que acero se rompa o se deforme, la tensión tangencial en la intercara fibra hormigón, debe ser altísima ya que el límite elástico del acero es muy alto, para darse este caso donde la tensión tangencial es tan alta, debe transmitirse al hormigón esfuerzos de tracción que este no puede contrarrestar, por ello el acero desliza en la intercara pasta /acero, con lo cual tendrá lugar el fallo del material.

Las fibras en general minimizan los efectos de la retracción a edades tempranas.

La misión de las fibras es la de coser o formar puentes de unión entre la fisura y la matriz con el fin de evitar que la fisura se propague y crezca. Podemos observar en la figura 7, como la combinación de distintos tipos de fibras en función de su longitud y espesor, se consigue retasar la aparición de la microfisura, que es el inicio de la macrofisura, retrasando en la medida de lo posible que ésta crezca con las fibras más largas, aumentando con ello el estado tensional.[32]

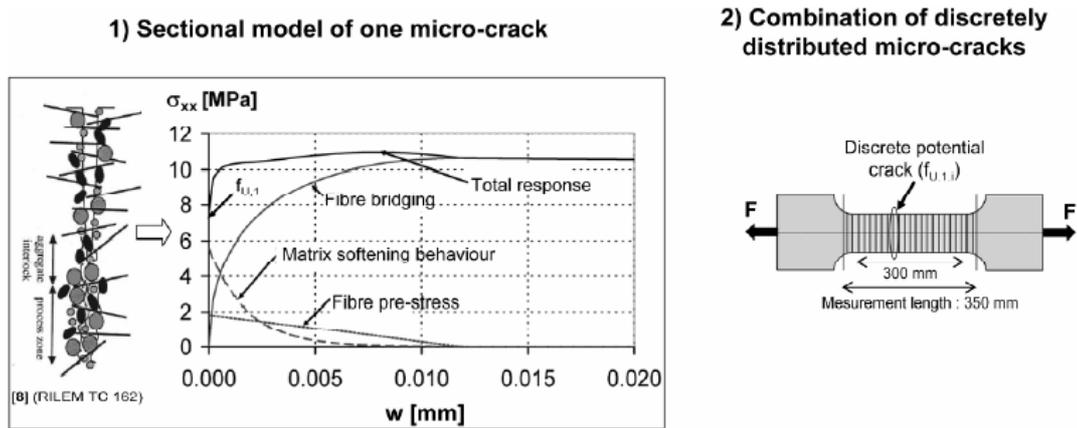


Figura 7: 1) Modelo de sección de una microfisura, 2) Distribución discretizada de las microfisuras.

La mejora en el comportamiento resistente a tracción simple figura 7, es debida principalmente al incremento del número de fibras que cosen la microfisura en el espacio entre áridos, como se aprecia en la figura 8 a, en correlación con la gráfica tensión /desplazamiento de la figura 8 b.

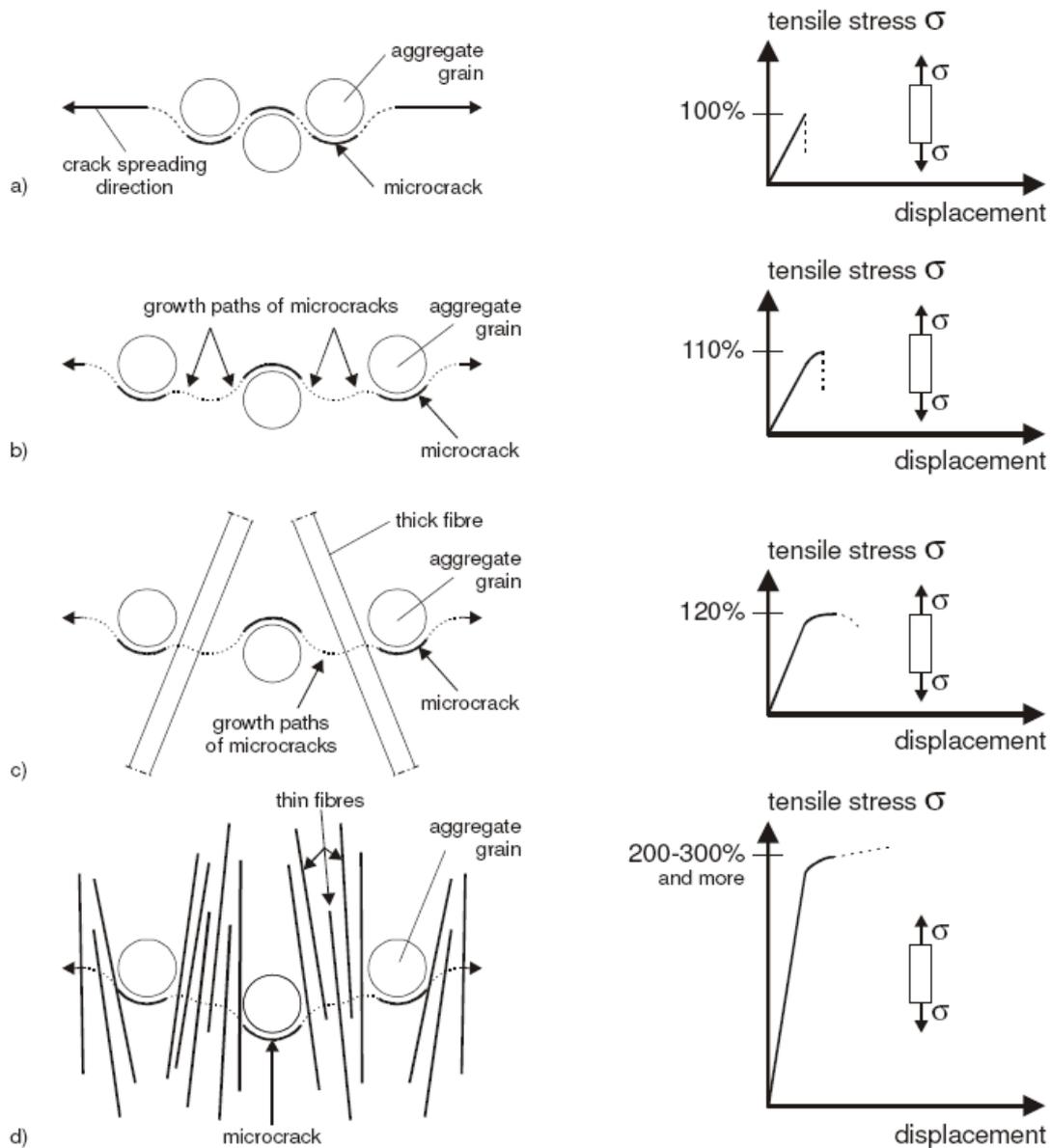


Figura 8: a) muestra el efecto de la fibra corta en la microfisura y la figura b) muestra el efecto de la fibra larga en la macrofisura. Tesis Marcovik 2006.

En el siguiente estudio realizado por Wuest, J.; et al. In: Model for predicting The UHPFRC tensile hardening response [35], en la dosificación se han utilizado 1000 kg/m³ de cemento, fibras metálicas entre un 4-6% (vol. hormigón) y una relación A/C menor a 0.15; los resultados se muestran en la tabla 8, para los modelos UHPFRC1 con un 4 % de volumen de fibra y el modelo UHPFRC 2 con un 6% y el tercer material que se compara es el ECC (hormigón flexible) que posee un 2 % de fibras de acetato de polivinilo (PVA).

En la tabla 4, se muestran los datos donde el UHPFRC-2 y ECC, han conseguido ampliar el dominio frágil (concepto en figura la figura 20) hasta 1% frente al 0.1% en el UHPFRC-1, debido a que en los primeros (UHPFRC-2 y ECC) existe una gran cantidad de fibras orientadas en el sentido paralelo de los esfuerzos de tracción.

Tabla 4: Resultados de los ensayos con distintos hormigones de altísimas prestaciones.

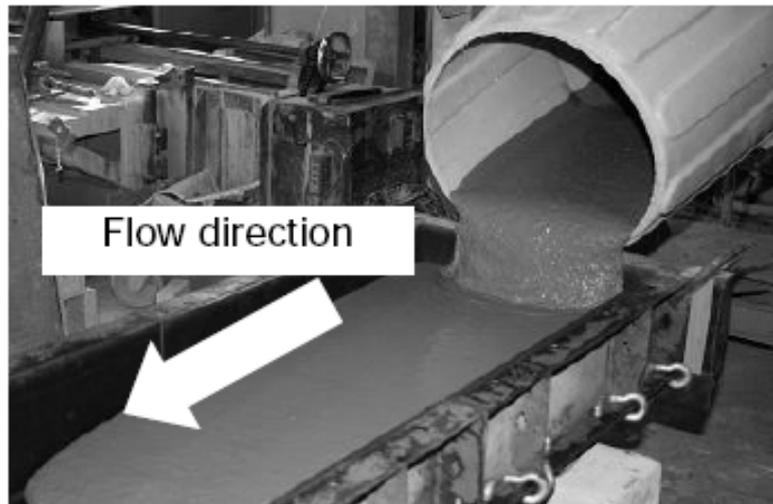
		Group specimen results				Selected specimen results			
		$\epsilon_{U,1}$ [%]	$f_{U,1}$ [MPa]	$\epsilon_{U,max}$ [%]	$f_{U,max}$ [MPa]	$\epsilon_{U,1}$ [%]	$f_{U,1}$ [MPa]	$\epsilon_{U,max}$ [%]	$f_{U,max}$ [MPa]
UHPFRC-1	Average	0.018	9.0	0.07	9.65	0.021	10	0.1	10.7
	Std. Dev.	0.002	0.9	0.02	0.7				
UHPFRC-2	Average	0.027	10.5	0.27	12.6	0.032	11.5	0.24	13
	Std. Dev.	0.006	1.0	0.06	1.4				
ECC	Average	-	3.11	0.99	4.89	Not mentioned			
	Std. Dev.	-	0.23	0.57	0.07				

Los hormigones que posee un mayor volumen de fibras y para una misma orientación de las fibras, posee un campo frágil de menor tamaño, a medida que disminuye la orientación en el sentido de la tensión, el dominio frágil disminuye considerablemente la resistencia [15]. La cantidad de energía absorbida es mucho mayor en las mezclas con un mayor porcentaje de fibras orientadas en la dirección de la carga.

En el estudio realizado por Pank, W.; et al (2008), la orientación de las fibras es fundamental que sean lo más paralelas posibles a la dirección de los esfuerzos principales, debido a que la respuesta tensional aumenta y permite aperturas de fisura mayores, con lo cual aumenta la energía necesaria de deformación aumentado pues el comportamiento del material de forma dúctil. [34]

Aumenta la resistencia de tracción a medida que la esbeltez de las fibras aumenta de acuerdo con una orientación adecuada. Del mismo modo también permite valores de apertura de fisura mayores. Esto es debido a que el aumentar la esbeltez de las fibras podemos tener una mayor cantidad de éstas con un mejor reparto y distribución por toda la masa, mejorando el comportamiento del hormigón.

Las fibras tienden a orientarse en la dirección de hormigonado, como se aprecia en la fotografía 2, se obtiene así la mejor disposición de la pieza estructural frente a los esfuerzos de tracción.



Fotografía 2: Dirección de hormigonado en función del vertido en el molde.

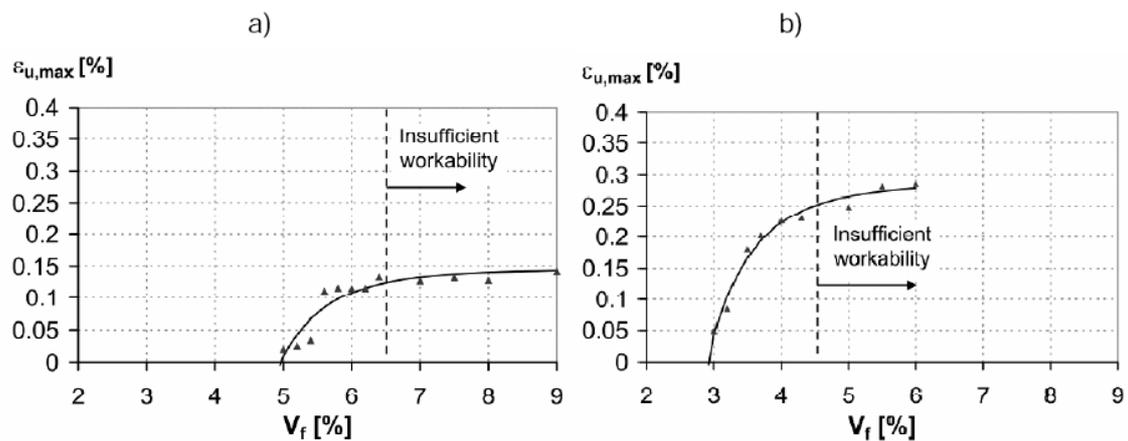


Figura 9: Extensión del dominio frágil en función del volumen de fibras, en la mezcla 1 a) y b) mezcla 2.

Como podemos observar en la figura 9, a medida que aumentamos el volumen de fibras la trabajabilidad disminuye.

En el trabajo realizado por Empelmann, M.; et al. (2006) utilizando varias combinaciones de mezcla de fibras en función de su longitud y esbeltez, como única variable, como se muestra en la tabla 5, comprueban la trabajabilidad (ver figura 9), la resistencia a compresión, a tracción e incluso la resistencia al fuego del material. [35]

Tabla 5: Composición de los distintos tipos de hormigones y su variable de fibras.

UHPFRC 160 (B4Q-0)	[kg/m ³]	[kg/dm ³]	[dm ³]		[kg/m ³]	[kg/dm ³]	[dm ³]
CEM-I 52.5 R HS-NA	650.0	3.10	209.7	Basalt 2/5	298.5	3.06	97.5
ELKEM Microsilica Grade 983	177.0	2.20	80.5	Basalt 5/8	298.5	3.06	97.5
Quartz sand 0.125/0.50 mm	354.0	2.65	133.6	Water	158.0	1.00	158.0
Quartz flour I	325.0	2.65	122.6	Superplasticizer Glenium 51	30.4	1.11	27.4
Quartz flour II	131.0	2.65	49.4	SF l _f /d _f = 9/0.15 mm (2.47 Vol.-%)	193.9	7.85	24.7

Steel fibre l _f / d _f	B4Q-0 (SPP-ref.)	B4Q-1	B4Q-2	B4Q-3	B4Q-4	B4Q-5	B4Q-6	B4Q-7	B4Q-8	B4Q w/o SF
9 / 0.15 mm	2.47 Vol.-%						0.25 Vol.-%			
17 / 0.15 mm								1.50 Vol.-%		
15 / 0.15 mm		0.50 Vol.-%				0.25 Vol.-%	0.25 Vol.-%			
30 / 0.38 mm		1.50 Vol.-%	1.50 Vol.-%	1.25 Vol.-%	1.00 Vol.-%	1.00 Vol.-%	1.00 Vol.-%	0.75 Vol.-%		
PP-microfibre	0.0 kg/m ³	1.0 kg/m ³	0.0 kg/m ³	0.5 kg/m ³	0.0 kg/m ³	0.0 kg/m ³	1.5 kg/m ³	0.0 kg/m ³	2.0 kg/m ³	0.0 kg/m ³

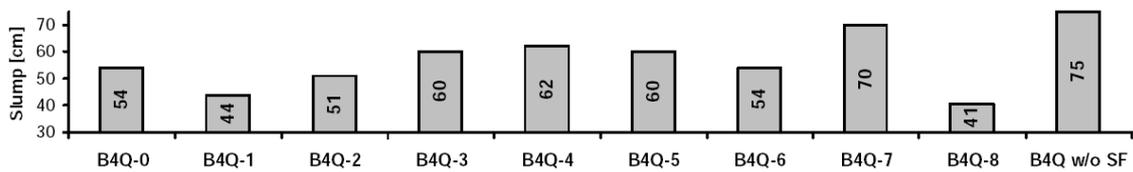


Figura 10: Medida de la trabajabilidad con Slump Flow, en función del tipo de mezcla.

La trabajabilidad se pierde a medida que aumentamos la cantidad de fibras en la masa, debido al efecto malla.

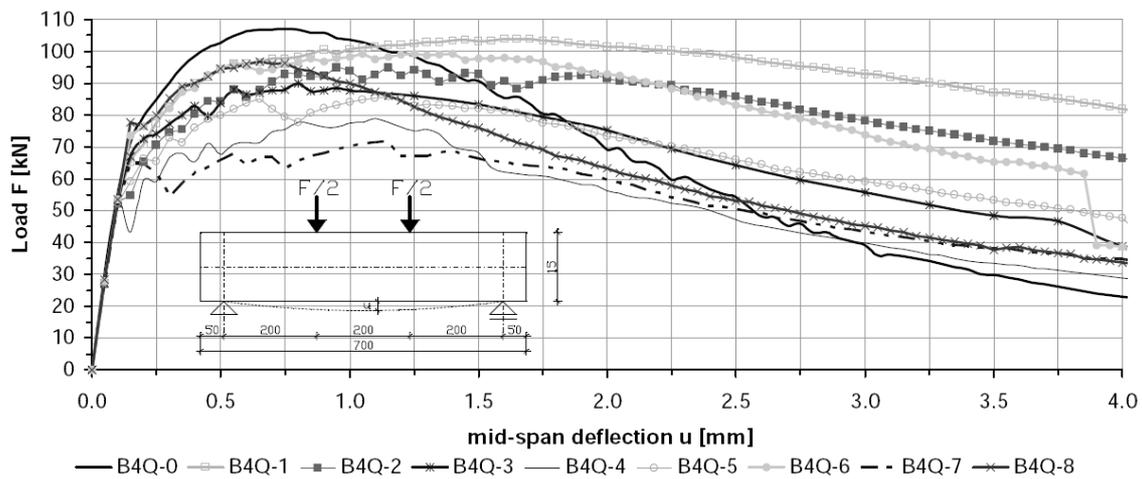


Figura 10: Diagrama carga deformación en función del tipo de hormigón, para el ensayo de flexión.

Empelmann, M.; et al. (2006).

A medida que aumentamos el volumen de fibras estamos aumentando la capacidad de deformación, aumentando la energía de rotura, como nos indica la figura 10.

La figura 11, nos muestra la relación entre el comportamiento a compresión de las mezclas con una sola tipología de fibra, la carga máxima crece hasta una deformación del 3.5 ‰, con tendencia del material a un comportamiento dúctil tras su fisuración.

Sin embargo podemos comprobar en la figura 12, como el intervalo de la carga máxima es de 3 y 3.5 ‰, gracias a la incorporación en capa tipo de hormigón varios tipos distintos de fibras metálicas. El hormigón sin fibras metálicas (B4Q w/o SF) muestra un descenso vertical después de la carga máxima, no muestra aviso previo al colapso súbito, propio de un material muy frágil.

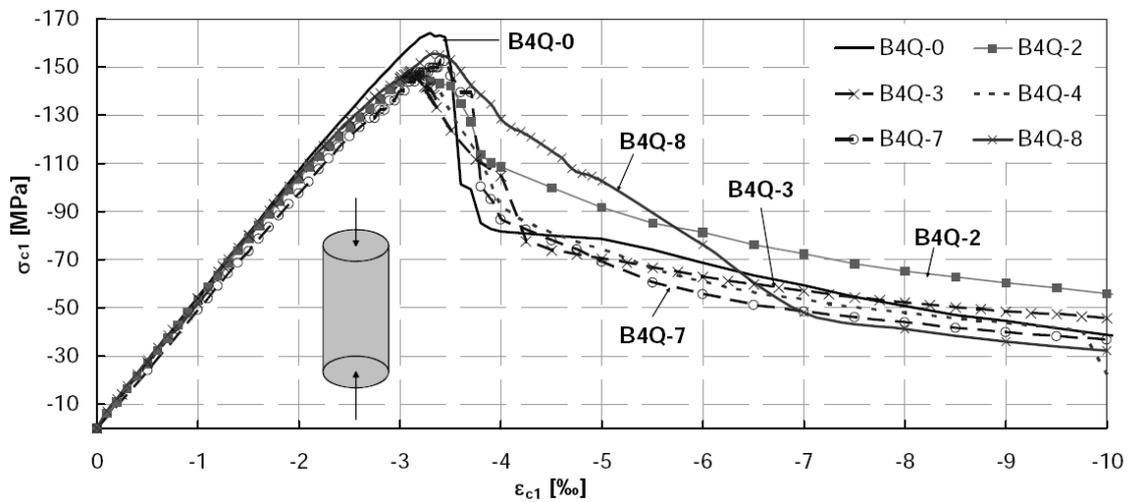


Figura 11: Diagrama tensión de compresión deformación para una tipología de fibras en la mezcla. Empelmann, M.; et al. (2006).

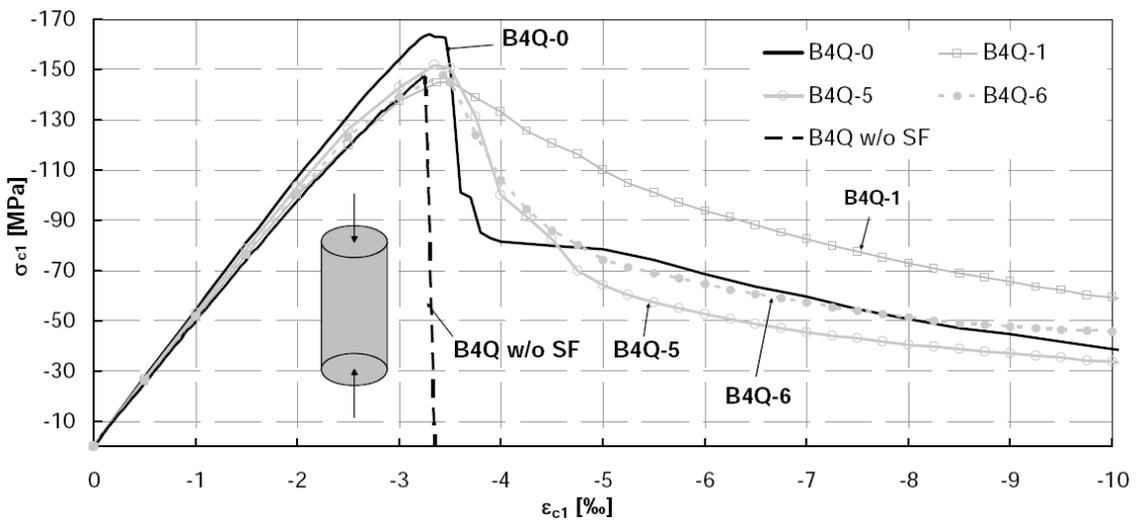


Figura 12: Diagrama tensión de compresión deformación para varias combinaciones de fibras en la mezcla. Empelmann, M.; et al. (2006).

3.2.2.- GFRP, polímero reforzado con fibras de vidrio.

Los materiales compuestos son la combinación de diversos materiales metálicos, cerámicos y polímeros, ante la necesidad de encontrar nuevos materiales que se adapten mejor a usos ya existentes o el acceso a nuevas tecnologías que requieren propiedades que los materiales existentes no las poseen.

Este sistema artificial formado por dos o más constituyentes de diferente composición, no miscibles, donde encontramos dos constituyentes básicos, matriz y refuerzo, y un tercero originado de la interacción entre los dos primeros, la intercara.

La matriz, el constituyente continuo del material, mantiene el refuerzo en su sitio y lo protege de las agresiones exteriores. Transfiere la sollicitación mecánica aplicada a la intercara. En materiales con direcciones preferentes, sus propiedades mecánicas condicionan las propiedades mecánicas de aquellas direcciones no preferentes. Limita la temperatura de trabajo del material compuesto. Se utilizan como matrices tanto metales como polímeros o cerámicas, dando lugar a tres grandes familias de materiales compuestos en función de la naturaleza de la matriz.

- Materiales compuestos de matriz metálica: Se caracterizan por sus buenas propiedades elásticas y resistentes, presentan gran tenacidad de fractura. Sin embargo presentan temperaturas de trabajo relativamente bajas para determinadas aplicaciones. La incorporación de refuerzos de naturaleza cerámica mejora el comportamiento a alta temperatura de los metales, posibilitando su uso en aplicaciones donde la exigencia térmica sea mayor.

- Materiales compuestos de matriz cerámica: Los materiales cerámicos se caracterizan por su capacidad de trabajo a altas temperaturas a los cuales son capaces de mantener sus propiedades elásticas y resistentes. Presentan una resistencia química elevada y una conductividad térmica muy baja. Sin embargo su tenacidad de fractura es muy baja y limita su uso en aplicaciones de responsabilidad mecánica elevada.

La incorporación de refuerzos de naturaleza cerámica, como las fibras cerámicas, incrementan su tenacidad de fractura.

- Materiales compuestos de matriz polimérica: Los materiales compuestos de matriz polimérica se caracterizan por sus buenas propiedades elásticas y resistentes específicas, como consecuencia de su baja densidad. Presentan una baja conductividad térmica y eléctrica junto con una buena resistencia química.

Tabla 5a: Características físicas de los materiales compuestos.

Material	R. específica	R. tracción_Mpa	E_Mpa	Coef. Expansión_10 ⁻⁶ /°C
Poliéster	1,28	45-90	2,5-4,0	100-110
Viniléster	1,07	90	4	80
Epoxi	1,03	90-110	3,5	45-65

Tabla 5b: Tipos de resinas en función de la temperatura de trabajo.

Temperaturas			
Bajas	Medias	Medias - Altas	Altas
			Bismaleimida
Poliéster	Viniléster	Fenólica	Poliimida
	Epoxi		Esteres cianato
			Polieteramida

La incorporación de refuerzos de carácter cerámico, tales como fibra de vidrio o de carbono, o incluso poliméricas (KEVLAR o polietileno) permite incrementos de las propiedades mecánicas globales sin un incremento importante de la densidad media del material.

El refuerzo: Es el constituyente discontinuo del material. Su misión principal es mejorar o complementar las propiedades de la matriz en determinadas direcciones prefijadas o de forma aleatoria.

La naturaleza es metálica, cerámica o polimérica. Los refuerzos se clasifican en función de su geometría: partículas, monofilamentos, fibra corta y fibra larga. Destacan por sus propiedades, las fibras cerámicas (fibras de carbono, de vidrio, boro, carburo de silicio, alúmina, nitruros...) y las fibras poliméricas (fibras de aramida, polietileno...). En el seno de un material compuesto pueden coexistir varios tipos de refuerzo que aporten distintas características al material final.

La insolubilidad entre los distintos constituyentes que forman un material compuesto hace que surja una región de interacción físico/ química que se denomina intercara.

Normalmente se lo considera, dada su importancia, como el tercer constituyente básico de todo material compuesto. Su papel es fundamental en la constitución de un material compuesto, ya que proporciona la continuidad del material.

Sus propiedades condicionan fuertemente las propiedades finales del material compuesto. Transfiere la carga mecánica desde la matriz al refuerzo, establece la continuidad eléctrica y térmica de los constituyentes, establece la compatibilidad química entre éstos y es el responsable de las sinergias que surgen de la combinación de dos materiales. Esto conlleva a controlar las propiedades de la intercara para que las características globales del material compuesto sean las adecuadas.

Este control puede llevar a la modificación de la superficie de refuerzo, ya sea física o químicamente. Surgen así dos tipos básicos de intercara, una, cuando la intercara es fruto de una interacción de tipo físico (rugosidad superficial del refuerzo, presencia de tensiones de compresión o tracción sobre la intercara, presencia de cargas electrostáticas), y otra cuando esta se limita a una superficie de contacto entre matriz y refuerzo.

La posibilidad de tener el control sobre la microestructura final del material nos permite combinar las propiedades del refuerzo y matriz, así como la orientación preferente de éstas. Esto permite adecuar y optimizar las propiedades del material para cada aplicación concreta, e incluso, permite fabricar materiales con una respuesta programada ante una serie de condiciones. Esta optimización de las propiedades finales del material, supone, además de una reducción de la cantidad de material utilizado con la subsiguiente reducción tanto en coste de inversión como en operación.

El efecto sinérgico es producto de la combinación de matriz y refuerzo. El factor clave para la aparición de este efecto es la existencia de una intercara matriz-refuerzo con unas propiedades físicas propias. Dada que la intercara es la responsable de los procesos de transferencia de carga mecánica y de aportar continuidad al material, la respuesta del material ante sollicitaciones externas se verá fuertemente condicionada por la naturaleza de ésta. En el caso de materiales de matriz cerámica en la que los refuerzos generan con la matriz intercara mecánicamente débiles, estas intercara serán, dadas su debilidad, son zonas de propagación de grietas y producirán un aumento de su tenacidad de su fractura respecto a la de la matriz sin reforzar y/o a la del refuerzo aislado.

La anisotropía del material, además de ir dirigida a la optimización y aprovechamiento de las propiedades de matriz y refuerzo en aquellas direcciones que más interese, permite generar respuestas controladas ante situaciones específicas, es decir, a través del diseño de las orientaciones relativas entre capas, se puede inducir la aparición de momentos flectores, torsores, etc., ante la presencia de esfuerzos de otra naturaleza.

El control de las propiedades de la intercara, refuerzo, matriz y el control de la orientación y distribución del refuerzo, requieren de procesos de fabricación complejos y costosos que hacen aumentar de forma notable su coste final, lo que reduce su competitividad económica. Su uso se ha limitado a aplicaciones en las que el peso final del material es un factor clave o donde el coste del material no sea un impedimento, vehículos y embarcaciones de alto rendimiento, F1 y embarcaciones de la copa América, aeronáutica.

Resinas de poliéster:

Constituye una de las familias más importante de las resinas termoestables utilizadas en los materiales compuestos como matriz.

El curado de una resina de poliéster está afectada por el uso de iniciadores químicos y aceleradores así como por aplicación de calor o exposición a la radiación. En el curado a temperatura ambiente, el acelerador es un pequeño porcentaje, añadido a la resina, resina pre-acelerada, ya que así se evitan posibles accidentes que podrían ocurrir si el acelerador y el iniciador se mezclarán directamente, pues reaccionan de forma explosiva.

En la práctica, la resina de poliéster se obtiene por policondensación del anhídrido maleico, anhídrido ftálico y propilenglicol. El polímero obtenido es disuelto en estireno. Para el suministro a los usuarios, la mezcla se estabiliza con inhibidores(hidro equinona).

El endurecimiento de las resinas de poliéster se puede provocar según la temperatura, a temperatura ambiente, con la ayuda de un acelerador y a temperatura elevada 90 °C.

Las resinas de endurecimiento a temperatura ambiente son un sistema versátil que puede ser adaptado a muchos procesos y a especificaciones de prestaciones finales. La polimerización conduce al endurecimiento y se realiza sin eliminación de productos secundarios y sin necesidad de presiones ni temperaturas elevadas.

Las fases de reactividad de la resina de poliéster son:

-Tiempo de gel o tiempo que transcurre desde que se añade el último de los componentes del sistema catalítico a la resina y el momento que alcanza el estado de gel.

-Pico exotérmico o temperatura alcanzada por la resina durante la polimerización.

-Intervalo de tiempo de gel-pico exotérmico o tiempo transcurrido entre la gelificación de la resina y el pico exotérmico.

Los principales tipos de resinas de poliéster son, la ortoftálica, que es una resina de uso general y la isoftálica, que tiene propiedades de resistencia superiores al desgaste y a los agentes químicos.

A la hora de formular las resinas pueden utilizarse rellenos y pigmentos, el primero para mejorar las propiedades mecánicas y el segundo para mejorar la apariencia y la protección.

Son productos inflamables y tóxicos es necesario almacenarlas en locales temperatura no exceda los 25°C.

Fibra de vidrio:

Es el tipo de refuerzo más utilizado actualmente en la fabricación de materiales compuestos. Esto se debe a su gran disponibilidad, sus buenas características mecánicas (tabla 6 y figura 13) y su bajo coste.

Los tipos de fibra de vidrio son enumerados a continuación:

- Vidrio E (Eléctrico): representa casi la totalidad del vidrio textil utilizado en materiales compuestos, más del 90% de los refuerzos, de uso general y buenas propiedades eléctricas. La primera aplicación de este tipo fue el aislamiento de conductores eléctricos sometidos a altas temperaturas.

- Vidrio A (Alto contenido en álcali): es menos resistente y tiene un módulo más bajo que el vidrio E. Gran resistencia química.

- Vidrio AR (Álcali Resistente): es el único vidrio que puede combinarse con el hormigón o cemento ya que cualquier otro sería atacado por los álcalis liberados en la hidratación del hormigón o cemento.

- Vidrio C (Químico): se sitúa entre el vidrio A y E y se utiliza en las capas superficiales de estructuras anticorrosión. Tiene una gran resistencia química.

- Vidrio R ó S (Resistencia): empleado en estructuras de elevadas características mecánicas (aeronáutica) tiene una resistencia a tracción y un módulo de elasticidad muy superiores a las de otros tipos de vidrio. Buena resistencia a fatiga, temperatura y humedad.

Tabla 6: Características físicas de los materiales compuestos.

Material	E_T GPa	σ_T GPa	ρ g/cm ³	E_T/ρ (10 ⁹ ·N·m)/kg	σ_T/ρ (10 ⁹ ·N·m)/kg
Fibras					
E-glass	72	3.5	2.54	29	1.38
S-glass	86	4.6	2.48	35	1.85
Carbono de alto módulo	390	2.1	1.90	205	1.10
Carbono de alta resistencia	240	2.9	1.77	136	1.64
Kevlar-49	130	2.8	1.45	87	1.87
Kevlar-29	60	2.8	1.44	42	1.80
Boro	385	2.8	2.63	146	1.1
Spectra-1000	117	2.6	0.97	120	2.8
Materiales convencionales					
Acero	210	0.34-2.1	7.8	27	0.043-0.27
Aleaciones de aluminio	70	0.14-0.62	2.7	26	0.052-0.23
Vidrio	70	0.7-2.1	2.5	28	0.28-0.84
Tungsteno	350	1.1-4.1	19.3	18	0.057-0.21
Berilio	300	0.7	1.4	164	0.38

E_T : módulo de tracción; σ_T : tensión de tracción; ρ : densidad;

E_T/ρ : módulo específico; σ_T/ρ : tensión específica

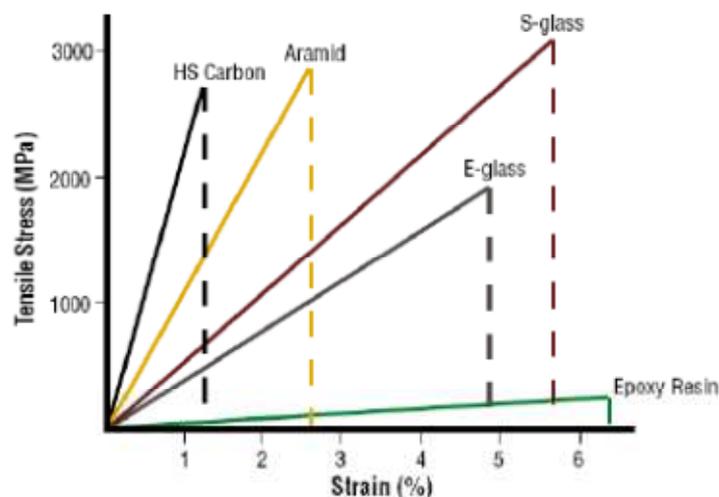


Figura 13: Características físicas de las de refuerzo.

Tabla 7: Características físicas de los tipos fibras de vidrio.

Tipo	Vidrio A	Vidrio E	Vidrio S	Vidrio R
Diámetro de hilo (micras)	5-13	10-20	10	10
Densidad (Kg/m ³)	2500	2540	2480	2590
Módulo Elasticidad (GPa)	69	72	86	85
Resistencia atracción (GPa)	3,1	3,5	4,6	3,4-4,4
Módulo específico	28	28	34	33
Coef. Expansión Térmica 10 ⁻⁶ /°K	8,6	5	5,1	5

- Vidrio D (Dieléctrico): con sus altas propiedades dieléctricas se utiliza sobretodo en la construcción de materiales electrónicos de comunicación, fabricación de radares. Presentan débiles pérdidas eléctricas y de aquí su empleo como material permeable a las ondas electromagnéticas.

- Vidrio B (Boro): excelentes propiedades eléctricas y gran durabilidad.

- Vidrio ERC (Eléctrico y Resistente químico): con propiedades eléctricas combinadas con resistencia química.

- Vidrio X: con base de Li₂O por su transparencia a los rayos X.

La fibra de vidrio está formada fundamentalmente por sílice, que se asocia a diversos óxidos (alúmina, alcalinos) y se obtiene por fusión de la mezcla de estas materias, pasando por la hilera y sometiéndose a una operación de estirado. En la tabla 8, se presenta la composición química de la fibra de vidrio tipo E, la más utilizada.

Tabla 8: Composición química de la fibra de vidrio tipo E.

Componente	Cantidad %
SiO ₂	53-56
Al ₂ O ₃	14-15
CaO	17-22
MgO	1
Na ₂ /K ₂ O	0,8
Fe ₂ O ₃	0,3
B ₂ O ₃	6-8

Las principales características de la fibra de vidrio son:

- Alta adherencia fibra-matriz, gracias a los recubrimientos apropiados para la mayoría de las matrices orgánicas.
- Resistencia mecánica, siendo su resistencia específica (tracción/densidad) superior a la del acero.
- Características eléctricas. Es aislante eléctrico incluso en espesores reducidos. Tiene buena permeabilidad dieléctrica. Permeable a las ondas electromagnéticas.
- Incombustibilidad, materia mineral, la fibra de vidrio es incombustible por naturaleza. No propaga la llama ni origina con el calor humos ni toxicidad.
- Estabilidad dimensional, poco sensible a las variaciones de temperatura e higrometría, tiene un bajo coeficiente de dilatación.
- Compatibilidad con las materias orgánicas. Su aptitud de recibir diferentes ensimajes creando un puente de unión entre el vidrio y la matriz le confieren la posibilidad de asociarse a numerosas resinas sintéticas, así como a ciertas matrices minerales, tales como el yeso y el cemento.
- Imputrescibilidad, (no sufre ninguna alteración). Es insensible a la acción de los roedores y de los insectos.
- Débil conductividad térmica. La utilización de los materiales compuestos en la construcción permite suprimir los puentes térmicos, dando lugar a un considerable ahorro de energía.

Las presentaciones de la fibra de vidrio a escala industrial se relacionan a continuación y están en función de su uso. Las características de utilización que determinan la elección de un tejido son:

- La facilidad de manipulación y colocación.
- Regularidad del gramaje y espesor.
- Continuidad del refuerzo.
- Facilidad de impregnación.

3.2.3.- Unión.

La unión de los materiales híbridos puede realizarse de 4 formas distintas, uniones químicas, uniones mecánicas, uniones por confinamiento y uniones mixtas.

En las **uniones químicas**, el uso de adhesivos es una de las aplicaciones más importantes en la industria. Al utilizar los adhesivos no se modifican las propiedades de los sustratos ni de los componentes adheridos. Se trata de un material capaz de mantener unidos dos materiales sólidos, proporcionando la fuerza de atracción física necesaria entre las dos superficies. El material al cual se adhiere el adhesivo se denomina sustrato o adherente.

Los adhesivos ofrecen altas prestaciones gracias al conjunto de interacciones físicas y químicas en la interfase adhesivo/adherente y en ocasiones superiores a los de otras soluciones para el ensamblaje y el sellado con las ventajas en cuanto a ahorro de costes.

Las uniones adhesivas presentan las siguientes ventajas con respecto a otros métodos de ensamblaje de materiales, distribución uniforme de tensiones, rigidización de las uniones, no se produce distorsión del sustrato, permiten la unión económica de distintos materiales, uniones selladas, aislamiento, reducción del número de componentes, mejora del aspecto del producto, compatibilidad del producto, uniones híbridas, se evitan la concentración de tensiones.

Los adhesivos son puentes entre las superficies de los sustratos, tanto si son del mismo, como si son de distinto material. El mecanismo de unión depende de la fuerza de unión del adhesivo al sustrato o adhesión y de la fuerza interna del adhesivo o cohesión.

Se diseña normalmente las formulaciones adhesivas para lograr que las fuerzas adhesivas sean siempre superiores a las cohesivas. De este modo, conociendo las propiedades mecánicas del adhesivo se puede evaluar y, por tanto predecir, el comportamiento mecánico de una unión adhesiva. [4]

La naturaleza y la magnitud de las tensiones que se esperan durante el servicio del ensamblaje deben conocerse antes de decidir el tipo de adhesivo que se debe emplear.

Los esfuerzos mecánicos actúan sobre los conjuntos ensamblados como esfuerzos de tracción, de compresión, de flexión, de torsión y de cortadura, provocando así las

tensiones. Aún así, las tensiones no aparecen únicamente como consecuencia directa de transmitir fuerzas o energías, sino que también se pueden dar por la aparición de fenómenos secundarios que acompañan a los cambios de temperatura.

Esquemáticamente, podemos hablar de los siguientes tipos de solicitaciones sobre las uniones adhesivas, esfuerzos normales de tracción y de compresión, esfuerzos de cortadura o cizalla, esfuerzos de desgarro y esfuerzos de pelado.

Para conseguir uniones adheridas correctas hay que plantear durante la etapa de diseño un trazado que evite en lo posible esfuerzos que no sean de tracción o de cortadura en las uniones adhesivas. Un paso extremadamente importante durante el proceso de diseño de la junta adhesiva es establecer los requisitos de la aplicación. Propiedades como la resistencia a cortadura, la resistencia a impacto, la pérdida de resistencia por envejecimiento térmico, las tolerancias de montaje (holguras), la resistencia a la humedad, a nieblas salinas y a disolventes, los tiempos de manipulación requeridos y los límites aceptables para cualquiera de tales pruebas son ejemplos de características que deben ser especificadas.

Tanto el diseño como la elección del adhesivo deben acomodarse a la aplicación, evitando en la medida de lo posible juntas adhesivas sobredimensionadas, que suelen encarecer de forma desproporcionada e innecesaria los costes de montaje. Los factores geométricos que se consideran en primer lugar son la anchura de la adhesión, la longitud de solapamiento y los espesores de adhesivo y sustratos. La resistencia a cortadura es directamente proporcional a la anchura de solapamiento. Sin embargo, la relación entre longitud de solapamiento y resistencia a cizalla no es lineal, aunque se produce un incremento. Esto es debido a que las tensiones se acumulan en los extremos de la zona de solapamiento

La longitud y la anchura no son las únicas variables geométricas que influyen en la resistencia de la adhesión. La carga a partir de la cual un sustrato comenzará a deformarse plásticamente depende de su rigidez y grosor. Sucede con frecuencia que la resistencia de adhesión de dos piezas delgadas supera el límite elástico y la resistencia última de los sustratos.

De Bruine y Houwink analizaron la relación entre grosor, solapamiento y tensión, definiendo como "factor de junta" la relación entre la raíz cuadrada del grosor y la longitud de solapamiento.

Consideraciones en el diseño:

1. Utilizar siempre la mayor área posible, respetando las limitaciones de costo de la aplicación.
2. Alinear correctamente las uniones de modo que las tensiones puedan ser absorbidas en la dirección de mayor resistencia de la unión.
3. Maximizar esfuerzos de cortadura y minimizar esfuerzos de pelado y de desgarramiento.
4. Diseñar sub ensamblajes de modo que se minimicen las operaciones de ensamblaje con adhesivo.
5. Recordar que debemos anticiparnos a todas las posibles solicitaciones (particularmente las de pelado y desgarramiento) que puedan aparecer durante el ensamblaje o las operaciones de manipulación, así como las que se puedan producir durante el funcionamiento de la pieza.
6. Evitar partes con curvaturas complejas.

Las **uniones mecánicas**, se realizan a través de tornillería [17] o mediante conectores [8], esta unión en los sistemas híbridos proporciona concentración de tensiones en el hormigón y en el FRP genera disminución de la tensión pero no hay concentración de tensiones ya que los PRF no tienen redistribución tensional debido generalmente por la orientación de las fibras.[17] Figura, 14.

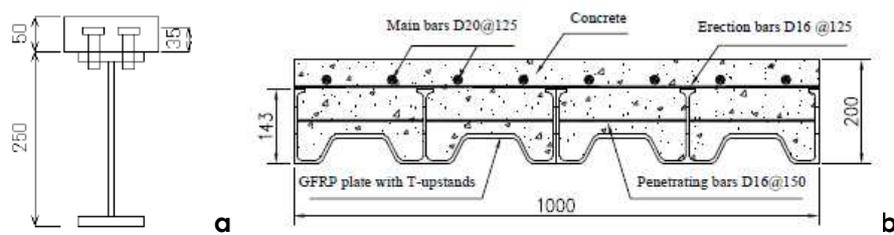


Figura 14: a) Sección en I con conectores [7], b) de una losa con conectores de FRP [8].

Las **uniones por confinamiento** se realizan por medio de una técnica denominada "Filament Winding" que consiste en un enrollamiento de la sección híbrida de FRP y hormigón, con el fin de evitar la falta de unión entre ambos materiales. Las secciones tipo caja son las más adecuadas para realizar esta técnica de enrollamiento (envoltura) que confina al bloque de hormigón y que le garantiza la unión con el FRP.

En los casos donde la dirección predominante de las fibras es la longitudinal el enrollamiento se produce a 45 ° ó a 90° ó los dos casos en una o varias capas proporcionando una mejora a cortante en el alma de la sección además de mejorar la adherencia entre hormigón y FRP. También supone una mejora en la capacidad mecánica última de sistema híbrido de las secciones, discriminando una serie de modos de fallo que proporcionan roturas frágiles para ser llevados a roturas dúctiles.

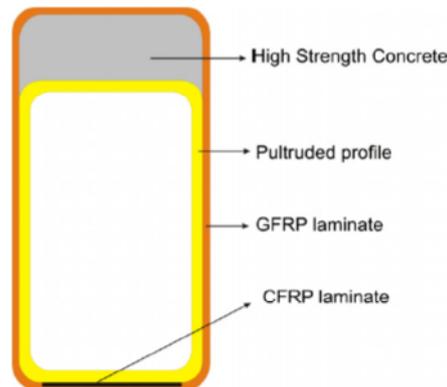


Figura 15: Sección de perfil en caja con un wrapping [14].

Las **uniones mixtas**, son aquellas donde podemos encontrar cualquier combinación de las anteriores. [8, 17]. La combinación de distintos tipos de unión, con respecto al sistema de control resulta una mejora sustancial. La utilización de uniones atornilladas frente a los conectores es mejor rigidizando la pieza y confiriéndole un aumento en la capacidad última de la sección. Cuando además utilizamos la combinación de sistemas mecánicos con adhesivos el aumento de rigidez de la sección y su capacidad última a rotura es muy notable, también el modo de fallo es menos frágil [7]. Figura, 16.

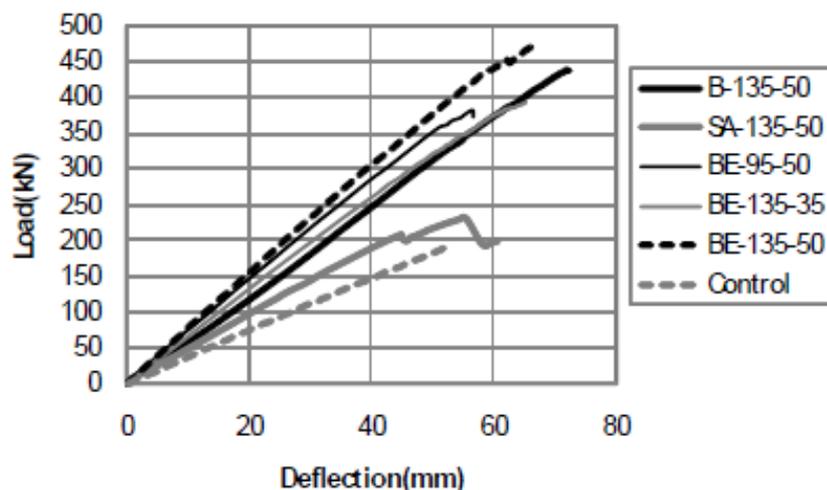


Figura 16: Relación Carga/flecha perfil híbrido sección en I con diferentes uniones [7]. Nota: **BE**: tornillería + adhesivo epoxi, **SA** conectores sin epoxi; **B** tornillos sin epoxi.

3.3.- PRODUCCIÓN DE SISTEMAS HÍBRIDOS.

3.3.1.- Materiales compuestos.

3.3.1.1.- Hormigón

La producción de hormigón es sencilla pero compleja a su vez, ya que cada vez podemos elaborar hormigones a la carta y es ahí donde la complejidad se hace patente.

Se presenta un genérico y sencillo gráfico (figura 17) de las fases de producción de cualquier tipo de hormigón bien sean convencionales, HAR, HAC y los HRF, que podamos utilizar en los sistemas híbridos.

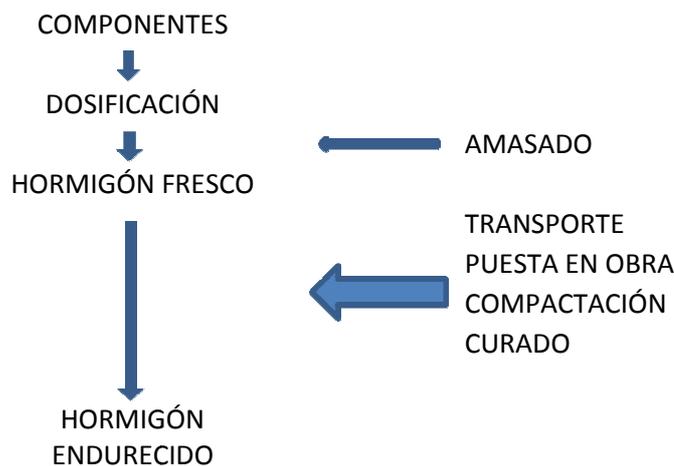


Figura 17: Esquema elaboración del hormigón.

3.3.1.2.- FRP, polímero reforzado con fibras.

Las propiedades del compuesto, además del proceso de fabricación dependerán de la cantidad de refuerzo. A mayor fracción en volumen de fibras, mayores serán las propiedades mecánicas del compuesto resultante.

En la práctica existen unos límites, que garanticen que las fibras son cubiertas totalmente por la resina para que el refuerzo sea eficaz. Generalmente, en un proceso manual, ampliamente usado en la industria de construcción naval, el límite para la fracción de volumen de fibra es aproximadamente del 30 - 40%. La industria

aeroespacial emplea procesos de fabricación más sofisticados, que permiten obtener materiales con fracciones en volumen de fibra alrededor del 70%.

3.3.1.2.1.- Procesos de molde abierto

Moldeo por contacto a mano (Hand lay-up)

Los tejidos de fibras se impregnan a mano con las resinas mediante rodillos o brochas, para que la resina entre en el tejido de refuerzo y su posterior curado al aire, Figura 18. Los materiales que se utilizan, para las resinas son de poliéster, viniléster, epoxi, fenólica; las fibras de todo tipo, aunque los tejidos de alto gramaje de aramida pueden presentar dificultades en la impregnación; el núcleo, puede ser cualquier tipo de material. También podemos realizar FML con esta técnica.

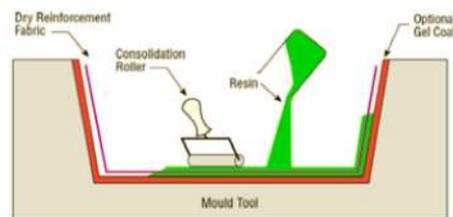


Figura 18: Moldeo por contacto a mano.

Ventajas principales: Presenta un bajo coste en equipamiento y herramientas, si se emplean resinas de curado a temperatura ambiente, es un proceso sencillo incluso in situ. Un mayor contenido de fibra y fibras más largas que con spray de poner en marcha.

Las desventajas principales: La durabilidad de estos compuestos hechos a mano es menor en ambientes agresivos, que los utilizados en procesos automatizados. Hay que tener en cuenta que los compuestos obtenidos en procesos manuales dependen de la habilidad del operario y por tanto variará la uniformidad de sus propiedades y características mecánicas del compuesto. Los laminados de bajo contenido de resina no se puede lograr sin la incorporación de cantidades excesivas de huecos. La limitación concentraciones en el aire de estireno a niveles legislados de poliésteres y ésteres de vinilo es cada vez más difícil sin sistemas de extracción caros. Las resinas deben ser de baja viscosidad para ser colocadas a mano. Esto generalmente compromete sus propiedades mecánicas / térmicas debido a la necesidad de altos niveles de diluyente / estireno.

Proyección simultánea (Spray lay-up)

La fibra y la resina se dispensan a través de una pistola de mano, en el que la fibra se corta y es proyectada hacia el molde junto con la resina catalizada, curándose en condiciones atmosféricas, Figura 19. Las resinas utilizadas son principalmente de poliéster, las fibras son de vidrio y en principio no hay núcleos aunque se podrían aportar por separado.

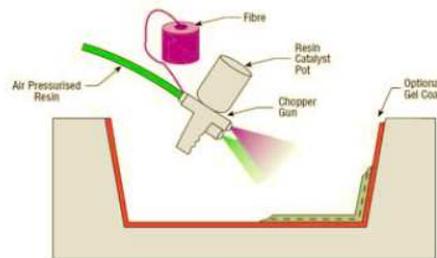


Figura 19: Proceso de proyección simultánea.

Ventajas principales: De bajo coste para depositar rápidamente la fibra y resina con herramientas de bajo costo.

Las desventajas principales: Los laminados tienden a ser muy rico en resina y, por tanto excesivamente pesados. Las fibras cortas limitan las propiedades mecánicas del laminado. Las resinas deben ser de baja viscosidad para ser pulverizables. Esto generalmente compromete sus propiedades mecánicas y térmicas. Los contenidos de estireno de alta de pulverización en las resinas significan que tienen el potencial de ser más perjudiciales y su viscosidad más baja significa que tienen una mayor tendencia a penetrar la ropa. La limitación concentraciones en el aire de estireno a niveles legislados es cada vez más difícil.

Bolsa de vacío

Es una mejora en la laminación manual, eliminándose el aire ocluido mediante la aplicación de vacío, Figura 20. Esto se consigue recubriendo la preforma en húmedo con un film de plástico. El aire que queda atrapado bajo la bolsa se extrae mediante una bomba de vacío, además del exceso de resina, que permite obtener un material más económico. El curado se realiza mediante combinación de calor, presión y vacío, aunque no necesariamente las tres al mismo tiempo.

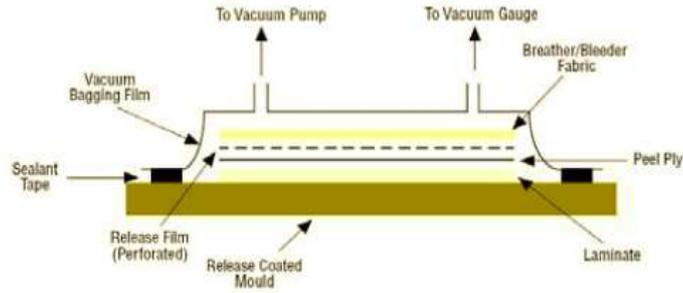


Figura 20: Proceso de fabricación con bolsa de vacío.

La autoclave puede proporcionar una presión adicional al molde, que permite un mejor conformado final de la pieza. Las resinas son principalmente epoxi y fenólicas ya que los poliésteres y vinilésteres pueden dar problemas debido a la excesiva extracción de estireno por la bomba de vacío. Las presiones de consolidación permiten usar tejidos de refuerzo de alto gramaje sin problemas de humectación. En cuanto a los núcleos, se puede utilizar cualquier tipo, siendo necesarias espumas que aguanten elevadas temperaturas, por el propio proceso de producción.

Ventajas principales: un mayor contenido de fibra en el laminado se puede lograr y menores contenidos de aire ocluido comparándolo con hecho a mano en húmedo. Mejora en el mojado de la fibra en húmedo debido a la presión y el flujo de resina a través de fibras estructurales. La bolsa de vacío reduce la cantidad de volátiles emitidos durante el curado.

Las desventajas principales: El proceso adicional aumenta el coste, tanto en mano de obra y en los materiales desechables de ensacado. Un mayor nivel de habilidad es requerida por los operadores. La mezcla y el control de contenido de resina queda determinada por la habilidad del operador

Enrollamiento en húmedo de filamentos (Wet filament winding)

Es el proceso empleado básicamente para componentes huecos, generalmente de sección circular u oval, como tuberías o tanques. Se pasan las fibras a través de un baño de la resina antes de enrollarse sobre un mandril que rota para alcanzar la forma deseada y en el que las fibras impregnadas se van disponiendo según unos determinados ángulos, para su posterior curado en un horno. Figura 21.

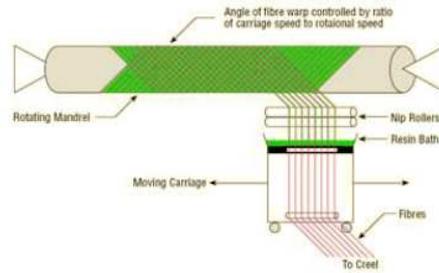


Figura 21: Bobinado en húmedo de filamentos.

Las resinas empleadas son de poliéster, viniléster, epoxi, fenólicas, el tipo de fibra sirve cualquiera tal como vienen del proveedor, no se tejen; los núcleos no presentan problemas pudiéndose utilizar cualquier tipo.

Ventajas principales:

Este puede ser un método muy rápido y por lo tanto económico.

El contenido de resina se puede controlar midiendo la resina sobre cada haz de fibras a través de líneas de contacto.

Los costes de fibra se minimizan ya que no hay un proceso secundario para convertir la fibra en la tela antes de su uso.

Las propiedades estructurales de los laminados pueden ser muy buenas ya que las fibras rectas se pueden colocar en un patrón complejo de acuerdo con las cargas aplicadas.

Las desventajas principales:

El procedimiento está limitado a componentes con forma convexa.

La fibra no puede ser fácilmente establecida exactamente a lo largo de la longitud de un componente.

Los costes de mandriles para componentes de gran tamaño pueden ser altos.

La superficie externa del componente está sin moldear y por lo tanto poco atractivo estéticamente.

Moldeo por centrifugación

Se trata de un proceso que permite obtener estructuras huecas cilíndricas o troncocónicas, gracias a la fuerza centrífuga.

Procesos de molde cerrado:**Prensado en frío/caliente**

El tejido de refuerzo se coloca sobre el molde adaptándolo a la forma del mismo, a continuación las fibras se impregnan con resina, para posteriormente aplicarle presión con la otra parte del molde para conformar la pieza, Figura 22. En el caso del prensado en caliente, se trabaja con temperatura ya que se calienta el molde. Se utilizan resinas de poliéster y fenólicas, combinándolas generalmente con fibra de vidrio.

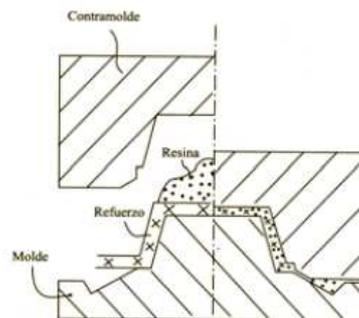


Figura 22: Moldeo por prensado.

Pultrusión

Las fibras se extraen de una madeja a través de un baño de resina y luego a través de una matriz calentado. La matriz completa la impregnación de la fibra, controla el contenido de resina y cura el material en su forma final a medida que pasa a través del troquel. Este perfil de curado es cortado a medida. Telas también se pueden introducir en la matriz para proporcionar dirección de la fibra que no sea a 0°. Aunque la pultrusión es un proceso continuo, produciendo un perfil de sección transversal constante, una variante conocida como "pulforming" permite alguna variación que se introduce en la sección transversal. El proceso de tira de los materiales a través de la matriz para la impregnación, y luego abrazaderas en el material en un molde para el curado. Esto hace el proceso no continuo, pero con capacidad de pequeños cambios en la sección transversal. Figura 23.

Tipos de Materiales:

Resinas: Generalmente epoxi, poliéster, viniléster y fenólica.

Fibras: Cualquiera.

Núcleos: Generalmente no se utiliza.

Ventajas principales:

Esta puede ser una manera muy rápida, y por lo tanto económica, de impregnación y

curado de materiales. El contenido de resina puede ser controlada con precisión. Los costes de fibra se reducen al mínimo ya que la mayoría se toma de una madeja. Las propiedades estructurales de los laminados puede ser muy buenas ya que los perfiles tienen fibras muy rectas, largas y altas fracciones de volumen de fibra.

La zona de impregnación de la resina se puede encerrar lo que limita las emisiones de volátiles.

Las desventajas principales:

Limitado a secciones transversales constantes o casi constantes y los costos de calefacción de matriz pueden ser altos.

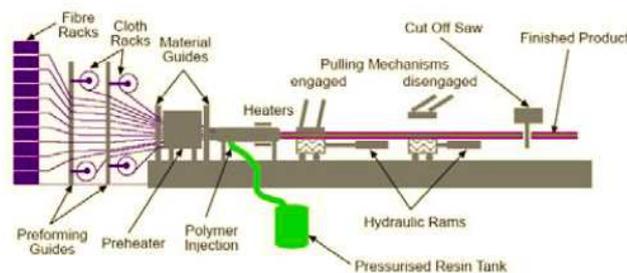


Figura 23: Proceso de pultrusión

Moldeo por inyección

Consiste en un sistema de molde cerrado, donde se introduce una resina de curado rápido, utilizando una premezcla de dos reactivos previa a la inyección en el molde. La reacción de polimerización y el curado final de la pieza se realizan en el molde. Nos podemos encontrar los siguientes tipos de procesos Resin Injection Molding (RIM), Reinforced Resin Injection Molding (RRIM) y Structural Resin Injection Molding (SRIM). En el caso RRIM las fibras, pueden colocarse en el molde cerrado o pueden ser añadidas a trozos a uno de los componentes de la resina, y premezclarlos antes de la inyección. En el SRIM una estructura preformada actúa de refuerzo.

Moldeo por transferencia de resina

Cuando se utiliza este sistema de Resin Transfer Molding (RTM) las dos caras de la pieza son superficies muy lisas. Se colocan los tejidos de refuerzo secos, son una preforma hecha con los tejidos adaptados a la forma del molde. Después se pone la segunda pieza del molde sobre la primera y se inyecta resina a presión en la cavidad, Figura 24. Una vez que todo el tejido impregnado, las entradas de resina se cierran, y puede comenzar el curado de la pieza. Tanto la inyección como el curado pueden tener lugar a temperaturas elevadas o ambiente.

Las resinas generalmente epoxídica de poliéster, vinílicas y fenólicas, o las bismaleimidadas para el uso a elevadas temperaturas de proceso. Algunas tramas de fibras trabajan bien en este proceso ya que permiten el transporte de la resina fluida. En cuanto a los núcleos los nidos de abeja no son convenientes, puesto que las celdas se llenarían de resina, en cuanto a las espumas la presión puede romperlas aunque se pueden utilizar las de alta densidad.

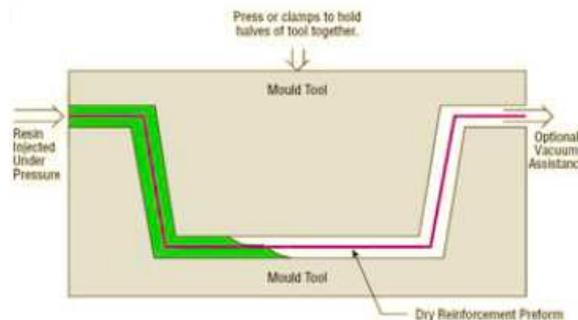


Figura 24. Moldeo por transferencia de resina.

Ventajas principales: los laminados de alto volumen de fibra se pueden conseguir con contenidos muy bajos de huecos. Control del medio ambiente debido a la carcasa del proceso. Las dos partes del componente tienen una superficie moldeada.

Las desventajas principales: El utillaje es caro y pesado con el fin de soportar las presiones. Está limitado generalmente a componentes más pequeños. Las zonas no impregnadas deben retirarse.

Procesos de infusión

Existen procesos de infusión como Seemann Composites Resin Infusión Holding Process (SCRIMP), Resin Infusión under Flexible Tooling (RIFT) o Vacuum Assisted Resin Transfer Molding (VARTM), en los que se depositan los tejidos secos de refuerzo al igual que en RTM. El conjunto se introduce en una bolsa de vacío para que la resina fluya por el interior del laminado gracias al sistema de vacío. Es necesario aplicar un tejido no estructural para facilitar la distribución de la resina sobre el laminado. Las resinas utilizadas son generalmente epoxi, poliéster y viniléster, las fibras son tejidos convencionales y en cuanto a los núcleos se pueden utilizar cualquier tipo excepto los nidos de abeja. Figura 25.

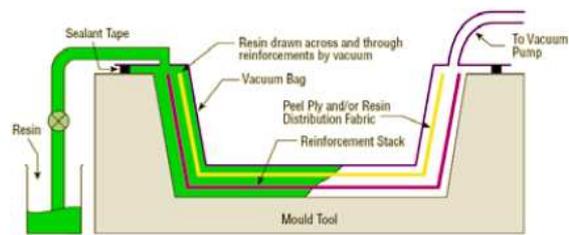


Figura 25: Proceso de infusión.

Ventajas principales: como RTM, excepto que sólo un lado de la componente tiene un acabado moldeado. Las herramientas de más bajo coste debido a una mitad de la herramienta consiste en una bolsa de vacío, y menos fuerza se requiere en la herramienta principal. Los elementos grandes también pueden ser fabricados como en el proceso estándar mojado lay-up. Las estructuras con núcleo se pueden producir en una sola operación.

Las desventajas principales: es un proceso complejo para elementos con altas prestaciones. Las resinas deben ser muy baja en la viscosidad, lo que comprende las propiedades mecánicas medio-altas.

Infusión con films de resina

En el proceso Resin Film Infusion (RFI) los tejidos de refuerzo se colocan alternados con películas de resina semisólida suministradas en un papel soporte. La preforma se envasa a vacío para eliminar el aire que hay entre los tejidos secos y se calienta para que la resina se funda y fluya entre los tejidos, Figura 26, produciéndose el curado tras un cierto tiempo.

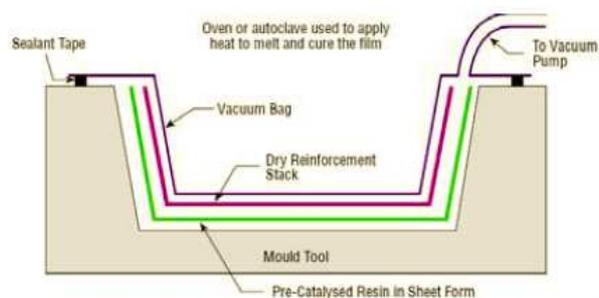


Figura 26: Procesado por infusión con films de resina.

Materiales:

- Resinas: normalmente sólo epoxi
- Fibras: cualquiera

- Núcleos: la mayoría, aunque la espuma de PVC necesita procedimientos especiales debido a las elevadas temperaturas que involucra el proceso.

Ventajas principales: los volúmenes altos de fibra pueden conseguirse de forma precisa con el contenido de huecos bajos. Las propiedades mecánicas de la resina son altas debido al estado sólido de material de polímero inicial y curado a temperatura elevada. El costo potencialmente menor que el preimpregnado, con la mayoría de las ventajas.

Las desventajas principales: No está extensamente probado fuera de la industria aeroespacial. El sistema de ensacado en horno de vacío y se requiere para curar el componente como para preimpregnado, aunque los sistemas de autoclave utilizados por la industria aeroespacial no son siempre necesarias. Las herramientas tienen que ser capaz de resistir las temperaturas del proceso de la película de resina (que si se utiliza resinas similares a los de preimpregnados de curado a baja temperatura, es típicamente 60-100 ° C). Materiales de núcleo necesita ser capaz de resistir las temperaturas y presiones de proceso.

Preimpregnados

Los tejidos y fibras están preimpregnados con una resina precatalizada, usando calor y presión o con disolvente, con. El catalizador permanece latente a temperatura ambiente durante varias semanas, o en ocasiones meses. Sin embargo, para prolongar la vida de almacenamiento, los materiales se almacenan congelados.

La resina suele estar cerca del estado sólido a temperatura ambiente, de este modo los materiales preimpregnados son ligeramente pegajosos. Los sistemas unidireccionales se mantienen unidos y orientados gracias a la resina. Los preimpregnados se colocan sobre la superficie de moldeo de forma manual o automática, se les somete a vacío y entonces se calienta hasta 120-180°C. Esto permite que la resina refluya y empiece a curarse.

Además se puede usar una presión adicional en el moldeo, proporcionada por una autoclave, Figura 27.

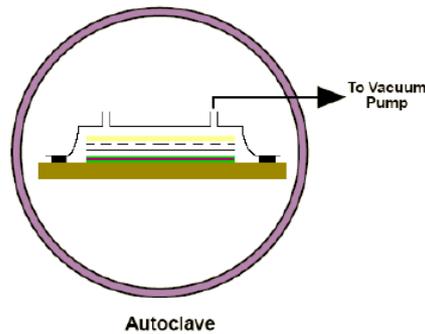


Figura 27: Preimpregnados.

Materiales:

- Resinas: generalmente epoxi, poliéster, fenólicas y resinas de altas temperaturas como son las esteres cianato o bismaleimidadas
- Fibras: cualquiera.
- Núcleos: cualquiera, aunque debido a las altas temperaturas se usan tipos especiales de espumas que soporten las temperaturas involucradas durante el proceso.

Ventajas principales: Los niveles de resina y catalizador así como el contenido de resina de resina en la fibra son exactamente fijado por el fabricante de materiales. Se puede lograr de manera segura un alto contenido de fibra. Los costes de fibra se reduce al mínimo en cintas unidireccionales ya que no hay proceso secundario para convertir la fibra en la tela antes de su uso. La química de la resina puede ser optimizada para un rendimiento mecánico y térmico. Los largos tiempos de trabajo (de hasta varios meses a temperatura ambiente). Las posibilidades de automatización y ahorro de mano de obra.

Las desventajas principales: Los materiales de costo mayor para los tejidos preimpregnados. Las autoclaves suelen ser necesarias para curar el componente. Éstos son caros, lentos para operar y limitada en tamaño. La herramienta tiene que ser capaz de resistir las temperaturas de proceso involucrados así como los materiales del núcleo necesitan ser capaz de resistir las temperaturas y presiones de proceso.

3.3.2.- Sistema híbrido.

El sistema híbrido es la confección por separado de sus componentes para su posterior unión, podemos establecer tres formas de confección, el primero consiste en realizar primer lugar el material reforzado con fibra de polimérica FRP una vez confeccionado, se procede a elaborar un encofrado recuperable en la zona de compresión de la

sección híbrida para poder verter el hormigón en su estado fresco, para posteriormente utilizar el sistema de unión deseado, resinas (resistentes a la humedad) tornillería, conectores o uniones mixtas. Este sistema se utilizará en el presente trabajo de investigación.

También existe otra forma de realizar el sistema híbrido, consiste en realizar el FRP en primer lugar, posteriormente y sin usar ningún tipo de encofrado, se colocan prelosas de hormigón prefabricado en la capa de compresión, para posteriormente unir ambos materiales con resinas, tornillería o uniones mixtas. Este sistema no será utilizado en este trabajo de investigación.

El tercer modo consiste en utilizar la técnica del enrollamiento (wrapping), donde perfil de FRP y capa de compresión de hormigón son envueltos con un laminado de CFRP, independientemente si se utiliza el primer sistema o el segundo descrito con anterioridad. Este sistema no será utilizado, ya que el proceso es complejo y no se dispone de medios.

3.4.- COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DEL SISTEMA HÍBRIDO.

El estudio se basa en el comportamiento a flexión de las estructuras de polímero reforzado con fibra de vidrio (GFRP), pultruidos o no, de sección de viga en caja (figura 28), en I o tipo H, para paredes delgadas, las secciones de tipo caja son muy eficientes para vigas (Ashby (1991) [1]), aunque las tipo tipo I son, en hecho, comúnmente utilizados en aplicaciones estructurales de pultrusionado de perfiles.

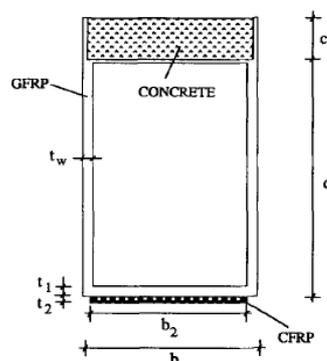


Figura 28: Secciones típicas en estructuras híbridas [6].

El comportamiento estructural de estas secciones, se define a continuación:

1.- El ala de compresión es más débil que el ala de tracción, porque FRP tiene una resistencia a la compresión, alrededor de la mitad de su resistencia a la tracción y debido a fenómenos locales de pandeo (Banks and Rhodes 1983[4], Holmes and Just (1983)[11]), el fracaso es inminente.

2.- El fracaso suele ser catastrófico, sin previo aviso, debido a los materiales compuestos que son elásticos lineales al fracaso, no poseen ductilidad.

3.- El diseño suele estar condicionado por la rigidez (debido a la rigidez relativamente baja de FRP), resultando en la necesidad de un uso excesivo de material compuesto para satisfacer ciertos requisitos de deformación en estados límites de servicio.

En vista de lo expuesto en la introducción es viable realizar un diseño más eficiente de secciones compuestas, realizando las siguientes consideraciones.

En primer lugar, la tensiones de compresión en la sección debe ser llevadas por un material con mayor resistencia a la compresión, como es el hormigón y así también aumentar la rigidez a mínimo coste, y por lo tanto el ala de FRP podría ser minimizada o eliminada, sustituyéndose así pues con una capa de hormigón. El alma y ala inferior serán del material compuesto de FRP, para maximizar sus características mecánicas a tracción, Deskovic et al. (1995)[7].

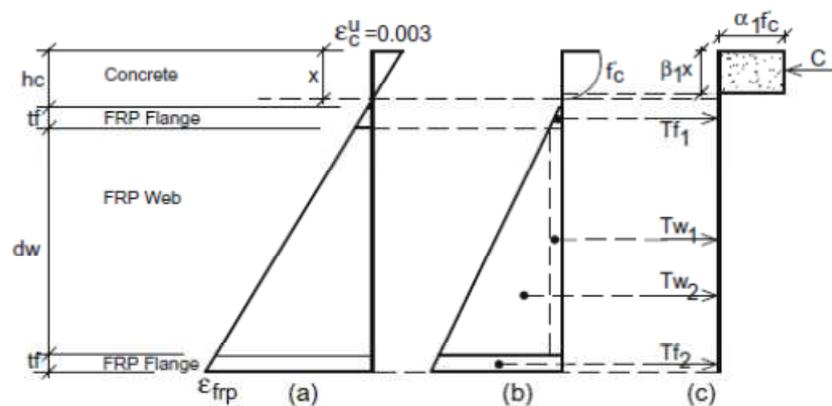


Figura 29: **a** Distribución de deformaciones, **b** distribución de tensiones, **c** distribución resultante de tensiones [6]

En segundo lugar evitar que el fallo catastrófico del GFRP llegue a producirse, una forma de evitar esta fragilidad es actuando con un pre aviso antes de su rotura, con un elemento ligero de CFRP y diseñado para un fallo menor que el del GFRP, se podrían añadir a la zona de tracción de la sección, de manera que se ser el primer elemento a fallar, dando así alguna advertencia de un colapso inminente (pseudoductilidad). Figura, 30.

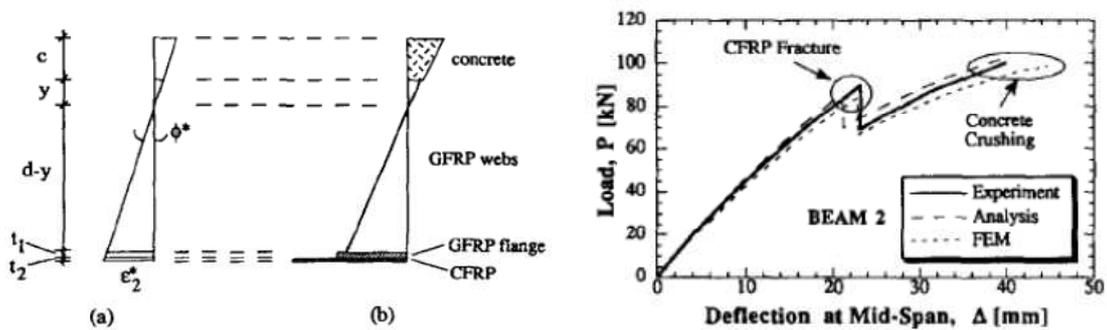


Figura 30: **a** Distribución de deformaciones, **b** distribución de tensiones, en una sección en centro de luz en el instante de rotura CFRP, **c** gráfico fuerza/flecha [5].

Debido a que este elemento formará parte de una lámina, que preferiblemente debe también poseer una alta rigidez para aumentar la rigidez de la sección, una capa delgada externamente de epoxi unido por fibra de carbono (CFRP). El uso de este material también mejorará el miembro comportamiento a la fluencia y la fatiga, dado que CFRP es prácticamente fluencia libre y tiene una excelente respuesta a cargas de fatiga.

Es importantísimo para garantizar este sistema híbrido Hormigón –FRP, transferir los esfuerzos de cizalla y arrancamiento entre ambos materiales a través de su interfaz. Esto es posible gracias, a una buena adherencia entre el hormigón y el FRP, que se puede lograr utilizando adhesivos o proporcionando uniones mecánicas a la superficie, o incluso, por una combinación de ambos. Un mejor conocimiento y aportaciones a la mejora de esta unión entre ambos materiales hacen viable el máximo aprovechamiento del concepto de estos sistemas híbridos. Figura 31.

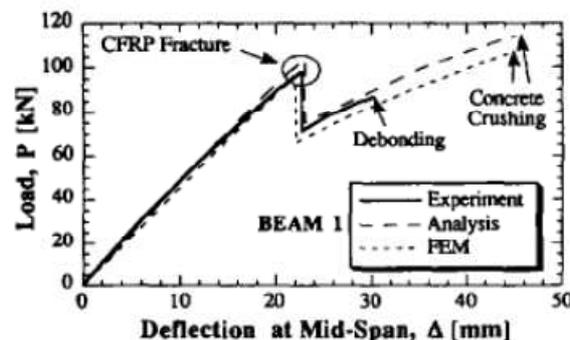


Figura 31: Gráfico carga /flecha rotura a 4 puntos [5]

Todo este conjunto unido a que ambos materiales tienen una durabilidad excelente, el mantenimiento sería mínimo frente estructuras tradicionales como las de acero o de hormigón armado. Es por ello que el ahorro económico, es importante, debido a un

mantenimiento nulo. Obtenemos un sistema híbrido, en el cual mejoramos la capacidad del conjunto a mínimo coste.

En el presente trabajo de investigación, estos nuevos sistemas híbridos son estudiados, están compuestos por una losa superior de hormigón reforzado con fibra metálica (HRFM) colocado sobre un perfil estructural de fibra polimérica reforzado (FRP) con la posibilidad de añadir un laminado de fibra metal (FML), buscando un comportamiento dúctil del sistema. Este comportamiento dúctil será a través de el comportamiento del hormigón en la cabeza de compresión, o reforzando el elemento en el ala traccionada con una lámina de FML, o una combinación mixta de ambos sistemas.

El hormigón de altas prestaciones, es utilizado para mejorar la rigidez de la viga y aumentar la resistencia mecánica del FRP, minimizando en la necesidad de un uso excesivo de material compuesto para satisfacer ciertos requisitos de deformación en estados límites de servicio, puesto que es relativamente costoso, (Donna S. M. Chen & Raafat El-Hacha, 2010 [11]). Además el hormigón de ultra alta resistencia (UHPC) tiene la ventaja de tener alta durabilidad, que permitirá seguir colocando el material en ambientes agresivos, además este tipo de hormigón posee baja alcalinidad, por ello la degradación de la resina o polímero en este medio será mínima.

Para que esta estructura híbrida funcione, la unión entre ambos materiales debe ser perfecta. Sin embargo, la falta de pérdida de adherencia a menudo gobierna el comportamiento de cizallamiento FRP-hormigón y les impide alcanzar su capacidad plena carga. Para ello hay que tener en cuenta la influencia de la rigidez interfacial, la resistencia de la unión interfacial y la energía de fractura interfacial.

Los **criterios de cálculo** de estas estructuras híbridas sometidas a flexión, son las siguientes:

En primer lugar realizaremos la selección de los materiales y las variables geométricas de la sección (d , t_w , c , b , f_1 y f_2) en función de las propiedades de los materiales, cumpliendo pues los requisitos mecánicos al mínimo coste.

Las restricciones de cálculo son fundamentalmente debidas a las limitaciones de resistencia a flexión y al cortante, que la sección estructural debe soportar, y a las limitaciones impuestas por la rigidez, en las que un desplazamiento máximo debe ser admitido por los ELS.

La sección híbrido elegida no ofrece una resistencia a cortante mayor que la de una sección geoméricamente similar sección GFRP similar sin el hormigón y en las capas de CFRP.

Las almas de la sección deben soportar principalmente los esfuerzos de cortante, en caso contrario sobrevendrá fallo frágil.

En segundo lugar antes de alcanzar la rotura frágil del sistema híbrido, llevada a la zona débil superior comprimida, donde el material dispuesto (hormigón) para recoger estas tensiones colapsa con fragilidad, se coloca una lámina de CFRP de poca sección con el fin de que rompa antes para poder tener un preaviso de rotura. Este concepto se le denomina pseudoductilidad, que difiere del concepto tradicional de ductilidad, en cuanto a una respuesta en deformación prolongada.

Proporcionar una respuesta pseudoductil a flexión, en el ala inferior de la estructura híbrida, mediante laminados CFRP de bajo espesor, fallando a una carga menor que el GFRP, el laminado CFRP fallará prematuramente a una carga baja. Hay que tener en cuenta que si la carga de rotura de la lámina de CFRP es una fracción alta de la carga de rotura de la estructura híbrida, el incremento de la carga en relación al desplazamiento es insuficiente, ya que el aviso frente a un colapso inminente llega demasiado tarde.

En tercer lugar se debe calcular el momento último, por el criterio de compatibilidad de deformaciones, equilibrio de fuerzas y las leyes constitutivas del material, teniendo en cuenta que el GFRP tiene un comportamiento elástico lineal y asumiendo el comportamiento del hormigón elástico no lineal. Figura 32.

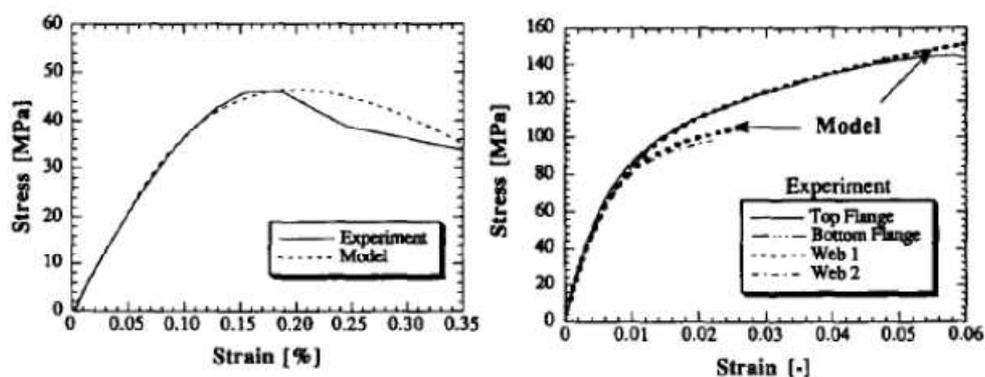


Figura 32: Gráficos de caracterización hormigón y GRFP para sistemas híbridos. [5]

En cuarto lugar comprobar que la inestabilidad lateral, no se produce y por último tener suficiente rigidez a flexión y cortante.

La rentabilidad del sistema híbrido radica en la gran resistencia mecánica, alta rigidez, bajo peso.

3.5.- MODOS DE FALLO DEL SISTEMA ESTRUCTURAL HÍBRIDO.

3.5.1.- Generalidades:

El sistema híbrido puede fallar en tres zonas fundamentalmente, por los componentes adheridos, por el adhesivo o por la interfase. En la interfase el fallo se produce a un bajo nivel de carga, es por ello que se debe exclusivamente a una preparación incorrecta de la superficies a unir [4]; la rotura del adhesivo es indeseable y es debida a una mala elección del adhesivo ya que contamos en la actualidad con una extensa variedad de adhesivos de alta calidad. El último modo de fallo es en los componentes adheridos bien el hormigón o el FRP.

Existen desde el punto de vista mecánico una serie de modos de fallo que podemos clasificarlos en orden a su importancia, como el pandeo y el cortante en el alma, la flexión, la inestabilidad lateral, la ductilidad y la rotura del hormigón son los más relevantes y en los que más nos vamos a centrar. Y los que por su facilidad de resolución del problema no son relevantes, como el cortante en el adhesivo, el cortante en el hormigón y el fallo de adherencia hormigón /RFP; no por ello dejan de tener importancia en el sistema híbrido.

3.5.2.- Cortante en el alma.

El cortante es el primer fallo a tener en cuenta a la hora de diseñar el elemento estructural. El cortante debe ser soportado por el alma del FRP en función de la caracterización del material y el espesor del alma. Figura 33.



Figura 33: Perfil en I, rotura alma por cortante [6].

En cuanto a la caracterización del material, la dirección de las fibras a 45° perpendicular al esfuerzo que origina el cortante, así como el número de capas de material compuesto hace posible la mayor resistencia frente a esfuerzos importantes de cortante, ya que se consigue coser la fisura y evitar el avance de grieta. Las direcciones de fibra para un mismo volumen en dirección longitudinal no presentan módulos elevados a cortante, de hecho con una menor fracción de fibras pero estas distribuidas de forma aleatoria presentan prácticamente el mismo módulo de cortante. Ver tabla 9, [13].

Table 1
Experimental variables.

Beam	CFRP-0 ^d (%)	GFRP-0/90 ^d (%)	GFRP±45 ^d (%)	GFRP-CSM ^a (%)
<i>Flange</i>				
A52 ^b , B52 ^c	52	10	13	25
A33 ^b , B33 ^c	33	29	13	25
A14 ^b	14	48	13	25
<i>Web</i>				
All beams	–	32	42	26

- ^a Continuous strand mat.
- ^b SF beams (flange width: 95 mm).
- ^c WF beams (flange width: 250 mm).
- ^d Angles of fibers to longitudinal direction.

Table 2
Mechanical properties of materials.

Parameters	Notation	CFRP-0	GFRP-0/90	GFRP±45	GFRP-CSM
Volume fraction	V_f (%)	50	50	50	20
Young's modulus	E_{11} (GPa)	113	24	11.1	10
	E_{22} (GPa)	7.4	24	11.1	10
Shear modulus	G_{12} (GPa)	3.2	3.5	10.909	3.8
Poisson's ratio	ν_{12}	0.32	0.1	0.29	0.308

Tabla 9: Caracterización de Materiales y sus variables [13]

3.5.3.- Cortante en el adhesivo.

Los adhesivos que actualmente se encuentran en el mercado tienen una resistencia a cortante muy buena, para evitar la rotura del material.

3.5.4.- Cortante en el hormigón.

En el cortante de una viga a flexión si aparece desde la carga aplicada hacia los apoyos, el primer elemento del sistema híbrido que debe contener la fisuración es el hormigón. Este tipo de fallo no suele suceder para espesor de hormigón razonables [19], podemos considerar que con capas de compresión de 40 mm con hormigones de resistencia moderada 25 MPa no sucederá. Estos hormigones no están reforzados con fibras, el comportamiento que tengamos con HRF hormigones en cuanto a cortante estará mejorado ya que las fibras conferirán una mejora resistente al cortante en el hormigón.

3.5.5.- Fallo de adherencia hormigón /FRP.

La unión debe ser perfecta en caso contrario no se obtendrán las capacidades resistentes del sistema híbrido. En general se pueden utilizar cuatro sistemas para unir los materiales, la unión química con resinas, la unión mecánica con conectores o tornillería o una unión mixta combinando las dos anteriores.

En el caso de la unión química, la elección del adhesivo es importante ya que la resistencia de este al corte, el esfuerzo rasante así como resistencia a la humedad serán factores clave para su elección. El hormigón se encuentra en estado fresco tras el vertido sobre la superficie del FRP, el adhesivo debe ser tolerante o insensible a la humedad, de no ser así los enlaces químicos no serán fuertes, al mismo tiempo que el adhesivo aumentará su volumen por la absorción de agua y no será efectivo.

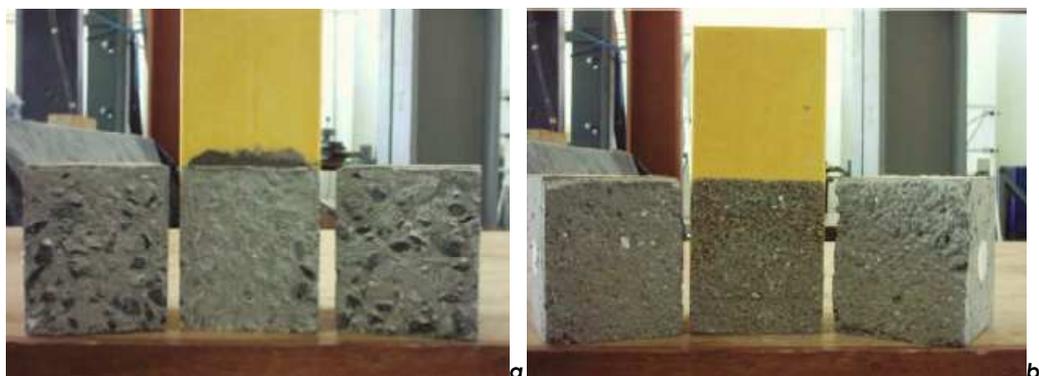
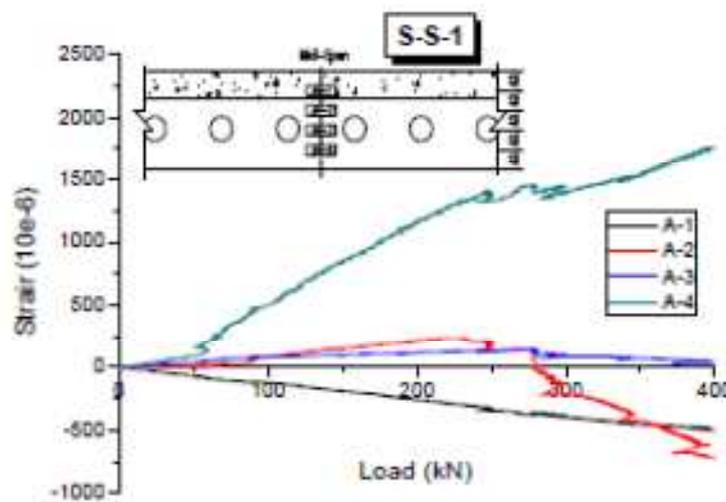


Figura 34: **a** Modo de fallo en la interfase a con Sikadur 31 y **b** Sikadur 32 gel con un arenado.[6]

Es importante que el fallo no sea por falta de cohesión de la resina, ya que es catastrófico e indicaría que la resina no es resistente, no habremos elegido bien el material. Es fácil evitar este fallo ya que la mayoría de adhesivos epóxicos que se encuentran en el mercado son muy cohesivos. La capacidad de adherencia en el FRP, si la superficie está limpia, es muy raro que se produzca, por ello la rotura se traslada a la interface entre el adhesivo y el hormigón [6]. Para solucionar este fallo también de una forma sencilla debemos limpiar la superficie del hormigón, cepillarla para dotar de rugosidad superficial y mejorar el agarre. Además realizar un arenado sobre la superficie también aumenta la rugosidad. La rotura en la interface tras el arrancamiento superficial del hormigón, también es posible evitarlo utilizando un hormigón de mejores capacidades mecánicas. Cuando existe un fallo de adherencia Hormigón/FRP, nos encontramos con una caída de la capacidad resistente en la estructura híbrida, ello conlleva que el sistema que se ha diseñada deja de comportarse adecuadamente pasando zonas donde las deformaciones son de tracción a estar comprimidas, ello supone que el eje neutro está bajando y forzando a que las compresiones que eran asumidos por el hormigón las tenga el FRP con la consideración que este no trabaja bien a compresión y se pueden dar efectos de pandeo local, por ello la rotura llegue antes, ver figura 35 y 36, [8].

Figura 35: gráfico deformación /carga de una losa híbrida.[8]



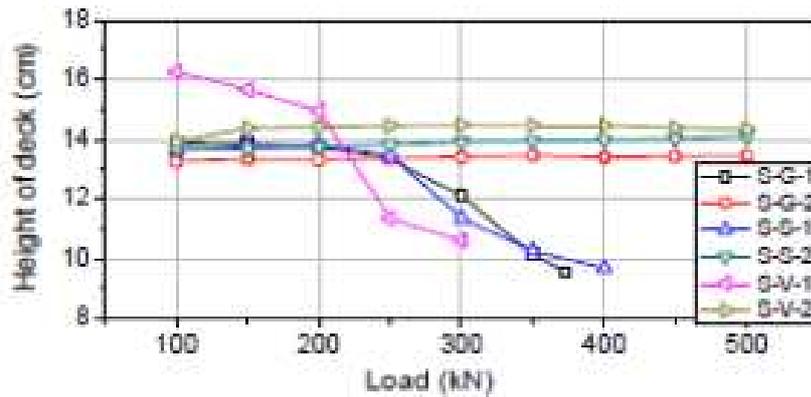


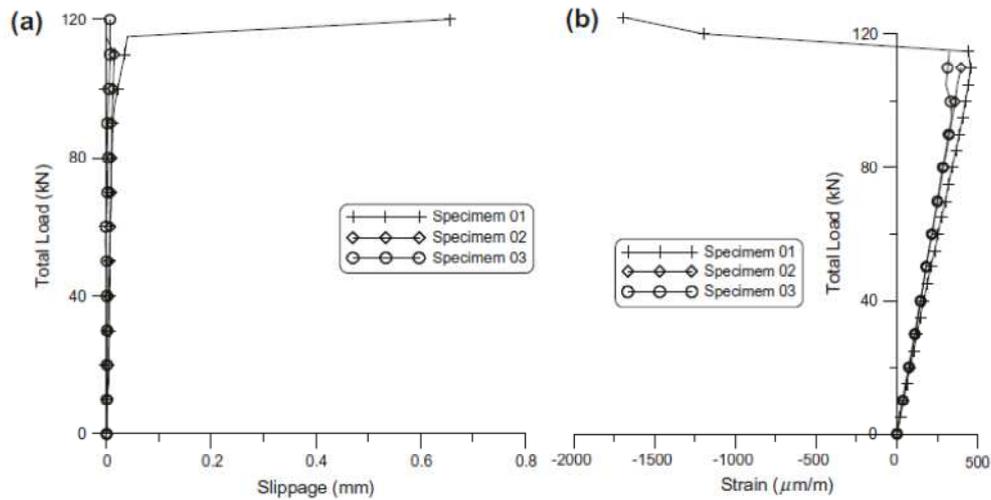
Figura 36: gráfico posición eje neutro/carga aplicada.[8]

Los fallos de adherencia, debido al esfuerzo rasante, donde se produce un deslizamiento parcial en los extremos de la estructura, pueden producir también de laminación entre ambos materiales hormigón y FRP, puede mejorarse con anclajes o tornillería. Fotografía 4.



Fotografía 4: a) Fallo en la interfase hormigón FRP, b) Captador LVDT medición deslizamiento.[6]

Como se aprecia en la figura 37, los esfuerzos rasantes inician un cambio en la situación del eje neutro importante incluso al desolidarizarse los dos componentes del sistemas hacen que zonas del material que previamente trabajaban a compresión pasen a trabajar a tracción o viceversa.



g. 16. Graphics for the three slab specimens: (a) Total Load vs. Slippage (average value) and (b) Total Load vs. Strain at the interface (average value).

Figura 37: **a** gráfico deformación /carga de una losa híbrida, **b**, gráfico posición eje neutro/carga aplicada.[6]

3.5.6.- Pandeo en el alma.

El pandeo del alma se produce por las tensiones de compresión en la cabeza de compresión del elemento a flexión, produciendo fallos locales tanto en el ala como el alma del perfil. Como se aprecia en la figura 38, el esfuerzo de compresión inicia una tensión interlaminar de tracción que tiende a separar las láminas con las que este ejecutado el compuesto.

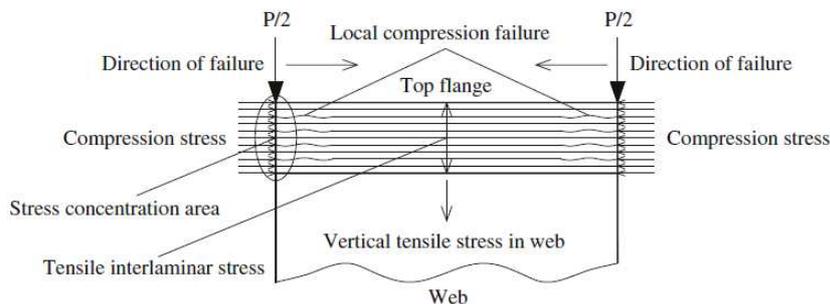


Figura 38: **a** gráfico del ala y alma en un perfil en I de CFRP, sin capa de compresión de hormigón.[13]

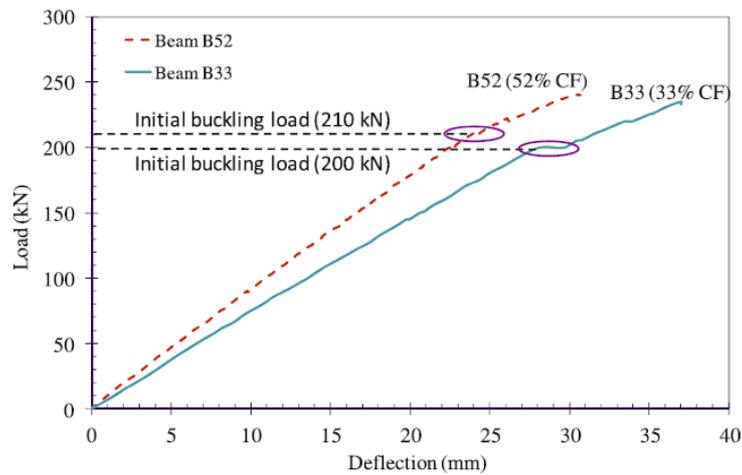
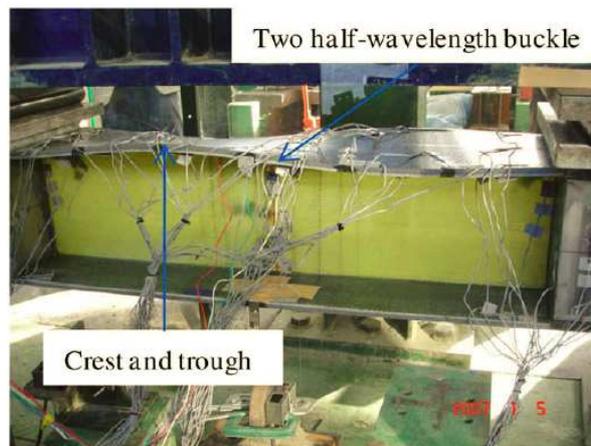


Figura 39: a gráfico carga/flecha de una viga en I de FRP sin capa de compresión de hormigón.[13]

En las fotografías 5 se observa tras el ensayo a flexión de una viga polimérica como se produce el alabeo y pandeo de la cabeza comprimida. El estado de carga será inferior al modelo utilizado en la viga híbrida con una capa de compresión de hormigón donde esta capa retrasa la apreciación del fallo y lo hace a cargas mucho más elevadas.



Fotografía5: Ensayo viga polimérica, alabeo ala comprimida. [13]

El conjunto perfil y capa de compresión hacen que desaparezcan en gran medida los fallos por pandeo del alma y ala comprimida del perfil. Si el hormigón es muy resistente y la adherencia en la interfase presenta algún defecto pueden sobrevenir los fallos por rasante y estos deriven en pandeos en el ala.



Fotografía 6: Ensayo viga polimérica, cortante y alabeo ala comprimida.[7]

3.5.7.- Aplastamiento del hormigón.

El aplastamiento en el hormigón puede ser debido a la concentración de carga producida por la carga en el punto de aplicación o por el esfuerzo normal de compresión en el ensayo de flexión.



Fotografía 7: Aplastamiento del hormigón por esfuerzos normales.[14]

Es importante trasladar el fallo a la cabeza de compresión ya que el hormigón aunque su comportamiento a rotura es frágil, es preferible a la fragilidad del laminado de FRP. Este comportamiento típicamente frágil del hormigón, puede ser cambiado añadiéndole fibras metálicas ya que el comportamiento del HRF tiende a ser dúctil.

Gráfica hormigón con fibras. Aunque existen numerosos estudios de HRF, donde el retraso de la aparición de las fibras y la resistencia residual post fisuración son evidentes y mejoran el comportamiento del hormigón no solo en ELS y en ELU; la combinación de HRF y FRP en sistemas de estructuras híbridas no ha sido muy estudiada. Las fibras evitarían en cierta medida el aplastamiento del hormigón en el caso de la concentración de tensiones en el punto de aplicación de la carga ya que de cierta forma estarían ayudando al que ese esfuerzo puntual se reparta por todo el volumen del hormigón disipando de forma eficiente el estado tensional.

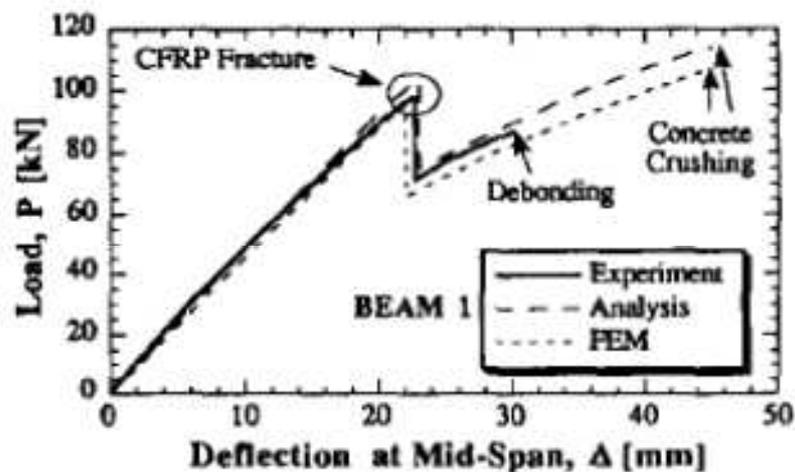


Figura 40: Gráfica carga flecha en centro luz. [5]

Este criterio de fallo puede verse reducido o subsanado con la calidad del hormigón, a medida que el hormigón es más resistente este tipo de fallo disminuye. En cuanto a la geometría de la pieza formada por el hormigón puede variar ya que con más canto es más complejo que se de este fallo.



Figura 41: Aplastamiento del hormigón por esfuerzos normales.[7]

3.5.8.- Inestabilidad lateral.

Por lo general los perfiles pultrusionados de sección en caja tienen una elevada resistencia al pandeo lateral. No obstante, para satisfacer los requisitos de diseño y evitar la inestabilidad lateral, la relación existente entre la altura y la anchura del sistema híbrido, no debe ser mayor a K un valor ya contrastado y que está del lado de la seguridad, en función de la tipología de la sección [5,13,14]. Para secciones de espesor de pared delgada híbrida compuesta secciones el valor de k es de alrededor de 3 [5].

$$(C+h)/b < k \text{ [5]}$$

En algunos casos para evitar la inestabilidad lateral se recurre a elementos rigidizadores, en el caso de secciones en I [13], donde este problema es mayor que en las secciones tipo caja.

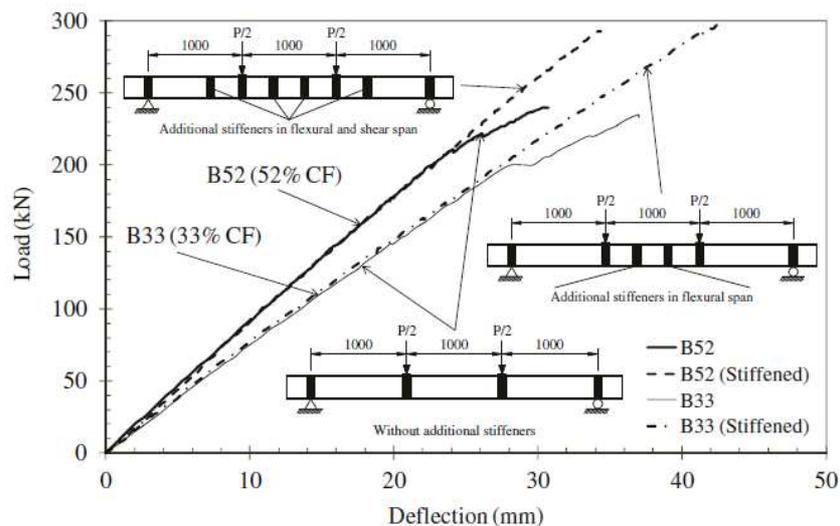


Figura 42 a Gráfico carga /flecha, en vigas con rigidizadores.[13]

3.5.9.- Flexión.

El fallo por flexión puede suceder en flexión positiva o negativa. La mayoría de estructuras híbridas se realizan para estructuras isostáticas donde las vigas se encuentran biapoyadas, pero también nos podemos encontrar con estructuras híbridas en continuidad en los vanos encontrándonos cierto hiperestatismo.

En aquellos casos mayoritarios donde la viga se encuentra simplemente biapoyada, se induce la rotura en dos fases claramente diferenciadas, la primera fase se calcula una

lámina de fibra de carbono cuya sección es mínima con el fin de que rompa con un estado de carga referido a un momento flector M_2 . De este modo se produce un preaviso tras la rotura del CFRP, después del fallo inicial se produce una redistribución del momento en el resto del material del ala inferior (GRFP). El GRFP, sigue redistribuyendo y soportando el estado de cargas por toda la sección llevando la rotura a la zona comprimida, donde el hormigón debido a la deformación soportada deja de comportarse en campo elástico lineal y pasa al campo no lineal, donde se producirá la rotura. Esta rotura es menos drástica y catastrófica que la rotura del polímero, a pesar que el hormigón sigue siendo un material frágil.

LA modificación del comportamiento del hormigón es un componente importante a estudiar, ya que no hay suficientes estudios en la actualidad sobre el comportamiento de la estructura híbrida con hormigones reforzados con fibras metálicas. Existen numerosos estudios del comportamiento de los hormigones reforzados con fibras metálicas, pero en la actualidad se están estudiando en los sistemas híbridos.

3.5.10.- Ductilidad.

Los parámetros de ductilidad no existen, ya que los materiales que estamos utilizando son frágiles tanto resinas, fibras o como el propio hormigón. Es por ello que se utiliza el criterio de la pseudoductilidad para diferenciarlo del clásico de ductilidad, donde nos encontramos con deformaciones plásticas a carga constante, como es el caso del acero. En este caso el concepto de pseudoductilidad consiste en realizar un preaviso mucho antes de que rompa el material, para ello se dota al sistema híbrido de un material habitualmente carbono, que con una mínima área se predice su rotura antes que las demás fibras de GFRP.[1],[5],[7]

La ductilidad puede ser definida en estos sistemas híbridos como la proporción de la curvatura al fallo en relación a la curvatura al fallo del laminado de fibra de carbón.[5] Ver figura 6a.

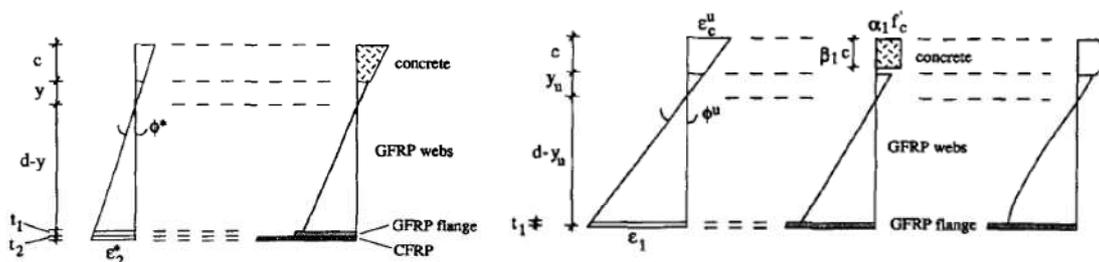


Figura 43 Distribución deformaciones y tensiones antes de la rotura del CFRP; **b** distribución de deformaciones y tensiones después de la rotura del CFRP.[5]

Otra posibilidad de conferir ductilidad al sistema híbrido es a través del modo de fallo del hormigón, este criterio debe ser estudiado con reservas ya que el hormigón convencional tiene un fallo catastrófico. Pueden estudiarse comportamientos del hormigón que posean una tendencia al fallo con comportamientos dúctiles, para ello se debe confinar el hormigón mediante encamisados o mediante fibras, aunque están estas últimas todavía en fase de estudio dentro del concepto del sistema híbrido.

En los sistemas híbridos al aplicarles la carga máxima, la fibra superior registra una tensión de compresión de donde la deformación es del 0,0033. Aunque esta deformación se registra en el envoltorio, la compatibilidad de deformaciones indica que en la fibra superior de hormigón está dentro de este valor. Esto demuestra que la envoltura hace confinar el hormigón desde la deformación última a la compresión del hormigón en ensayo de compresión estándar donde su valor es de 0,0026. Sin embargo, el confinamiento introducido no es suficiente como para proporcionar ductilidad importante para el hormigón.

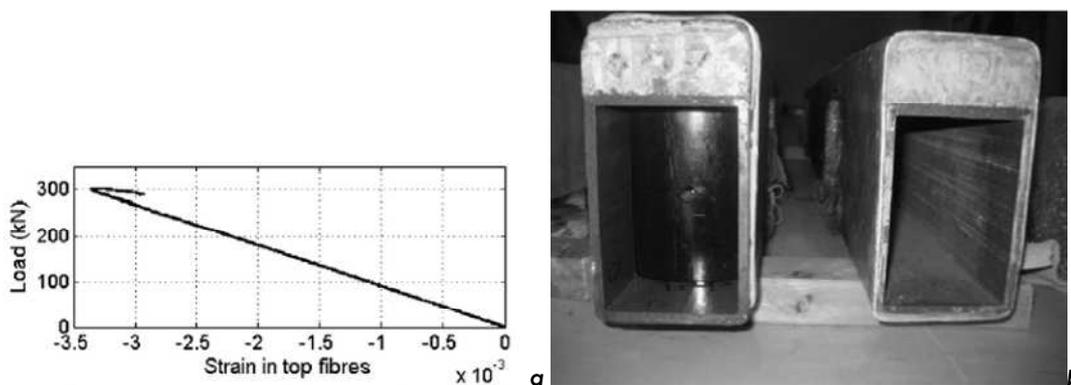


Figura 44: **a** Distribución deformaciones /carga en la zona alta del sistema; **b** secciones híbridas con envoltorio de FRP.[11]

Otro modo de dotar al sistema híbrido de ductilidad ante el fallo, es utilizar dos tipos de materiales en la capa de compresión, un hormigón convencional con un espesor determinado de capa comprimida y el hormigón de alta resistencia HAR reforzado con fibra de acero HRF con espesores mínimos [14]. Ver figuras.

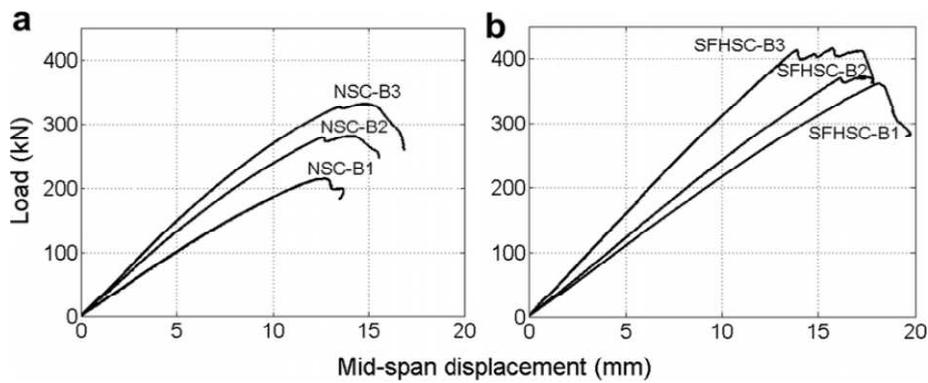


Figura 45: Ensayo a flexión a 4 puntos, Distribución carga /flecha sistema híbrido con hormigón **a** convencional y **b** hormigón de alta resistencia reforzado con fibra metálica.[14]

El estudio del comportamiento a flexión por **Kheanee et al**, se observan comportamientos de los sistemas híbridos muy distintos en función de la composición de su sección y el modo en que han sido fabricadas, ver cuadro.

Tabla 10: Tipología de vigas en función del material y su forma de procesado.[14]

VIGA	HAR	Wrapping a +/- 45°	Wrapping 90°	Wrapping +/- 45°	LÁMINA CFRP
UBICACIÓN	COMPRESIÓN	ENVOLTURA	ENVOLTURA	ENVOLTURA	TRACCIÓN
HSB_B1	SI	SI	SI	NO	NO
HSB_B2	SI	SI	NO	NO	SI
HSB_B3	SI	SI	SI	SI	SI

El comportamiento que se puede observar en la figura 46, donde se nos muestra la relación entre la carga y la flecha en un ensayo a flexión en cuatro puntos de un sistema híbrido, se encuentran indicios claros de deformación bajo carga prácticamente constante constatando un comportamiento dúctil, para las viga HSB_B1. Este indicador no se encuentra en las vigas HSC_B2 y HSC_B3, teniendo un comportamiento frágil ante el fallo(es un hormigón de alta resistencia), acuciado en mayor medida en la viga HSC_B3. Es muy probable que a medida que el sistema (influenciado por la resistencia del hormigón) es más rígido y resistente la tendencia al fracaso frágil sea mayor en contraposición a una resistencia moderada y menos rígida, que dota al sistema de una rotura dúctil. Todo ello debe ser estudiado pues no está suficientemente demostrado. Ver figura inferior.

Surgen pues muchas dudas e incógnitas, la lámina de carbono proporciona rigidez y un preaviso a la rotura "pseudoductilidad", el "wrapping" proporciona ductilidad ante el fallo según la dirección del laminado y el número de capas. ¿Puede la combinación de lámina de CRFP y "wrapping" proporcionar una mejora en la ductilidad del sistema? ¿Es posible diseñar y fabricar una viga híbrida de hormigón/FRP con una rigidez adecuada y lograr lo más buscado, el comportamiento dúctil tan necesario para estructuras de ingeniería civil?

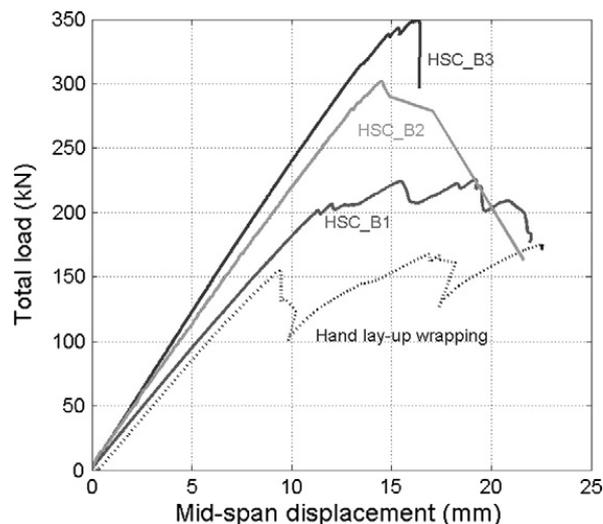


Figura 46: Ensayo a flexión a 4 puntos, Distribución carga /flecha sistema híbrido con hormigón de alta resistencia, con distintos tipo de "wrapping".[14]

El wrapping no sólo eliminar el riesgo de el fallo prematuro como resultado de la pérdida de adherencia de bloque de hormigón al perfil FRP, también mejora la rigidez y la capacidad de carga de las vigas, con la posibilidad de rotura dúctil.

El uso de hormigón de alta resistencia tiene muchas ventajas, tales como aumento de la rigidez y la capacidad de carga. Por sí solo sin embargo, se encontró ser frágil y los resultados dan un fallo catastrófico de la viga. Para mejorar tanto la pseudo-ductilidad de la viga, con hormigón de resistencia convencional y fibras de acero reforzado de alta resistencia se han utilizado. Ambos materiales se han encontrado para dar lugar a una mejor ductilidad proporcionado el bloque de hormigón es suficientemente gruesa para evitar un fallo prematuro parecido al fracaso por punzonamiento, [14].

Los análisis de la sección utilizando los parámetros de bloques de hormigón de diferentes fuentes se muestran todos para predecir la capacidad de flexión de las vigas con un bloque de la resistencia del hormigón normal que no a través aplastamiento.

Sin embargo, este no fue el caso para las vigas con bloques de hormigón de alta resistencia con fibras de acero. La mayoría de los modelos sobrestiman la carga de rotura.

Los resultados de estas pruebas han puesto de relieve la necesidad de llevar a cabo las técnicas avanzadas de análisis para comprender los verdaderos mecanismos de fallo del bloque de hormigón con el fin de determinar un valor mínimo para el espesor del hormigón para asegurar el fallo por aplastamiento.

El trabajo actual también se centra en determinar analíticamente la capacidad de perforación cortante del bloque de hormigón. Los resultados de los ensayos y los modelos analíticos servirían para diseñar el canto para alcanzar su plena capacidad sin fallar prematuramente

En ciertos caso la unión mixta donde el adhesivo y los conectores o tornillería de acero hacen que tras la rotura del sistema híbrido tenga un comportamiento dúctil, frente al resto. Ver figura 47, [17]. Este sistema de unión es importante su estudio para comprobar que el fallo frente a la rotura es dúctil.

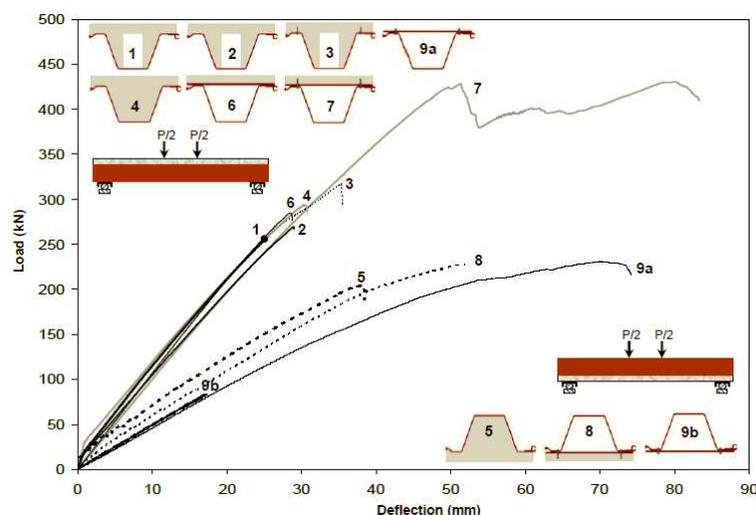


Figura 47: Ensayo a flexión a 4 puntos, Distribución carga /flecha sistema híbrido en flexión positiva y negativa.[17]

En el caso en que la geometría del sistema híbrido es una losa donde predomina el canto del hormigón y el GFRP actúa como lámina inferior con mejoras en la lámina para mejorar la adhesión mecánica el comportamiento a rotura es dúctil (ejemplares tipo 1 figura 48), frente al resto que ganan resistencia última y rigidez pero el fallo es catastrófico (ver tipo 2) con una excepción donde la unión influye. Este campo también debe ser estudiado ya que no queda suficientemente probado, [8].

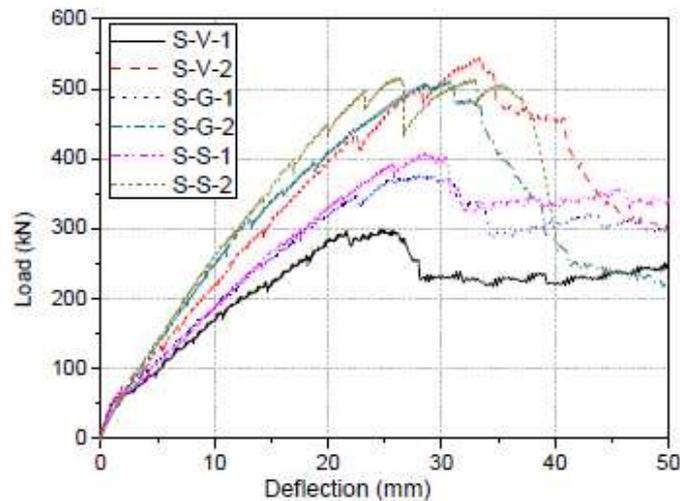


Figura 48: Ensayo a flexión a 4 puntos, Distribución carga /flecha sistema híbrido GFRP/Hormigón en losa en a flexión positiva.[8]

3.6.- DURABILIDAD AMBIENTAL Y QUÍMICA DEL SISTEMA ESTRUCTURAL HÍBRIDO.

El **efecto del tiempo de degradación** en la evolución de las propiedades mecánicas permite diferenciar dos fases en el comportamiento mecánico de los FRP. En primer lugar el deterioro producido es mayor produciéndose una merma importante en las propiedades mecánicas en periodos cortos de exposición.

Una segunda fase, a medida que el tiempo transcurrido es mayor, donde las propiedades mecánicas tienden a estabilizar sus pérdidas con el tiempo de exposición.

El tiempo entre estas dos zonas donde se produce el cambio de comportamiento es similar para medios con similar carácter químico. Situándose en torno a 13-17 semanas en disoluciones con carácter neutro y de 7-9 semanas para las alcalinas, los tiempos menores están relacionados con una degradación más acusada [18].

MODELO DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO

Una tendencia similar del comportamiento de los indicadores mecánicos con el tiempo de inmersión, a nivel macroscópico. Durante medio año de exposición existen

pérdidas en UPMAT del 60% en módulo y del 80% en dureza en NaOH, en agua y NaCl las pérdidas para este mismo tiempo de exposición entre el 30-35%. [18]

Atendiendo a **la disposición de refuerzo en los compuestos**, los reforzados con MAT son los que muestran los menores indicadores de pérdidas, mientras que los reforzados con TF los que presentan mayor indicador de pérdidas y por tanto la merma en propiedades se produce de forma más rápida.

El efecto de la degradación es más evidente en compuestos que desde el principio tienen un mejor comportamiento mecánico, refuerzo con TF, ya que la merma en propiedades, producida por haberse visto afectado algún constituyente del material compuesto, repercute más significativamente en el correcto funcionamiento del compuesto.

Las pérdidas de propiedades de flexión por unidad de tiempo, definidas por el indicador de pérdidas, en TF son el doble que en MAT. [18]

El nivel de agresividad manifestado por las disoluciones está en función del grado de deterioro producido en el compuesto. El indicador de pérdidas, que relaciona la pérdida en propiedades por unidad de tiempo, permite clasificar los medios en función de la agresividad mostrada, y por tanto en función de la rapidez del deterioro producido.

Este indicador se correlaciona con el pH, siendo la degradación más agresiva cuanto mayor es el pH de la disolución. Las disoluciones neutras, agua y NaCl, presentan una evolución de propiedades similares, siendo el NaCl el que tiene un menor indicador de pérdidas.

Las disoluciones con carácter alcalino producen el mayor deterioro en los compuestos, independientemente de la resina utilizada como matriz. Estas suponen un peligro mayor para estos materiales al reducir de forma considerable su tiempo de vida útil. La disolución NaOH es la más agresiva. En su comportamiento a flexión el indicador de pérdidas es entre 5 y 10 veces superior a la manifestada por las disoluciones neutras, pudiendo definir el comportamiento en NaCl y NaOH como las disoluciones más representativas.[18]

La influencia en el tipo de resina, en el caso de los compuestos con resinas de VE presentan indicadores de pérdidas de propiedades con el tiempo de exposición

inferior a los de UP, resistiendo mejor el efecto de la degradación, lo que se justifica por su estructura química.

En la resina de VE, los grupos éster, susceptibles de ataque hidrolítico están situados en los extremos de la cadena, y protegidos por grupos metilo, dificultando así el ataque por las disoluciones, si se compara con el UP que cuenta con una estructura mucho más accesible.

La diferencia de velocidad de degradación de compuestos UP respecto al VE es entre 2.0-3.5 veces superior en los medios neutros y entre 1.5-2.5 en las disoluciones alcalinas. La degradación más severa de las disoluciones alcalinas, hace que la diferencia entre el indicador de pérdidas entre UP y VE sea inferior. [18]

MECANISMOS DE DEGRADACIÓN

La degradación de los compuestos actúa en el deterioro superficial, pérdida de brillo, que conducen a un cambio de color, que continúa hasta la aparición de manchas o señales blancas visibles en la superficie del material. Esto se traduce en un aumento de la rugosidad.

La intensidad del ataque aumenta con el tiempo de exposición y produce degradación de la interfase mediante mecanismos de hidrólisis que provocan la desunión en la interfase fibra-matriz, con generación de microgrietas en la resina y el deterioro de la fibra.

En disoluciones alcalinas, NaOH, con resinas de UP, se produce la rotura de enlaces de la fibra, además de la hidrólisis de los grupos éster de la resina, dando pequeños fragmentos de cadena que son disueltos por lixiviación, causando la consiguiente pérdida de masa e integridad del material compuesto. Esta es más rápida que en soluciones salinas.

En disoluciones de carácter neutro, se produce la degradación hidrolítica de los enlaces éster de las resinas. Este es el mismo mecanismo de degradación en disoluciones alcalinas, con resinas de VE, que produce el fallo en la interfase.[18]

MORFOLOGÍA DE LA FRACTURA

En disoluciones neutras, en compuestos de UP y VE se observan mecanismos de pull-out por deterioro de la interfase, además de la hidrólisis de la resina con un leve ataque de fibras.

En los compuestos de UP en disoluciones alcalinas se produce el ataque a las fibras, mostrando un aspecto similar al de las fibras que hubieran estado expuestas sin resina, con fuerte deterioro de la matriz e interfase. En resinas de VE hay fallo en la interfase y pull out similar al obtenido en medios neutros.[18]

3.7.- COMPATIBILIDAD DE LOS MATERIALES DEL SISTEMA HÍBRIDO.

Puesto que se coloca una capa de resina epoxi entre ambos materiales para unirlos, estos tienen una barrera química compatible. Ya que si no estuviera esta barrera la fibra de vidrio y la resina de poliéster son atacables por los álcalis del cemento como se ha nombrado en el apartado anterior.

3.8.- RESISTENCIA AL FUEGO.

Según una investigación del Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST) de EEUU y la Universidad de Pensilvania, las redes de nanotubos y nanofibras de carbono podrían dar lugar a polímeros más resistentes al fuego.

Los investigadores empezaron con un plástico transparente llamado polimetil metacrilato (PMMA) disuelto con nanotubos o nanofibras de carbono. Al calentarlo, el material se comportó como un gel. Los nanoaditivos se dispersaron a lo largo de la matriz de PMMA y, finalmente, lograron una estructura de red mecánicamente estable.

Según los investigadores, las redes se fueron formando a medida que los nanocompuestos pasaban de líquido a sólido. Tanto los nanotubos de carbono de pared única como los de múltiples paredes pueden superar a las nanoarcillas en cuanto a eficacia como retardadores del fuego, afirmó Jack Douglas, científico de materiales del NIST. Los materiales de nanocompuestos con propiedades retardadoras del fuego se podrían utilizar en una amplia gama de productos en mercados como el aeroespacial, el de la construcción, la electrónica y el empaquetado.

En aplicaciones en edificación o ingeniería civil los polímeros pueden protegerse con morteros ignífugos para dotarlos de la resistencia al fuego necesario.

3.9.- Aplicaciones en la ingeniería civil.

El primer puente híbrido que ha incorporado una concepción adaptada al material se construyó en el año 2000 en Estados Unidos (King's Stormwater Channel Bridge). Es un puente de dos vanos con 20,1 m de longitud y 13 m de anchura. Para los pilares y las vigas principales se usaron tubos de fibra de carbono rellenos con hormigón. El relleno de hormigón previene el pandeo de los tubos y a la vez sirve para anclar los elementos de conexión. El tablero es de fibra de vidrio.

Puentes con concepción de sustitución se han construido desde los años 80. A este tipo pertenecen las primeras pasarelas construidas en Estados Unidos y Canadá (perfiles pultrusionados de Strongwell y Creative Pultrusion). Tienen una luz máxima de 25 m, y en la actualidad se han construido unas 200 pasarelas.

La primera pasarela all-composite en Europa es la de Aberfeldy, Escocia, en 1992. En esta todos los componentes son de FRP (pilonos, cables, vigas, tablero). Muchas de las uniones son adhesivas, sólo para las conexiones entre los cables y las vigas transversales se usaron uniones mecánicas.

En la pasarela de Kolding Dinamarca (1997), en cambio, se usaron sólo uniones mecánicas. A finales de 1997 se construyó también la de Pontresina, en Suiza, formada por dos vanos, en uno de los cuales se usaron uniones atornilladas y en el otro adhesivas. Esta pasarela sólo se utiliza en invierno, y se monta y desmonta todos los años.



Fotografía 8: Pasarelas de Aberfeldy y Pontresina, respectivamente



Fotografía 9: Pasarela sobre el AVE en Lérida, proyecto de PEDELTA

En cuanto a puentes vehiculares, en 1982 se construyó el primer puente de carretera en el mundo, en China (Miyun Bridge), que tiene una luz de 20,7 m. El puente consta de 6 vigas sandwich laminadas a mano de fibra de vidrio/poliéster.

Los sistemas de tableros se han utilizado también para puentes all-composite. Así, en 1994 se construyó un puente levadizo (Bonds Mill Lift) utilizando el sistema modular ACCS. El primero que se construyó en Estados Unidos fue el No-Name Creek Bridge, en 1996, utilizando un tablero sándwich tipo Kansas. En el año 2002 se construyó en Oxfordshire un puente prototipo (West Mill Bridge) que formaba parte de un proyecto europeo de investigación en el que se desarrolló el perfil ASSET, fabricado por Fiberline. El tablero está formado por perfiles ASSET de fibra de vidrio y las vigas son perfiles estándar de fibra de vidrio reforzados con fibra de carbono (fotografía 10). Todas las uniones son adhesivas. El tablero formado por perfiles ASSET se ha utilizado posteriormente en otros puentes con vigas metálicas.



Fotografía 10: Puente West Mill (Oxfordshire, UK)

En España recientemente nos encontramos con trabajos que forman parte del proyecto "Puentes híbridos de materiales compuestos y hormigón para carretera", de referencia BIA2004-03404, financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia. Ver fotografías 11 y 12.



Fotografía 11: Puente de acciona en cuenca sobre el río Júcar.2012



Fotografía 12: Puente en Madrid sobre el manzanares.2012

Nos encontramos con patentes españolas de soluciones de puentes con soluciones poliméricas.

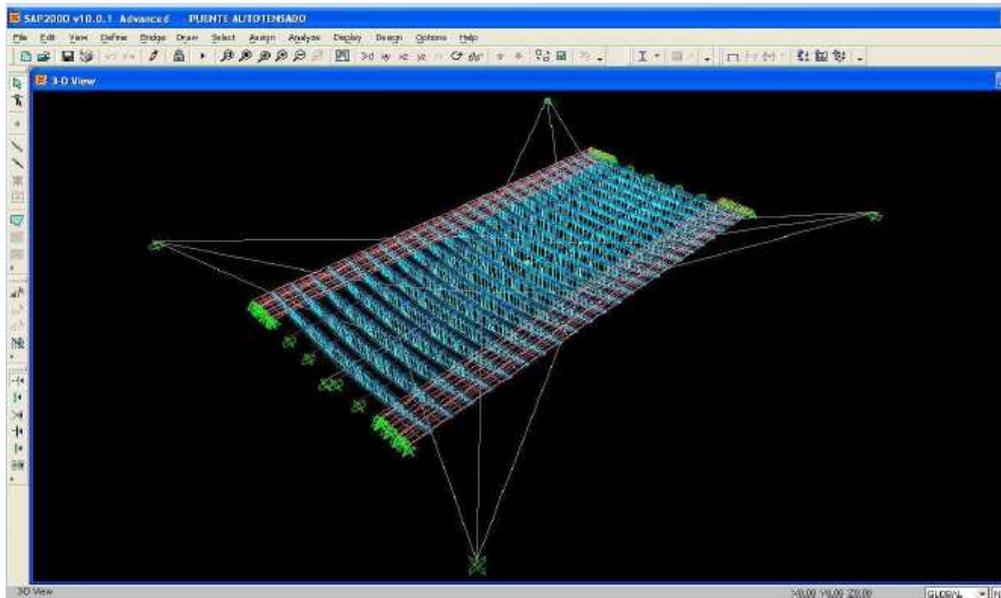


Figura 49: Puente en Madrid sobre el río Genil. Proyecto 2010.



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

① Número de publicación: **2 332 442**

② Número de solicitud: 200802147

⑤ Int. Cl.:

E01D 11/04 (2006.01)

E01D 11/02 (2006.01)

E01D 1/00 (2006.01)

E01D 19/16 (2006.01)

E01D 101/40 (2006.01)

⑫

SOLICITUD DE PATENTE

A1

⑫ Fecha de presentación: 11.07.2008

⑬ Fecha de publicación de la solicitud: 04.02.2010

⑦ Solicitante/s: **Universidad de Granada
Hospital Real - Cuesta del Hospicio, s/n
18071 Granada, ES**

⑧ Inventor/es: **Rus Calborg, Guillermo;
Chiachio Ruano, Juan y
Chiachio Ruano, Manuel**

A continuación un pequeño listado de figuras donde se aprecian las secciones tipo que diversos investigadores e ingenieros están trabajando para sistemas de entramados o cubiertas de puentes:

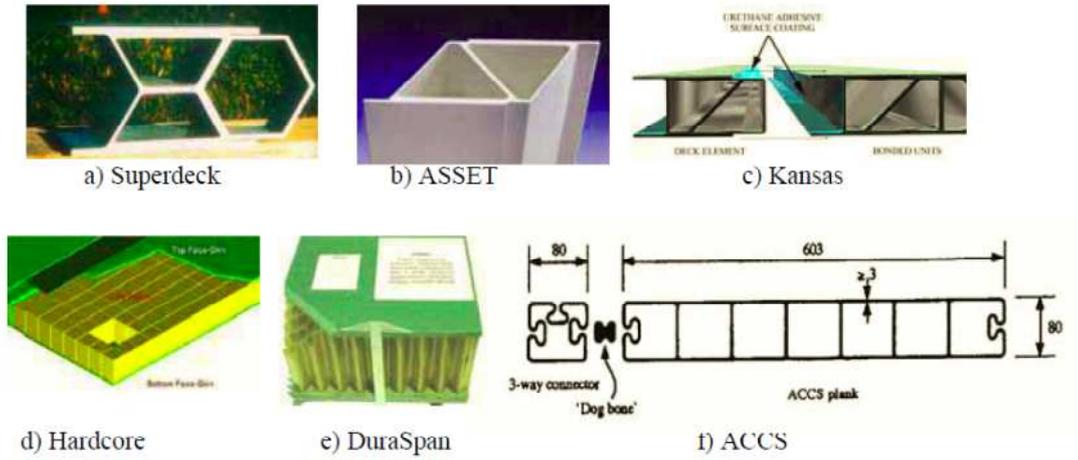


Figura 50: Secciones de varios tipos de tablero para puentes en FRP.

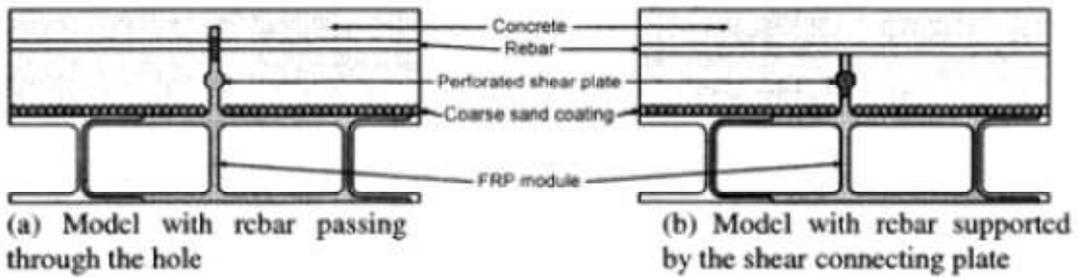


Figura 51: Sección híbrida (Kim et al., 2005)

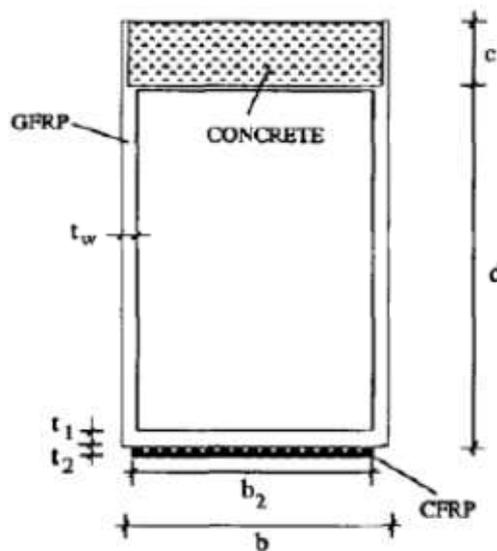


Figura 52: configuración híbrida CFRP+ GFRP + Hormigón. (Deskovic and Triantafillou, 1995a)

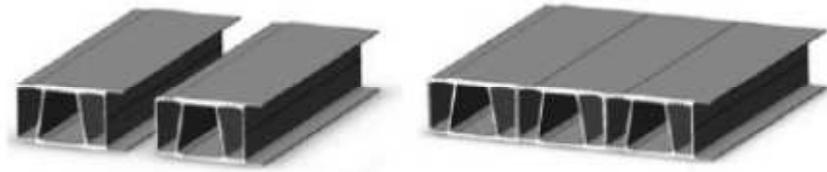


Figura 53: GFRP composite deck Con conectores machiembrados. (Lee and Hong, 2009)

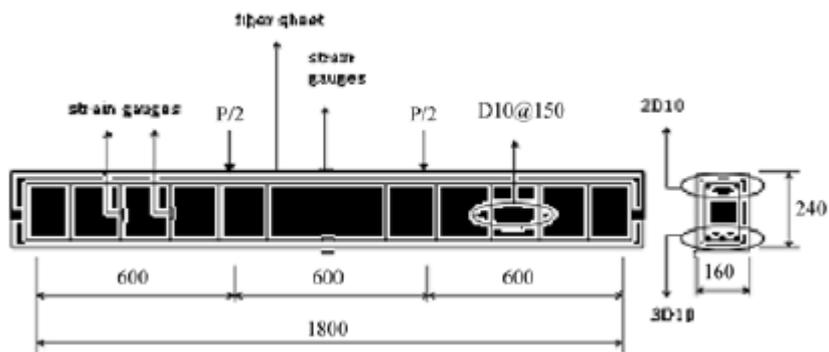


Figura 54: Sección compuesta tablero puente (Choi et al., 2009)

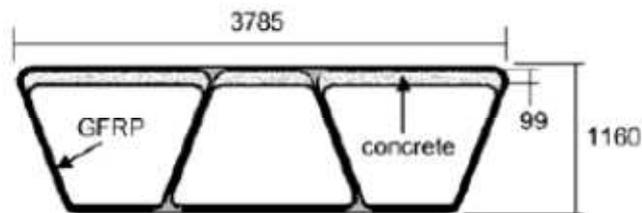


Figura 55: Estructura, sección vigas. (Aref et al., 2005)

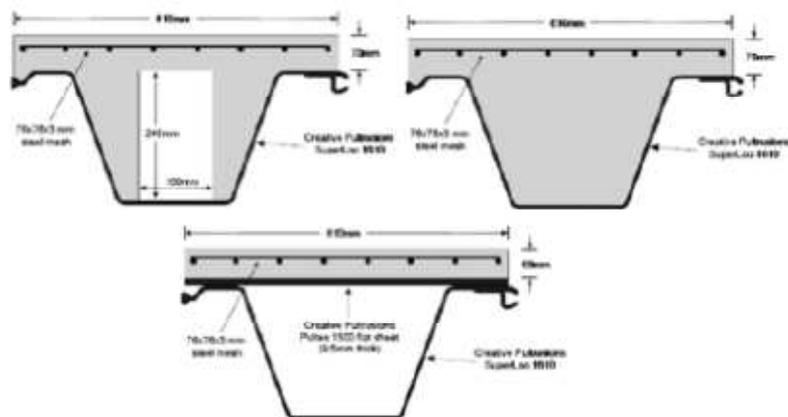


Figura 55b: Distintas configuraciones de secciones de viga (Honickman, 2008)

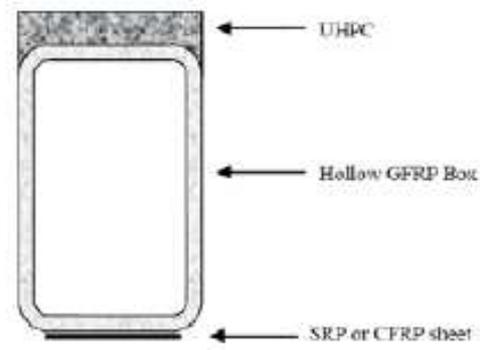


Figura 56: Sección híbrida FRP-UHPC (Elmahdyet al., 2008a)

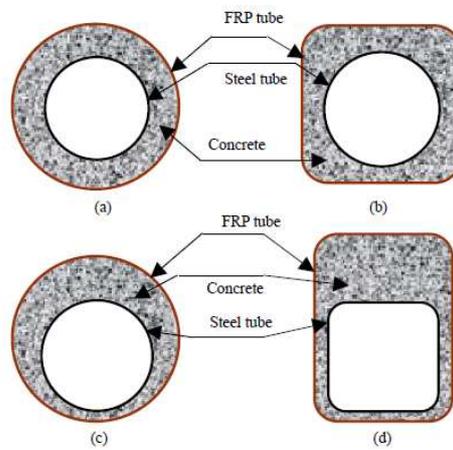


Figura 57: J.G. Teng , T. Yu & Y.L. Wong, CICE 2010 The 5th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering.

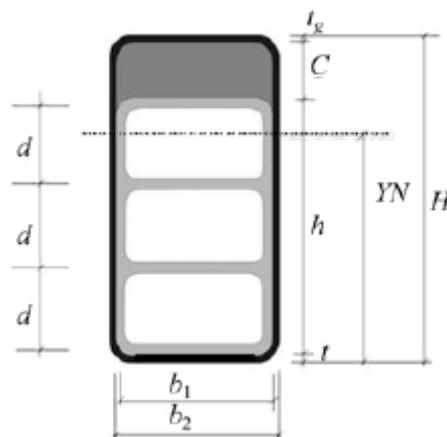


Figura 58: Sección tipo en caja (Chakraborty et al. 2010)

CAPÍTULO IV

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.

4.1.- SELECCIÓN DE MATERIALES.

4.1.1.- HORMIGÓN DE ALTAS PRESTACIONES, HRF + HAR+ HAC

Para fabricar el hormigón de altas prestaciones mecánicas reforzado con fibra de acero y autocompactante, se utiliza cemento, agua, arena fina y gruesa, grava, aditivos y varios tipos de fibras de acero, en distintas proporciones (fotografía 13).



Fotografía 13: Materiales del hormigón de altas prestaciones utilizados.

4.1.1.1.- Cementos.

Las características resistentes del cemento son fundamentales para los hormigones de estas características autocompactantes y de alta resistencia por ello se ha utilizado cementos de alta categoría como son los CEM I -52.5 R, suministrados por Cementos La Unión, de altas resistencias, la de finura de Blaine de 5070, con el fin de que los granos de cemento se hidraten al máximo y de forma rápida. La composición granulométrica (figura 59), química y potencial del cemento utilizado en el programa experimental se muestra en las tablas 11 y 12.

CaO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Cl	CaCO ₃
63,15	3,09	20,04	4,99	1,83	3,30	0,97	0,02	0,00	5,51
63,77	2,99	20,28	5,26	1,80	3,39	0,95	0,03	0,00	5,42
63,72	3,02	20,15	5,26	1,41	3,53	0,85	0,03	0,00	5,36
63,64	2,99	20,16	5,24	1,40	3,38	0,90	0,03	0,00	5,44
63,88	2,96	20,16	5,33	1,40	3,69	0,87	0,02	0,00	5,74
63,44	2,96	19,92	5,25	1,54	3,21	0,89	0,03	0,00	6,59
63,92	3,00	20,08	5,25	1,47	3,29	0,89	0,03	0,00	5,87
63,71	3,01	19,99	5,19	1,52	3,25	0,90	0,03	0,00	5,70
63,44	2,95	20,12	5,24	1,53	3,53	0,91	0,03	0,00	5,37
63,35	2,94	20,07	5,24	1,57	3,40	0,89	0,03	0,00	5,63
63,76	2,96	20,06	5,30	1,52	3,43	0,85	0,03	0,00	5,73

Tabla 11: Composición química media del CEM I-52.5 R, utilizado en el programa experimental.

C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
62,33	13,56	9,31	9,44

Tabla 12: Composición potencial del CEM I-52.5 R, utilizado en el programa experimental.

También se plantea en futuras experiencias utilizar cementos resistentes a sulfatos, con el fin de tener un menor consumo de agua de amasado y bajar al máximo posible la relación A/C, debido a que este cemento posee menor C₃A, tendrá una menor demanda de agua inicial.

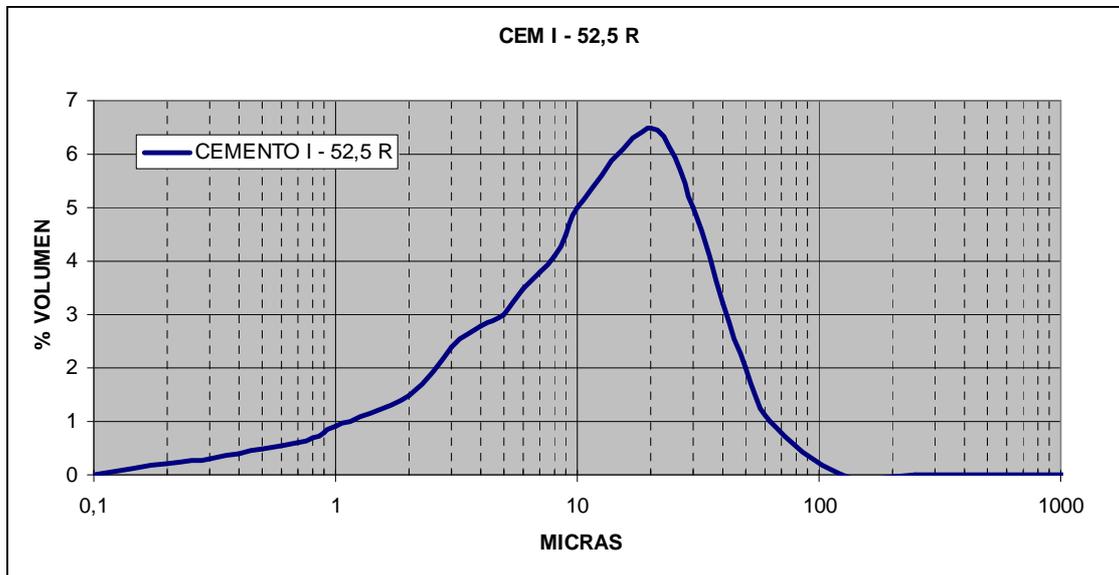


Figura 59: Distribución granulométrica del CEM I-52.5 R, utilizado en el programa experimental.

4.1.1.2.- Árido fino.

La arena que se utiliza es de naturaleza caliza y triturada, la fracción granulométrica es 0/2, se utiliza esta tipología de la cantera "Carasoles". Ver fotografía 14.



Fotografía 14: Árido fino 0/2, caliza rodada utilizada.

Al ser el árido triturado tendremos una menor trabajabilidad de la mezcla si bien tendremos una mayor área específica para recubrir de pasta cementante, no es necesario utilizar más agua ya que la suplimos con el aditivo superplastificante.

Tabla 13: Análisis granulométrico de la arena utilizada en el programa experimental.

ENSAYOS GRANULOMÉTRICOS:		ARENA 0/2				
MASA INICIAL SECA TOTAL (g):		290,17				
MASA ÁRIDO LAVADO (g):		235,9				
TAMIZ (mm)	R (g.)	PASA (g)	RETENIDO (%)	PASA (%)	R-A (%)	
4	-	235,90	-	100,00	-	
2	3,25	232,65	1,38	98,62	1,38	
1	90,62	142,03	38,41	60,21	39,79	
0,5	58,36	83,67	24,74	35,47	64,53	
0,25	36,51	47,16	15,48	19,99	80,01	
0,125	24,83	22,33	10,53	9,47	90,53	
0,063	21,00	1,33	8,90	0,56	99,44	
PASA	1,33	-	19,16	-	100	
MÓDULO GRANULOMÉTRICO					2,76	
% FINOS					19,16	

El análisis granulométrico expuesto en la tabla 13, muestra los porcentajes de árido según los tamices de la serie regular UNE, es un árido con una curva granulométrica continua, con un tamaño máximo de 2 mm y una fracción granulométrica 0/2. El módulo de finura es 2,76. El porcentaje de finos es alto, adecuado para dosificar un hormigón autocompactante. La mezcla al estar compuesta en su mayoría por árido fino estamos minimizado la rotura en la intercara árido grueso pasta cementante, con ello mejoramos la resistencia mecánica del hormigón.

4.1.1.3.- Arena gruesa.

La arena gruesa que se utiliza es de granulometría 0/4 caliza rodada (ver fotografía 15), de gran durabilidad y resistencia. El análisis granulométrico expuesto en la tabla 14, muestra los porcentajes de árido según los tamices de la serie regular UNE, es un árido con una curva granulométrica continua, con un tamaño máximo de 4 mm y una fracción granulométrica 0/4. El módulo de finura es 3,56 con un porcentaje de finos alto de 11,90. Se utiliza el árido calizo debido a la epitaxis que ofrece en la interacción árido pasta.

Tabla 14: Análisis granulométrico de la arena gruesa utilizada.

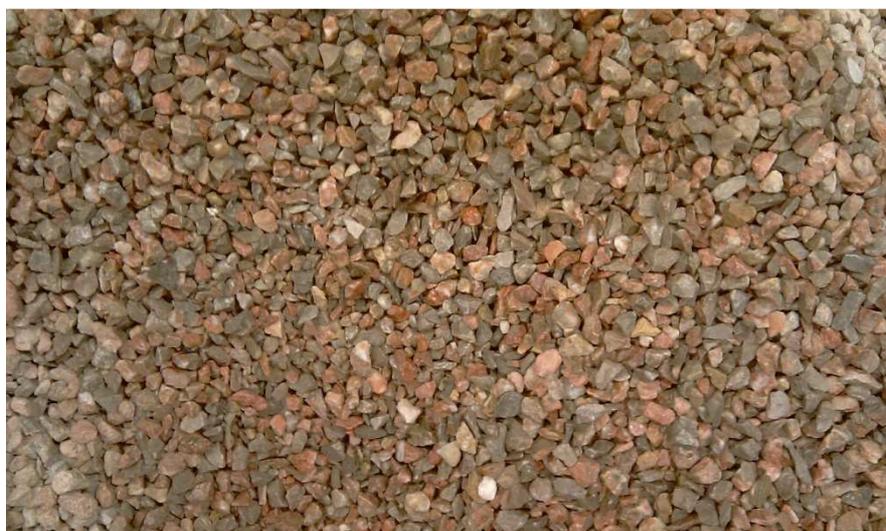
ENSAYOS GRANULOMÉTRICOS:		ARENA 0/4				
MASA INICIAL SECA TOTAL (g):		279,9				
MASA ÁRIDO LAVADO (g):		246,6				
TAMIZ (mm)	R (g.)	PASA (g)	RETENIDO (%)	PASA (%)	R-A (%)	
8	-	246,60	-	100,00	-	
4	19,44	227,16	7,88	92,12	7,88	
2	79,78	147,38	32,35	59,76	40,24	
1	51,26	96,12	20,79	38,98	61,02	
0,5	29,25	66,87	11,86	27,12	72,88	
0,25	23,61	43,26	9,57	17,54	82,46	
0,125	21,74	21,52	8,82	8,73	91,27	
0,063	21,52	19,44	8,73	7,88	100,00	
PASA	-	-	11,90	-	100	
MÓDULO GRANULOMÉTRICO					3,56	
% FINOS					11,90	



Fotografía 15: Arena gruesa 0/4, caliza rodada utilizada.

4.1.1.4.- Grava.

La grava es una caliza triturada (ver fotografía 16), de gran resistencia mecánica. El análisis granulométrico expuesto en la tabla 15, muestra los porcentajes de árido según los tamices de la serie regular UNE, es un árido con una curva granulométrica continua, con un tamaño máximo de 12 mm y una fracción granulométrica 6/12. El módulo de finura es 6,88 con un porcentaje de finos bajo de 0,90. No se utiliza una grava con mayor tamaño puesto que las dimensiones de la capa de compresión de 50 mm, requieren espesores menores a 20 mm, según EHE-08 para capas de compresión (0.4*c). Otro condicionante limita que la fibra larga (30 mm) debe tener una longitud de 2 a 3 veces el diámetro del árido grueso, en este caso nos encontramos en 2,5 veces el diámetro del árido grueso.



Fotografía 16: Grava 6/12, calizo machacado utilizado.

Tabla 15: Análisis granulométrico de la grava utilizada.

ENSAYOS GRANULOMÉTRICOS:	GRAVA 6/12				
MASA INICIAL SECA TOTAL (g):	2246,7				
MASA ÁRIDO LAVADO (g):	2233,3				
TAMIZ (mm)	R (g.)	PASA (g)	RETENIDO (%)	PASA (%)	R-A (%)
16	-	2.233,30	-	100,00	-
14	20,50	2.212,80	0,92	99,08	0,92
12,5	196,70	2.016,10	8,81	90,27	9,73
10	987,40	1.028,70	44,21	46,06	53,94
8	798,00	230,70	35,73	10,33	89,67
6,3	220,30	10,40	9,86	0,47	99,53
4	3,50	6,90	0,16	0,31	99,69
2	-	6,90	-	0,31	99,69
1	-	6,90	-	0,31	99,69
0,5	-	6,90	-	0,31	99,69
0,25	-	6,90	-	0,31	99,69
0,125	-	6,90	-	0,31	99,69
0,063	-	6,90	-	0,31	99,69
PASA	6,90	-	0,90	-	100

MÓDULO GRANULOMÉTRICO 6,88

% FINOS 0,90

4.1.1.5.- Agua.

En cuanto al agua, se utilizará agua potable, procedente de la red de suministro urbano del laboratorio, cumpliendo así con el artículo 27 de la EHE 08. La cantidad será más bien baja con el fin de obtener la relación A/C=0.4, los problemas de trabajabilidad y puesta en obra se suplen con la adición a la mezcla de un aditivo superfluidificante.

El agua utilizada, tanto para el amasado como para el curado del hormigón en obra, no debe contener ningún ingrediente dañino en cantidades tales que afecten a las propiedades del hormigón o a la protección de las armaduras frente a la corrosión, cumpliéndose ya que es agua potable de suministro urbano.

4.1.1.6.- Aditivos.

Se han analizado varios tipos de aditivos de distintas casas comerciales, todos ellos son policarboxilatos de tercera generación. En el presente trabajo de investigación se ha seleccionado el que menos problemas de segregación presenta en los ensayos previos del mini slump. Se elige el aditivo Sika Viscocrete®-20 HE (fotografía 17).

Cumple con los requerimientos de superplastificantes acordados en la norma EN-934-2. Es especialmente adecuado para la confección de hormigones de altas resistencias iniciales, hormigones con gran necesidad de reducción de agua y de excelente fluidez.

Cumple con las especificaciones de la norma UNE-EN-934-2 y SIA 262 (2003)

Datos del Producto

Forma Apariencia/Color Líquido marrón amarillento

Densidad 1.08 kg/l

Valor de pH 4.3 +/- 0.5

Contenido en Cloruros Libre de cloruros (EN 934-2)



Fotografía 17: Aditivo superplastificante Sika Viscocrete 20HE.

Los mecanismos de actuación debido a la adsorción superficial y el efecto estérico, que separan las partículas ligantes se consiguen un rápido desarrollo de las resistencias iniciales. No retrasa el fraguado.

La dosificación recomendada por el fabricante, para media trabajabilidad es 0.2-0.8% del peso del cemento y para una alta trabajabilidad, con baja relación

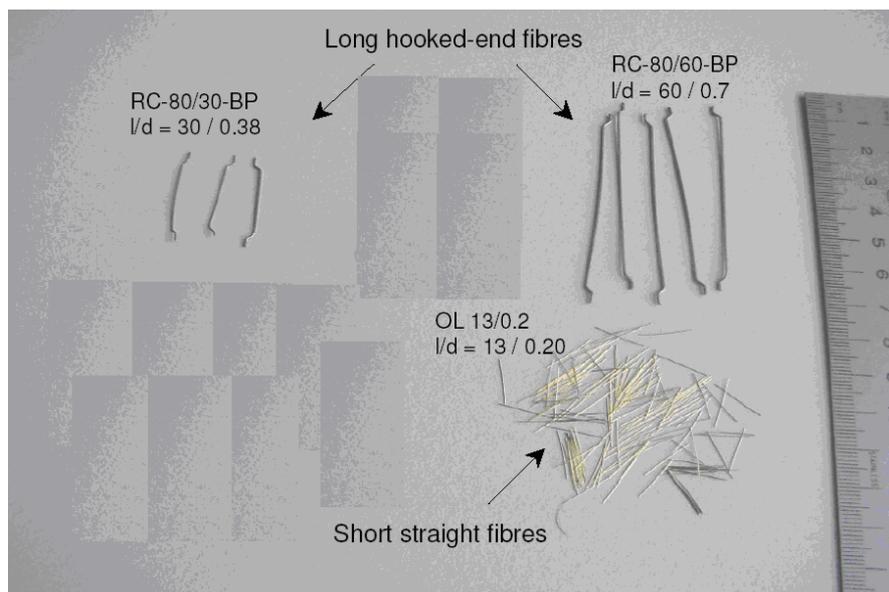
agua/cemento y para hormigón autocompactable de 1.0-2.0 % del peso del cemento.

En los ensayos de laboratorio hemos llegado a utilizar hasta el 1.3% del peso del cemento sin que presente segregación el hormigón. A medida que hemos aumentado la dosis se ha reducido el agua para la trabajabilidad deseada.

Hay que tener cuidado con el efecto de sobre dosificación que puede producir exudación y segregación sin embargo en los ensayos previos de laboratorio realizados se ha establecido la cantidad máxima para que no exude ni segregue.

4.1.1.7.- Fibras metálicas.

Las fibras metálicas que se utilizan son de la casa comercial Dramix, posee varios tipos de fibras metálicas como se aprecia en la fotografía 18.



Fotografía 18: Distintos tipos de fibras metálicas utilizadas de la marca comercial Dramix.

Se utilizarán dos tipos de fibras en los ensayos, una será corta de máxima esbeltez con el fin de evitar la microfisuración y una fibra más larga de máxima esbeltez con el fin de frenar el avance de la macrofisuración.

La fibra larga con máxima esbeltez es la Dramix RC-80/30-BP con una relación $l/d = 30/0.38$ mm (longitud/diámetro), se caracteriza también por tener la máxima esbeltez, 80, para una longitud de 30mm. Y la fibra corta que se ha utilizado es la tipo OL 13/0.16 con $l=13$ mm y $d=0.2$ mm.

La fibra larga debe tener una longitud de 2 a 3 veces el diámetro del árido grueso.

Características de los aceros:

La fibra tipo Dramix RC-80/30-BP es una fibra de acero al alto carbono, con los extremos conformados y encolados en peines. La longitud de la fibras es de 30 mm y el diámetro de 0.3 mm, encontramos 34.000 fibras/kg de acero aportado en la dosificación. La resistencia a tracción del alambre supera los 2600 MPa, 2,3 veces mayor a las demás fibras. No posee ningún tipo de revestimiento.

4.1.2.- POLIMERO PULTRUSIONADO REFORZADO CON FIBRA DE VIDRIO, GFRP.

4.1.2.- GRFP Pultrusión:

Se ha utilizado una resina de poliéster insaturado ortoftálico como matriz para confeccionar los perfiles pultrusionados, reforzándolos con fibra de vidrio tipo E.

4.1.2.1.- Resina de poliéster insaturado ortoftálico.

Los perfiles pultrusionados poseen una matriz de resina termoestable de poliéster insaturado ortoftálico, está formado 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. En su estado inicial previo al curado, tiene baja viscosidad, que permite que la resina fluya con facilidad con una buena impregnación de las fibras de refuerzo.

Con este polímero se obtienen perfiles pultrusionados con buenas propiedades mecánicas a bajo coste. Habitualmente se utilizan cuando se necesita un equilibrio entre las propiedades mecánicas y la resistencia química a temperaturas similares a la ambiente [Schutte 1994]. Se tendrá especial cuidado con los siguientes puntos débiles de estas resinas, la contracción en el curado, susceptibilidad a los medios químicos especialmente a los medios alcalinos y la absorción de agua por parte de la resina [Al-Assafi 2005].

Para llevar a cabo el curado del poliéster insaturado se añaden además iniciadores y catalizadores para la iniciación de la formación de radicales libres como el peróxido de metil-etil-cetona (MEKP), y acelerantes como el octoato de cobalto. La acción catalítica de los iones cobalto se basa en la formación de radicales a partir de peróxidos orgánicos por un proceso redox [Cook 1991, Yang 2001, Cardona 2007a],

4.1.2.2.- Fibra de vidrio.

El tipo de fibra de vidrio utilizado es el tipo E, la relación propiedades coste es muy buena. Resumen la composición típica de la fibra de vidrio tipo E [Quiu 1997, Miracle 2001, Mukherjee 2007].

Tabla 16: Distintos tipos de fibras metálicas utilizadas de la marca comercial Dramix.

Composición fibras de vidrio tipo E	
Componente	Cantidad %
SiO ₂	53-56
Al ₂ O ₃	14-15
CaO	17-22
MgO	1
Na ₂ /K ₂ O	0,8
Fe ₂ O ₃	0,3
B ₂ O ₃	6-8

Las fibras de vidrio están formadas por una red poliédrica tridimensional, a partir de la combinación de átomos de oxígeno rodeados de átomos de silicio, mediante enlaces covalentes. Los iones sodio forman enlaces iónicos con los átomos cargados de oxígeno [Miracle 2001]. Su estructura tridimensional le proporciona un comportamiento isotrópico, comparado con las fibras de carbono y aramida que son anisótropas.

Tabla 17: Propiedades de la fibra de vidrio tipo E

Propiedades fibra de vidrio tipo E	
Tipo	Vidrio E
Diámetro de hilo (micras)	10-20
Densidad (Kg/m ³)	2540
Módulo Elasticidad (GPa)	72
Resistencia a tracción (GPa)	3,5
Módulo específico	28
Coef. Expansión Térmica 10 ⁻⁶ /°K	5

4.1.2.3.- Filler.

Se utiliza filler calizo de unas 60 micras como adición no reactiva a la resina para dotar de mayor trabajabilidad durante el procesado, da cuerpo al material, un mejor acabado superficial y color al perfil pultrusionado.

4.1.2.4.- Perfil pultrusionado.

El perfil pultrusionado ha sido donado por la empresa “Fibrotec, S.L.”, estos perfiles son UPN 120.36.3 con una longitud de 1920 mm; han sido realizados con los materiales anteriormente mencionados, resina de poliéster como matriz, fibra de vidrio E como refuerzo y adición de filler calizo.

Las dimensiones geométricas de los perfiles UPN son 120 mm de altura, 36 mm de base y 3 mm de espesor. Con estos perfiles posteriormente se realizará el montaje de la viga de 2 UNP a tope. Fotografía 19.



Fotografía 19: Perfiles UPN pultrusionados de GFRP utilizados de Fibrotec, S.L.

Las características mecánicas facilitadas por la empresa están reflejadas en la siguiente tabla:

Tabla 17: Características mecánicas de los Perfiles pultrusionados de GFRP.

Propiedades mecánicas de los perfiles			
Propiedad	Siglas	MPa	NORMAS
Módulo de elasticidad	E 0°	23.000/30.000	EN 527-4
Módulo de elasticidad	E 90°	8.500	EN 527-4
Módulo de Cortante	G	3.000	ASTM D2344-84
Módulo de Poisson	V0°, 90°	0,23	
Módulo de Poisson	V0°, 90°	0,09	
Resistencia a Flexión, 0°		240	EN ISO 14125
Resistencia a Flexión, 90°		100	EN ISO 14125
Resistencia a Tracción, 0°		240	EN 527-4
Resistencia a Tracción, 90°		50	EN 527-4
Resistencia a Compresión, 0°		240	EN ISO 14126
Resistencia a Compresión, 90°		70	EN ISO 14126
Resistencia a Cortante		25	ASTM D2344-84
Pin-bearing Strength, axial		150	EN 13706-2:2002
Pin-bearing Strength, transversal		70	EN 13706-2:2002

4.1.3.-MEDIOS DE UNIÓN.

4.1.3.1.-Química.

Ala GFRP + HRF

Se utiliza resina epoxi resistente a la humedad para unir el perfil de GFRP con la capa de hormigón en estado fresco. La resina es SikadurR-31 CF, es un adhesivo estructural y mortero de reparación de dos componentes a base de resinas epoxi y cargas especiales, que no contiene disolventes, es tixotrópico y tolera la humedad. Está diseñado para usar a temperaturas entre +10 y +30 °C.

Es fácil de mezclar y aplicar. Adecuado para soportes secos o ligeramente húmedos. Adhesivo de alta resistencia. Tixotrópico, no descuelga en aplicaciones en paramentos verticales o en techos. Endurece sin retracción. Los componentes son de distinto color, facilitando así el control de mezclado. No necesita imprimación. Altas resistencias mecánicas iniciales y finales. Buena resistencia a la abrasión. Impermeable a líquidos y al vapor de agua. Buenas resistencias químicas.



Fotografía 20: Adhesivo epoxídico, para unir GRFP y HRF.

Certificados/Normativa Cumple los requerimientos de la norma EN 1504-4.

Colores

Comp. A: blanco

Comp. B gris oscuro

Mezcla A+B gris hormigón

Densidad 1.90 ± 0.1 kg/l (mezcla A+B) (α +23 °C)

Coefficiente de expansión térmica Coeficiente W:

$5,9 \times 10^{-5}$ por °C. (Rango de temperatura de +23 a +60 °C) (Según EN 1770)

Estabilidad térmica Temperatura de deformación por calor (TDC): (Según ISO 75)

TDC = +49 °C (α 7 días y +23 °C) (Espesor 10 mm)

Los datos mecánicos son suministrados por la empresa Sika, S.A. y se exponen a continuación en la siguiente tabla:

Tabla 18: Características físicas de la resina epoxi.

Resistencia a compresión (Según DIN EN 196)

Tiempo de curado	+10 °C	+23 °C	+30 °C
1 día	25-35 N/mm ²	45-55 N/mm ²	50-60 N/mm ²
3 días	40-50 N/mm ²	55-65 N/mm ²	60-70 N/mm ²
7 días	50-60 N/mm ²	60-70 N/mm ²	60-70 N/mm ²

Resistencia a flexión (Según DIN EN 196)

Tiempo de curado	+10 °C	+23 °C	+30 °C
1 día	11-17 N/mm ²	20-30 N/mm ²	20-30 N/mm ²
3 días	20-30 N/mm ²	25-35 N/mm ²	25-35 N/mm ²
7 días	25-35 N/mm ²	30-40 N/mm ²	30-40 N/mm ²

Resistencia a tracción (Según ISO 527)

Tiempo de curado	+10 °C	+23 °C	+30 °C
1 día	2-6 N/mm ²	6-10 N/mm ²	9-15 N/mm ²
3 días	9-15 N/mm ²	17-23 N/mm ²	17-23 N/mm ²
7 días	14-20 N/mm ²	18-24 N/mm ²	19-25 N/mm ²

Adherencia (Según EN ISO 4624, EN 1542 y EN 12188)

Tiempo de curado	Temperatura	Soporte	Adherencia
1 día	+10 °C	Hormigón seco	> 4 N/mm ² *
1 día	+10 °C	Hormigón húmedo	> 4 N/mm ² *
1 día	+10 °C	Acero	6-10 N/mm ²
3 días	+10 °C	Acero	10-14 N/mm ²
3 días	+23 °C	Acero	11-15 N/mm ²
3 días	+30 °C	Acero	13-17 N/mm ²

Módulo de elasticidad (E):

Tracción: 5000 N/mm² (14 días a +23 °C) Según ISO 527

Compresión: 4600 N/mm² (14 días a +23 °C) Según ASTM D695

Elongación a la rotura 0.4 ± 0.1% (7 días/23 °C) Según ISO 75

Vida de la mezcla: (máximo tiempo abierto)

Tiempo de vida (200 g) (Según EN ISO 9514)

Tiempo ~ 145 minutos a +10 °C ~ 55 minutos a +23 °C ~ 35 minutos a +30 °C

La vida de la mezcla empieza cuando se mezclan los dos componentes y es más corta a altas temperaturas y más larga a temperaturas bajas. Cuanta más cantidad de mezcla haya, menor será su tiempo de vida. Para aumentar la vida de la mezcla a altas temperaturas se pueden enfriar los componentes antes de su mezclado (nunca por debajo de los +5 °C).

Almas UPN Pultrusionados de GFRP

Se utiliza resina de poliéster insaturado ortoftálico para unir las almas de los perfiles de GFRP pultrusionados.

La resina utilizada está formulada desde fábrica con aditivos y aceleradores para simplificar el proceso, a la que se añadirá el correspondiente catalizador inmediatamente antes de iniciar el proceso de moldeo. Esta resina es de poliéster insaturado, ortoftálica, preacelerada y tixotrópica fabricada por Quimibase 2000 s.l., con denominación comercial Quimires 302 y suministrada por "Pinturas José Antonio García, S.L."

Para llevar a cabo el curado del poliéster insaturado se añaden además iniciadores y catalizadores para la iniciación de la formación de radicales libres como el peróxido de metil-etil-cetona (MEKP) al 3% y acelerantes como el octoato de cobalto que ya lleva incorporado en el recipiente ya que está preacelerada. La acción catalítica de los iones cobalto se basa en la formación de radicales a partir de peróxidos orgánicos por un proceso redox [Cook 1991, Yang 2001, Cardona 2007a]



Fotografía 21: Resina de poliéster insaturado ortoftálico y el catalizador metil-etil-cetona, para unir las almas de los UPN pultrusionados de GFRP.

4.1.3.2.- Mecánica.

Todas las uniones realizadas con resinas tanto las almas de los perfiles UPN, como las alas con la capa de compresión de hormigón fresco, se unirán además con tornillería métrica 4 de acero electrozincado.

Cada tornillo es de cabeza hexagonal, de caña de paso sencillo helicoidal al que se le añade en las zonas de contacto con el ala en ambas caras, tuerca hexagonal con arandela plana circular. Ver fotografía 22.

La unión del alma es para reforzar el adhesivo y evitar que rompa por problemas de adhesión, la caña del tornillo será de 30 mm. En el caso del ala y el hormigón para mejorar el anclaje además de la resina, la caña del tornillo será de 50 mm.



Fotografía 22: Tornillería de cabeza hexagonal métrica 4 mm, con arandelas y tuercas de 50 y 30 mm de caña

4.2.- EQUIPOS Y PROCEDIMIENTOS EXPERIMENTALES.

4.2.1.- DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE AGUA DE LOS ÁRIDOS (UNE 83-133-90)

Para identificar el contenido de agua existente en los áridos se ha utilizado el procedimiento establecido en las normas UNE 83-133-90 "Determinación de las densidades, coeficiente de absorción y contenido de agua en el árido fino" y UNE 83-134-90 " Determinación de las densidades, porosidad, coeficiente de absorción y contenido en agua del árido grueso".

Para ello se pesa una muestra del material, en su estado natural, con precisión de 0,1 g, obteniendo su masa. A continuación, se seca la muestra en una estufa con temperatura a $125\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$ hasta masa constante y se obtiene su masa.

Finalmente se calcula el contenido en agua, en tanto por ciento.

4.2.2.- DETERMINACIÓN DE LA GRANULOMETRÍA DE LOS ÁRIDOS (UNE-EN 933-1)

La granulometría de los áridos, han sido obtenidas por tamizado de acuerdo con la norma UNE-EN 933-1 parte 1 "Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos – Determinación de la granulometría de las partículas – Método del tamizado".



Fotografía 23: Serie de tamices utilizado en laboratorio.

4.2.3.- DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD DE CONJUNTO DE LOS ÁRIDOS (ASTM C29/CM29)

El proceso seguido para determinar la densidad de conjunto de los áridos, se basa en la norma ASTM C29/C29M. El proceso consiste en mezclar los áridos, en seco, en las proporciones a analizar. Con la mezcla realizada se rellena un recipiente de volumen conocido y se pesa la misma, obteniéndose el peso del conjunto. Posteriormente se calcula la densidad del conjunto.

4.2.4.- OTROS ENSAYOS PARA CARACTERIZACIÓN DE ÁRIDOS

Se determinaron las densidades, coeficiente de absorción y contenido en finos para las arenas de acuerdo con las normas UNE 83-134/90 "Determinación de las densidades, porosidad, coeficiente de absorción y contenido en agua del árido grueso" y UNE 83-133/90 "Determinación de las densidades, porosidad, coeficiente de absorción y contenido en agua del árido fino".

4.2.5.- DETERMINACIÓN DE LA FLUIDEZ DE UNA PASTA MEDIANTE EL CONO DE MARSH (UNE-EN 455)

Para realizar el ensayo, se llena el cono de Marsh a través de una rejilla que filtra la pasta impidiendo que los grumos que puedan haber sido formados en el proceso de amasado o cualquier otro cuerpo extraño tapone la salida del cono. Una vez completado el llenado se quita el tapón que cierra el cono por su parte inferior y se mide el tiempo que tarda en fluir un litro de material.

4.2.6.- CARACTERIZACIÓN DE LA FLUIDEZ DE LOS HAC (UNE 83361:2007)

La caracterización de la fluidez de los HAC se llevó a cabo por medio del ensayo del escurrimiento norma UNE 83361:2007 "Hormigón autocompactante. Caracterización de la fluidez. Ensayo del escurrimiento".



Fotografía 24: Ensayo escurrimiento en laboratorio.

4.2.7.- CARACTERIZACIÓN MECÁNICA A COMPRESIÓN DE LAS PROBETAS DE HORMIGÓN (UNE-EN-196-1)

Para la rotura de probetas a compresión se sigue el procedimiento determinado en la norma UNE-EN-196-1. Se utiliza una prensa Ibertest con adaptador para probeta cúbica de 40 x40 mm (fotografías 24), con una fuerza máxima de 1500 KN.



Fotografía 24: Máquina de ensayos a compresión del laboratorio del DCAR, ETSIE.

Las probetas se extraen de la cámara de curado, tres horas antes del ensayo, para iniciar su secado al aire dentro del laboratorio. Debido a la planeidad de sus caras no se refrentan ni se pulen las probetas de 10 x10 pero las cilíndricas si, ensayándose directamente a compresión. La velocidad de aplicación de la carga para las probetas cilíndricas, para las probetas prismáticas de 100x100 mm 5 KN/s. Los datos que se obtendrán serán las resistencias máximas de compresión. El modulo de deformación longitudinal (**E**), se obtiene experimentalmente, fotografía 25.



Fotografía 25: Probeta cilíndrica obtención del módulo de elasticidad a compresión.

4.2.8.- CARACTERIZACIÓN MECÁNICA A FLEXIÓN DE LAS PROBETAS DE HORMIGÓN Y VIGAS (EN 14651:2005+A1)

Para la rotura de probetas a flexión se sigue el procedimiento determinado en la norma EN 14651:2005+A1. Se utiliza una prensa Ibertest con bancada a flexión (fotografía 26), con una fuerza máxima de 150 KN.



Fotografía 26: Máquina de ensayos a flexión del laboratorio del DCAR, ETSIE.

La velocidad de aplicación de la carga para las probetas prismáticas de las probetas prismáticas de 400x100x100 mm y vigas de hormigón, pultrusionadas de GFRP e híbrida hecha a mano, es de 0.06 KN/s.

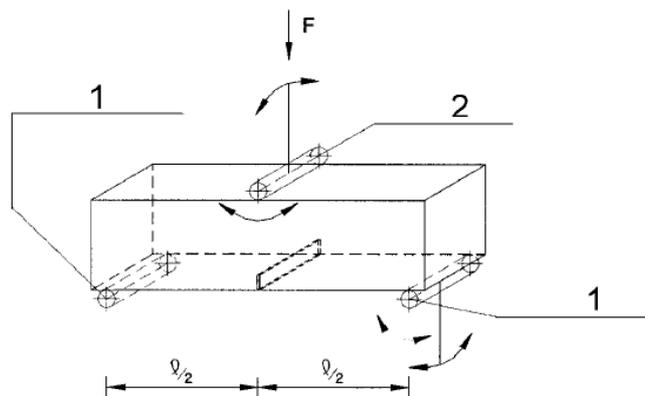


Figura 60: Esquema de la disposición de cargas en las probetas de ensayo a flexión con punto central de carga. EN 14651:2005+A1

Tras un cierto tiempo, la probeta rompe por la mitad ofreciendo un corte generalmente recto. Los resultados de la tensión de rotura se expresan como MPa o N/mm² con una aproximación de 0,1 y resultan de dividir la carga máxima soportada entre la sección transversal de la probeta. Queda expresada con la siguiente fórmula:

$$f_{cf} = (3 \times F \times l) / (2 \times d_1 \times (d_2 - e)^2)$$

Donde:

f_{cf} : es la resistencia a flexión en MPa

F : es la carga máxima en N

l : es la distancia entre los rodillos soportes en mm

d_1 y d_s : son las dimensiones laterales de la sección en mm

1: Rodillo de carga, 2: Rodillo soporte, 3: Rodillo soporte, e: entalla

Los valores de tensión máxima aplicada y resistencia a flexotracción en los ensayos han sido calculados suponiendo una distribución triangular de tensiones en la sección de rotura. La flecha se ha controlado con un captador de deformación LVDT que se conecta a un receptor (spider) que envía los datos a un programa informático de proceso y cálculo, de donde se obtienen los datos para ser analizados mediante hojas de cálculo.

4.2.9.- CARACTERIZACIÓN MECÁNICA A FLEXIÓN DE LAS VIGAS HÍBRIDAS.

Las vigas híbridas se ensayan en un pórtico de ensayo a flexión rotura en cuatro puntos. En la fotografía 27, se observa la instrumentación y el pórtico. La velocidad de carga es aplicada bajo deformación constante 0.2 mm/m.



Fotografía 27: Viga híbrida ensayo a flexión en 4 puntos, laboratorio ICITECH.

4.3.- PROGRAMA EXPERIMENTAL.

El objetivo del proyecto es el estudio del comportamiento a flexión (rotura en 4 puntos) de vigas híbridas, realizadas con perfiles pultrusionados de GFRP con una capa de compresión de hormigón reforzado con fibras metálicas. La combinación de estos dos tipos de materiales tan dispares en cuanto a su comportamiento estructural, hace que se ubiquen en una sección estructural donde mejor se comporten; es decir el hormigón en la zona comprimida y el GFRP en la zona traccionada.

El modo de fallo por problemas de pandeo en la zona comprimida del GRFP, está solucionado con la incorporación de la capa de compresión de hormigón. En esta nueva composición de viga, esta puede romper por en compresión (aplastamiento de la capa de compresión) o en tracción en el ala del perfil de GFRP. Los GRFP son materiales cuyo comportamiento en rotura es frágil, comportamiento no deseable en estructuras de ingeniería civil y de edificación; con lo cual el programa experimental se basa en el diseño de una viga híbrida donde la rotura se produzca de la capa comprimida, absorbida por el hormigón, evitando los más modos de fallo. Esto lleva a la confección de una viga híbrida formada por dos UPN-120.36.3 de 1920 mm de longitud, donde se unen por las almas para formar un IPE, con resinas de poliéster y tornillería, del mismo modo la unión de la capa de compresión con el perfil GRFP, se realiza mediante tornillería y resina epoxi. Blindados los modos de fallo no deseables, se procede al estudio de la influencia de los hormigones reforzados con fibras de acero, ya que las fibras confieren en el modo de fallo tras aplastamiento del material en el comportamiento dúctil a rotura y en consecuencia de la viga híbrida.

4.3.1.- HORMIGÓN DE ALTAS PRESTACIONES, HRF + HAC+HAR

Se confecciona un hormigón de alto rendimiento, este hormigón está reforzado con fibras metálicas y tiene propiedades reológicas de autocompactabilidad. Para ello se procederá a utilizar los materiales seleccionados, agua, cemento, arena 0/2, arena 0/4, grava 6/12, fibras Dramix 60/30BP, fibras Drámix OL 13/0.16 y aditivo superfluidificante Sika Viscocrete®-20 HE; no se utilizan fillers ya que las arenas y el alto contenido de cemento aportan un alto contenido en finos al material.

La programación consiste en la dosificación de una matriz estable para un hormigón de alta resistencia (HAR) de 80 MPa, a 28 días, (HAC) con 750 mm de escurrimiento como amasada patrón; a esta amasada patrón se le incorporan cantidades de fibras metálicas en 30 Kg/m³, 60 Kg/m³ y 120 Kg/m³, respectivamente estableciendo así tres

tipologías de HRF un nivel básico, medio y de alto rendimiento, respectivamente. Tablas 19 y 22.

Las fibras utilizadas se combinan varios tipos atendiendo al control de fisuración; se pretende con la incorporación de las fibras Dramix OI 13/0.16 en un 40 %, el control de la microfisuración, y un aumento sustancial de la ductilidad del material una vez rompa la matriz; en cuanto al control de la macrofisuración, las fibras Dramix 60/30 BP en un 60 %.

Desde el punto de vista de la reología autocompactante del material se realiza para evitar el proceso de vibrado y tener una gran trabajabilidad en la colocación, en el molde.

La confección de una matriz de alta resistencia implica una deformación en rotura 0.025 que puede verse disminuida frente a un hormigón de resistencia normal 0.035, a pesar de ello es adecuado realizar la matriz de alta resistencia para que el anclaje de las fibras sea muy bueno, maximizando el empleo de dosificaciones altas de fibras, ver tabla19.

Tabla19: Programa experimental dosificación del hormigón en función de la cantidad de fibras de refuerzo en Kg/m³.

Dosificación Kg/m ³	Dr= g/cm ³	HRF_0	HRF_30	HRF_60	HRF_120
CEM	3,1	500	500	500	500
H ₂ O	1	195	195	195	195
ARENA 0/2	2,6	507,5	507,5	507,5	507,5
ARENA 0/4	2,6	507,5	507,5	507,5	507,5
GRAVA 6/12	2,6	650	650	650	650
Sika Viscocrete 20HE 1%	1,09	5	5	5	5
Dramix OL 13/0,16_40%	7,8	0	12,00	24,00	48,00
Dramix 80/30 BP_60%	7,8	0	18,00	36,00	72,00
%Grava	-	0,39	0,39	0,39	0,39
Volumen lt	-	1001	1001	1001	1001
Peso Matriz Kg/m ³	-	2360	2360	2360	2360
A/C		0,40	0,40	0,40	0,40

Los ensayos que se realizan para la caracterización del HRF, son los de compresión simple, flexión en tres puntos con entalla y tracción indirecta con el ensayo brasileño, la tipología, número y dimensiones de probetas, número y volumen de amasadas y curado se presentan a continuación en las tablas 20 y 21.

Tabla 20 : Programa experimental caracterización de las capacidad mecánicas del HRF.

Ensayos del HRF	Compresión		Flexión	Tracción indirecta
Tipo probeta	Cúbica	Cilíndrica	Prismática	Cilíndrica
dimensiones probeta_mm	100x100	150x300	400x100x100	150x300
nº probetas/N	2	2	2	2
nº amasadas	4	4	4	4
Curado	Desmoldado 24 h + Cámara húmeda 95 %H.R. 21°C + 28 Días			

Tabla 21: Programa experimental volumen hormigón para caracterización del HRF.

Ensayos/N	Tipo probeta cm	nº ud	Volumen m3	lt
Brasileño	cilindrica 15x30	2	0,0106	10,6
Flexión	prismatica 10x10x40	2	0,008	8,0
Compresión	cilindrica 15x30	2	0,0106	10,6
	cubica 10	2	0,002	2,0
Total Ensayos		8	0,0312	31,2
Capa de compresión			0,008832	8,832
Total Viga Híbrida			0,0400	40,0

Tabla 22: Programa experimental dosificación del hormigón en función de la cantidad de fibras de refuerzo en Kg/N.

Dosificación Kg/N	Dr g/cm ³	HRF_0	HRF_30	HRF_60	HRF_120
Volumen lt / N	40				
CEM	3,1	20	20	20	20
H ₂ O	1	7,8	7,8	7,8	7,8
ARENA 0/2	2,6	20,3	20,3	20,3	20,3
ARENA 0/4	2,6	20,3	20,3	20,3	20,3
GRAVA 6/12	2,6	26	26	26	26
Aditivo Sika Viscocrete 20HE_1%	1,09	0,2	0,2	0,2	0,2
Dramix OL 13/0,16_40%	7,8	0	0,43	0,86	1,73
Dramix 80/30 BP_60%	7,8	0	0,65	1,30	2,59
%Grava	-	0,56	0,56	0,56	0,56
Volumen lt	-	40	40	40	40
Peso Matriz Kg/m ³	-	94	94	94	94
A/C		0,40	0,40	0,40	0,40

Estos hormigones son caracterizados, obteniendo datos reológicos cuantitativos en su estado fresco y de sus capacidades mecánicas, tal y como se resumen en la tabla 23, a 28 días de edad de curado en cámara húmeda.

En cuanto a las propiedades reológicas del hormigón en estado fresco, los ensayos a realizar son los del “slump flow” o escurrimiento y la medición del tiempo T_{50} , el ensayo del embudo en V, L-Box y el anillo japonés no se realizan, ya que el tipo de elemento estructural a hormigonar no existen armaduras y los conectores no entorpecen el hormigonado ya que se encuentran en posición I, según EHE-08.

Tabla 23 : Programa experimental caracterización del HRF.

HRF-80 / 0/30/60/120 kg fibra				
MPa	HRF_0	HRF_30	HRF_60	HRF_120
F_c cilíndrica	-	-	-	-
F_c cubica	-	-	-	-
E_c	-	-	-	-
G_c	-	-	-	-
Cortante	-	-	-	-
F_{c,flex}	-	-	-	-
F_{c,flex} Matriz	-	-	-	-
F_{I,COMD} 0,05	-	-	-	-
F_{c,flex} F1 COMD 0,5 mm	-	-	-	-
F_{c,flex} F2 COMD 1,5mm	-	-	-	-
F_{c,flex} F3 COMD 2,5 mm	-	-	-	-
F_{c,flex} F4 COMD 3,5 mm	-	-	-	-
E_{FLEX}	-	-	-	-
T50 _segundos	-	-	-	-
slump-flow _mm	-	-	-	-

4.3.2.- PERFILES PULTRUSIONADOS

Los perfiles pultrusionados han sido fabricados por la empresa “Fibrotec, S.L.” con las condiciones expuestas en la selección de materiales (fotografía 28). Las características del material GFRP y de los perfiles UPN no varían, será una variable constante y única en el proyecto, ya que no se pretende estudiar la influencia del perfil pultrusionado de GFRP, solo se estudia la influencia de la variable fibras dentro del hormigón.



Fotografía 28: Perfiles UPN pultrusionados de GRFP utilizados.

No obstante se realizarán ensayos de caracterización para comprobar en los perfiles proporcionados, los valores reales que poseen, para realizar los cálculos mecánicos y la modelización por elementos finitos MEF. La programación de los ensayos y los datos que se requieren están resumidos a continuación en la tabla 24.

Tabla 24: Programa experimental caracterización de las capacidades mecánicas del GRFP.

Propiedades mecánicas del GFRP en perfiles

Propiedad	Siglas	MPa	NORMAS
Módulo de elasticidad	$E_{0^{\circ}}$	-	EN 527-4
Módulo de elasticidad	$E_{90^{\circ}}$	-	EN 527-4
Módulo de Cortante	G	-	ASTM D2344-84
Módulo de Poisson	$\nu_{0^{\circ}, 90^{\circ}}$	-	
Módulo de Poisson	$\nu_{0^{\circ}, 90^{\circ}}$	-	
Resistencia a Flexión, 0°		-	EN ISO 14125
Resistencia a Flexión, 90°		-	EN ISO 14125
Resistencia a Tracción, 0°		-	EN 527-4
Resistencia a Tracción, 90°		-	EN 527-4
Resistencia a Compresión, 0°		-	EN ISO 14126
Resistencia a Compresión, 90°		-	EN ISO 14126
Resistencia a Cortante		-	ASTM D2344-84
Pin-bearing Strength, axial		-	EN 13706-2:2002
Pin-bearing Strength, transversal		-	EN 13706-2:2002

4.3.3.- VIGAS HÍBRIDAS

Se realizan 4 vigas híbridas, los perfiles pultrusionado presentan la misma tipología, como se aprecia en la fotografía 29, la variable está en el hormigón reforzado con fibra metálica para la cabeza de compresión, como ya se ha comentado en los puntos 4.1 y 4.2 anteriormente; ya que se pretende estudiar la influencia del hormigón reforzado con fibras (HRF) en el comportamiento a rotura de las vigas.



Fotografía 29: 4 Vigas de 2 UPN a tope pultrusionados de GRFP, sin capa de compresión.

Las vigas se caracterizan por ser 2 UPN de GFRP unidos a tope en el alma mediante una resina de poliéster insaturado ortoftálico además de reforzarlo mediante tornillería métrica 4 mm, según se aprecia en la disposición de la fotografía 29. Aunque se han barajado diversos tipos de combinaciones de perfiles, la disposición geométrica utilizada corresponde a un perfil tipo I. Ver figura 61.

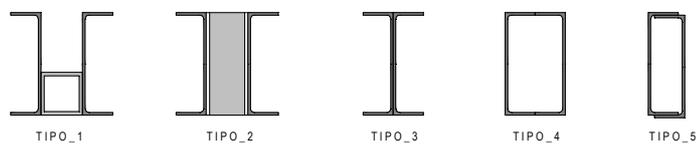


Figura 61: Distintas hipótesis de sección barajadas.

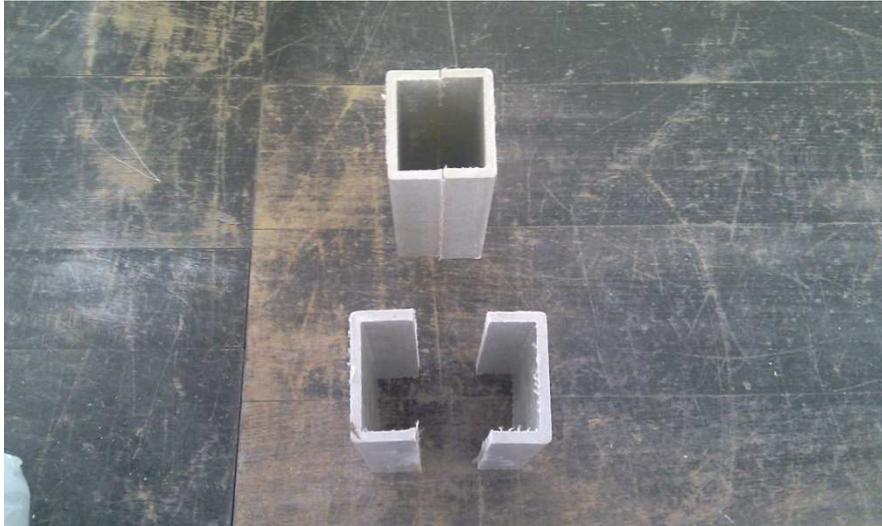
La sección tipo 3 en I, aunque no presenta la mejor inercia en el eje x, no es necesario dotar a la sección de más área en la zona traccionada ya que el GRFP

posee una alta capacidad mecánica por ello no será la zona de fallo de la viga. El modo de fallo se producirá en la zona comprimida en la capa de compresión del hormigón, pero para ello, debemos “blindar” y reforzar aquellas zonas donde se pueden producir otros fallos.

La sección en I, tipo 3, tiene las siguientes ventajas frente a las demás:

- 1.- Al poseer doble alma tiene un mejor comportamiento a cortante evitando rotura del alma por cortante, además la viga será más rígida mejorando así la baja rigidez aportada por el material GFRP alrededor de 35 GPa.
- 2.- Mejor comportamiento de la viga frente a las cargas puntuales, ya que están centradas en el alma. Y no presenta el típico problema de la viga cajón que puede alabearse o aplastarse las alas y producirse el fallo por cargas puntuales en la viga.
- 3.- La unión química y mecánica de los dos perfiles es muy sencilla y eficaz, frente a la sección tipo cajón que dificulta la unión mecánica y química, ya que posee menos superficie de contacto en sus alas.
- 3.- El ensayo se realiza a flexión en cuatro puntos, teniendo en cuenta la aplicación en obra es más fácil unir mecánicamente vigas en su alma que con las de tipo cajón. Extrapolándose al modo de unión de viguetas transversales de un entrevigado de una estructura.

En cuanto a la probabilidad de alabeo de las alas y torsión del ala y alma, se colocaran unos rigidizadores pultrusionados de GFRP del tipo U-50.25.4, en los puntos de aplicación de las cargas y los apoyos, como se ve en la fotografía 30.



Fotografía 30: Rigidizadores pultrusionados de GRFP en el alma de la viga.

La base de todo sistema híbrido, es que la unión debe ser perfecta. Estas estructuras están compuestas por dos materiales distintos, que potencian la capacidad estructural del sistema, es fundamental que los dos materiales experimenten deformaciones conjuntas, por ello su unión debe ser perfecta. Esta unión se realiza por medios mecánicos y químicos, es decir se colocaran conectores de métrica 4 en el ala superior del perfil de GRFP y una resina epoxi (Sikadur-31 CF), con el fin de garantizar al máximo la unión entre el GRFP y el hormigón reforzado con fibras, HRF.

Se protege esta zona evitando el modo de fallo por cizalladura entre los dos materiales. Del mismo modo se reforzará la unión de las almas con resina de poliéster insaturado ortoftálico y tornillería métrica 4 (M4), forzando a la sección a alcanzar sus límites estructurales, pudiendo estudiar la influencia del HRF.

Los cuatro tipos de viga según se muestra en la tabla 25, son la ALB_HYB_HRF_0 como viga patrón, la ALB_HYB_HRF_30, ALB_HYB_HRF_60 y ALB_HYB_HRF_120 donde son las fibras en 30, 60 y 120 kg/m³ las que confinarán la cabeza de compresión de la sección forzando al hormigón a una rotura dúctil y por tanto el fallo del conjunto híbrido no sea frágil. Ver tabla 25.

Tabla 25: Programa experimental tipología de vigas híbridas GFRP+HRF.

Material	ALB_HYB_HRF_0	ALB_HYB_HRF_30	ALB_HYB_HRF_60	ALB_HYB_HRF_120
GFRP				
Perfil tipo	2UPN-120.36.3	2UPN-120.36.3	2UPN-120.36.3	2UPN-120.36.3
Longitud_mm	1920	1920	1920	1920
Altura_mm	120	120	120	120
Base_mm	72	72	72	72
Espesor alma	6	6	6	6
Espesor alas	3	3	3	3
HRF				
Perfil tipo	Rectángulo	Rectángulo	Rectángulo	Rectángulo
Base_mm	90	90	90	90
Altura_mm	50	50	50	50
Fibras Kg/m ³	0	30	60	120
UNIÓN				
Almas UPN	Poliéster + tornillería M4			
Alas UPN/HRF	Epoxi + tornillería M4			
Rigidizadores	UPN 50.25.4 GFRP	UPN 50.25.4 GFRP	UPN 50.25.4 GFRP	UPN 50.25.4 GFRP
Ensayo	Flexión cuatro puntos	Flexión cuatro puntos	Flexión cuatro puntos	Flexión cuatro puntos

El conjunto de resultados que se pretenden obtener se muestran de modo esquemático en la tabla 26:

Tabla 26: Programa experimental sensores/gráficas caracterización de vigas híbridas GFRP+HRF.

GRÁFICAS caracterización:	SENSORES DESPLAZAMIENTO
1.- Gráfico Fuerza/flecha	LVDT 3
2.- Gráfico Momento/Curvatura	LVDT 3
3.- Posición eje neutro/estado de carga	SG1,SG2, SG3,SG4, SG5, SG6, SG7 SG, SG8, SG9
4.- Gráfico flecha/posición viga	LVDT 2, LVDT 3, LVDT 4
5.- Gráfico Deformación/Fuerza	LVDT3, SG1,SG2, SG3,SG4, SG5, SG6, SG7 SG, SG8, SG9
6.- Gráfico Fuerza/deslizamiento	LVDT 1, SG2, SG3,SG4, SG5
7.- Pandeo lateral	LVDT 6

En la figura 62 y 63, se muestra la disposición de los captadores de desplazamiento (LVDT) y las galgas extensiométricas (SG), así como la geometría y disposición de la tornillería apoyos, cargas y rigidizadores en la sección tipo y a lo largo de la viga de GFRP+HRF.

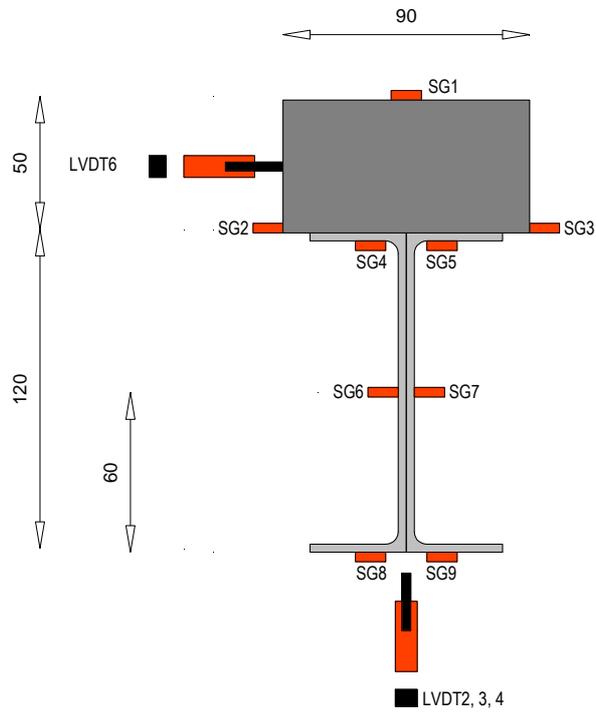
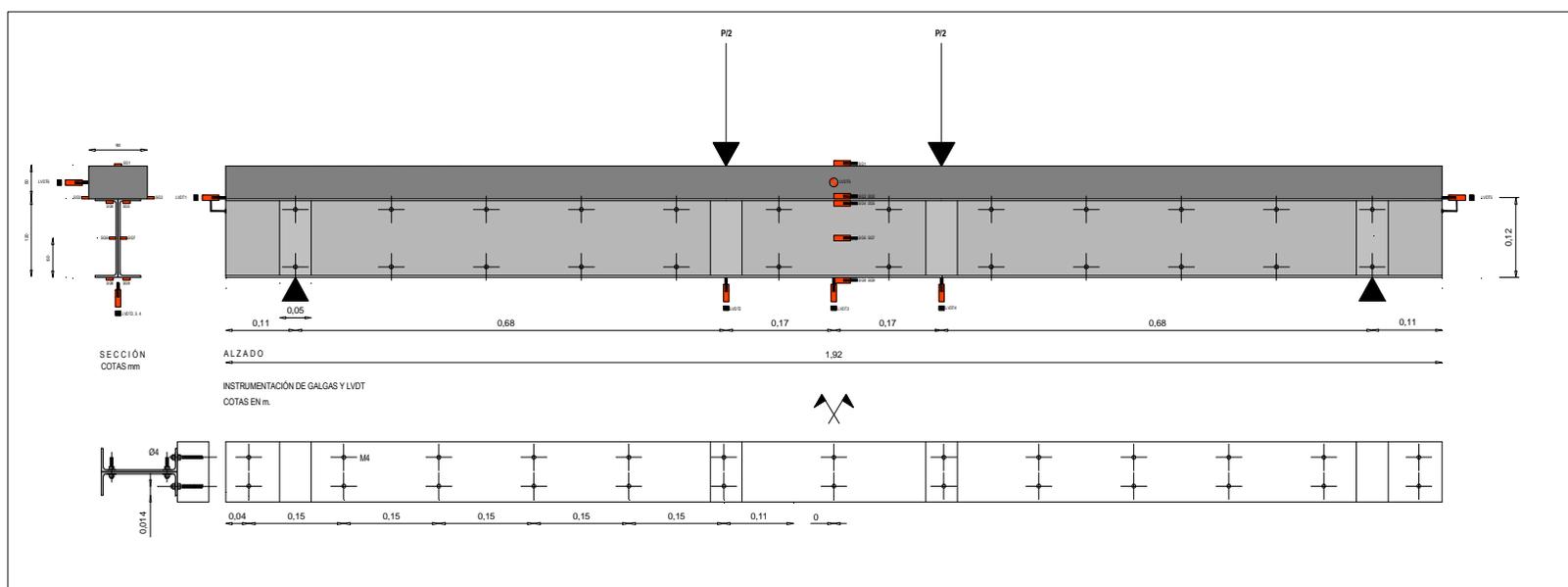


Figura 62: Sección del perfil tipo utilizado en la viga híbrida para el programa experimental. Ubicación de las galgas extensiométricas y LVDT. Cotas en mm.



CAPÍTULO V

ELABORACIÓN DE MATERIALES

CAPÍTULO V: ELABORACIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS E HIBRIDOS.

5.1.- HORMIGÓN DE ALTAS PRESTACIONES, HRF.

El proceso posee una estructura primaria, que no varía cuando se incorpora a la mezcla las fibras, por ello una estructura primaria es la matriz de hormigón y tres variantes en función de las cantidades de fibras metálicas utilizadas (30, 60 y 120 kg/m³).

Proceso estructura primaria es el siguiente (general para todos):

1.- Determinación de la humedad de los áridos:

Previamente al amasado de la mezcla, con el fin de evitar variaciones en los parámetros del hormigón debido al agua que aporta la arena se mantiene un estricto control sobre la humedad de la misma. Para ello se tomaba una muestra de arena de aproximadamente 500 gramos, que se pesaba y se introducía en estufa a 100 ± 5 °c por un período no inferior a 24h, y se determinaba la humedad. Este valor se utilizaba para corregir el agua de amasado.

2.- Cálculo del esqueleto granular:

La composición del esqueleto granular, tras realizar ensayos previos granulométricos de los áridos, ya que no se dispone de experiencia en el diseño de la composición, el orden de diseño utilizado se describe a continuación:

1.- Se calcula granulometría de los áridos. Tablas 27 y 28.

Tabla 27: Granulometría de la grava utilizada.

ENSAYOS GRANULOMÉTRICOS:		GRAVA 6/12				
MASA INICIAL SECA TOTAL (g):		2246,7				
MASA ÁRIDO LAVADO (g):		2233,3				
TAMIZ (mm)	R (g.)	PASA (g)	RETENIDO (%)	PASA (%)	R-A (%)	
63	-	2.233,30	-	100,00	-	
50	-	2.233,30	-	100,00	-	
31,5	-	2.233,30	-	100,00	-	
25	-	2.233,30	-	100,00	-	
20	-	2.233,30	-	100,00	-	
16	-	2.233,30	-	100,00	-	
14	20,50	2.212,80	0,92	99,08	0,92	
12,5	196,70	2.016,10	8,81	90,27	9,73	
10	987,40	1.028,70	44,21	46,06	53,94	
8	798,00	230,70	35,73	10,33	89,67	
6,3	220,30	10,40	9,86	0,47	99,53	
4	3,50	6,90	0,16	0,31	99,69	
2	-	6,90	-	0,31	99,69	
1	-	6,90	-	0,31	99,69	
0,5	-	6,90	-	0,31	99,69	
0,25	-	6,90	-	0,31	99,69	
0,125	-	6,90	-	0,31	99,69	
0,063	-	6,90	-	0,31	99,69	
PASA	6,90	-	0,90	-	100	
MÓDULO GRANULOMÉTRICO					6,88	
% FINOS					0,90	

Tabla 28: Granulometría de las arenas utilizadas.

ENSAYOS GRANULOMÉTRICOS: ARENA 0/4						ENSAYOS GRANULOMÉTRICOS: ARENA 0/2					
MASA INICIAL SECA TOTAL (g):		279,9				MASA INICIAL SECA TOTAL (g):		290,17			
MASA ÁRIDO LAVADO (g):		246,6				MASA ÁRIDO LAVADO (g):		235,9			
TAMIZ (mm)	R (g.)	PASA (g)	RETENIDO (%)	PASA (%)	R-A (%)	TAMIZ (mm)	R (g.)	PASA (g)	RETENIDO (%)	PASA (%)	R-A (%)
63	-	246,60	-	100,00	-	63	-	235,90	-	100,00	-
50	-	246,60	-	100,00	-	50	-	235,90	-	100,00	-
31,5	-	246,60	-	100,00	-	31,5	-	235,90	-	100,00	-
25	-	246,60	-	100,00	-	25	-	235,90	-	100,00	-
20	-	246,60	-	100,00	-	20	-	235,90	-	100,00	-
16	-	246,60	-	100,00	-	16	-	235,90	-	100,00	-
14	-	246,60	-	100,00	-	14	-	235,90	-	100,00	-
12,5	-	246,60	-	100,00	-	12,5	-	235,90	-	100,00	-
10	-	246,60	-	100,00	-	10	-	235,90	-	100,00	-
8	-	246,60	-	100,00	-	8	-	235,90	-	100,00	-
6,3	-	246,60	-	100,00	-	6,3	-	235,90	-	100,00	-
4	19,44	227,16	7,88	92,12	7,88	4	-	235,90	-	100,00	-
2	79,78	147,38	32,35	59,76	40,24	2	3,25	232,65	1,38	98,62	1,38
1	51,26	96,12	20,79	38,98	61,02	1	90,62	142,03	38,41	60,21	39,79
0,5	29,25	66,87	11,86	27,12	72,88	0,5	58,36	83,67	24,74	35,47	64,53
0,25	23,61	43,26	9,57	17,54	82,46	0,25	36,51	47,16	15,48	19,99	80,01
0,125	21,74	21,52	8,82	8,73	91,27	0,125	24,83	22,33	10,53	9,47	90,53
0,063	21,52	19,44	8,73	7,88	100,00	0,063	21,00	1,33	8,90	0,56	99,44
PASA	-	-	11,90	-	100	PASA	1,33	-	19,16	-	100
MÓDULO GRANULOMÉTRICO					3,56	MÓDULO GRANULOMÉTRICO					2,76
% FINOS					11,90	% FINOS					19,16

2.- Se introduce la variable cemento, con la cantidad de 500 Kg/m³.

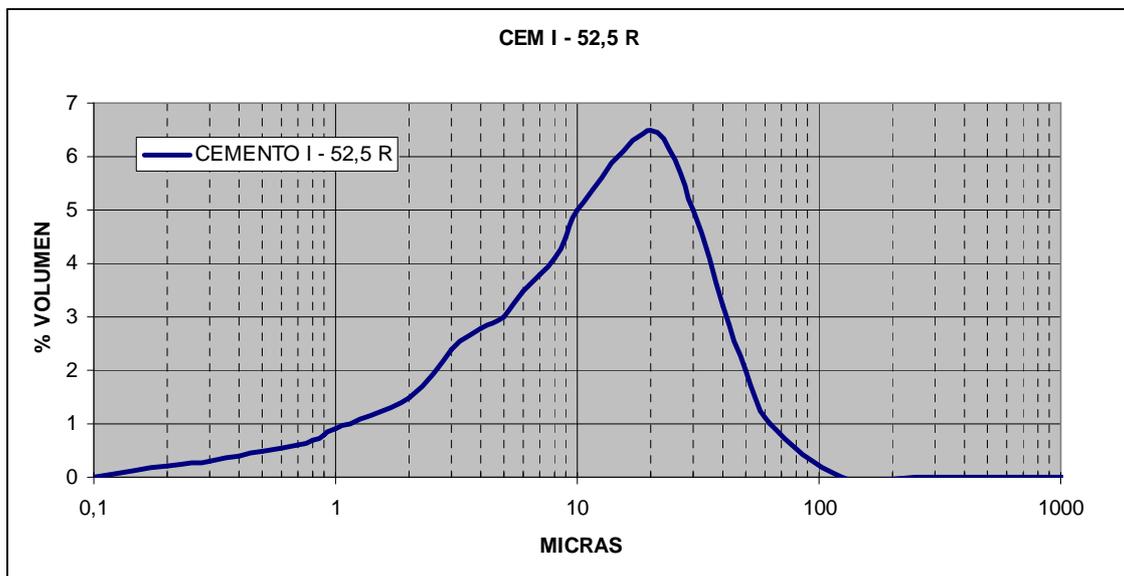


Figura 64: Distribución granulométrica del CEM I-52.5 R, utilizado en el programa experimental.

3.- No se utiliza filler ya que los áridos llevan incorporados gran cantidad de finos, la arena 0/4 el 11,90% y la 0/2 19,16 %, un total de 163,50 Kg/m³, que junto con los 500 kg del cemento, ascienden a 663,50 kg/m³ de finos que confieren una excelente trabajabilidad al hormigón.

4.- Una vez tenemos los materiales que componen el esqueleto granular, la composición resultante es el $\sum \% \text{ materiales} = 100$; ($\% \text{CEM} + \% \text{ Arena fina} + \% \text{ Arena gruesa} = 100$), y la máxima compactación para las arenas y grava, ajustándola a la parábola de Gessner $y=100x(d/D)^n$ siendo $n=0,5$; como se aprecia en la tabla 29.

Tabla 29: Cálculo del esqueleto granular de la matriz del HAC ensayadas.

ÁRIDO COMPUESTO						FULLER					
0/2_30,48%	0/4_30,48%	6/12_39,04%				0/2_30,48%	0/4_30,48%	6/12_39,04%			
TAMIZ (mm)	R (g.)	PASA (g)	RETENIDO (%)	PASA (%)	R-A (%)	TAMIZ (mm)	R (g.)	PASA (g)	RETENIDO (%)	PASA (%)	R-A (%)
63				100,00	-	63				100,00	-
50				100,00	-	50				100,00	-
31,5				100,00	-	31,5				100,00	-
25				100,00	-	25				100,00	-
20				100,00	-	20				100,00	-
16				100,00	-	16				100,00	-
14				99,64	0,36	14				100,00	-
12,5				96,20	3,80	12,5				100,00	-
10				78,94	21,06	10				91,29	8,71
8				64,99	35,01	8				81,65	18,35
6,3				61,14	38,86	6,3				72,46	27,54
4				58,68	41,32	4				57,74	42,26
2				48,40	51,60	2				40,82	59,18
1				30,35	69,65	1				28,87	71,13
0,5				19,20	80,80	0,5				20,41	79,59
0,25				11,56	88,44	0,25				14,43	85,57
0,125				5,67	94,33	0,125				10,21	89,79
0,063				2,70	97,30	0,063				7,25	92,75
PASA				9,82		PASA					
		MÓDULO GRANULOMÉTRICO			4,61			MÓDULO GRANULOMÉTRICO			4,46
		% FINOS			9,82			% FINOS			-

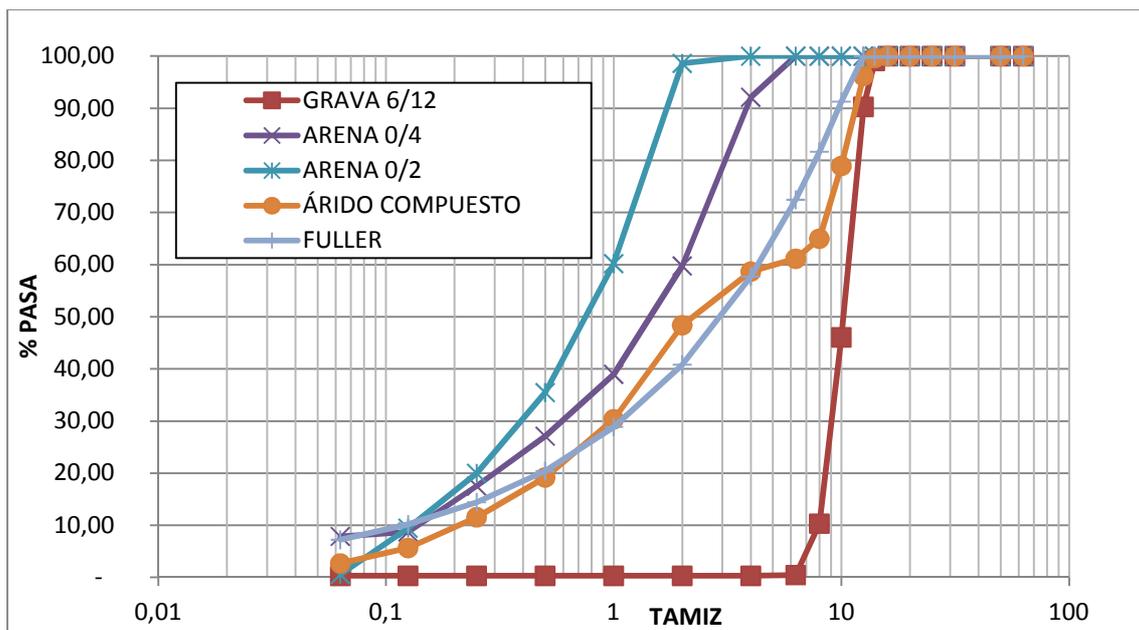


Figura 65: Composición granulométrica de la matriz del HAC ensayadas.

En la figura 65, se observa el diseño del esqueleto granular, del hormigón HAC+HAR+HRF utilizado. Se comprueba como la arena y grava aportan muchos finos, así como el porcentaje de finos que aporta junto con el cemento son altos.

3.- Cálculo de la cantidad de cemento: Es constante en cada amasada con el fin de obtener las mismas prestaciones mecánicas. El cemento no lleva ninguna adición ya que es del tipo I, y no se añaden adiciones en el amasado.

4.- Cálculo de la relación A/C y agua de amasado: Se establecen los valores siempre a la baja, para aumentar la capacidad mecánica y la durabilidad del hormigón, una vez fijada A/C teóricamente, ésta no puede tener ningún cambio, en función de la trabajabilidad y homogeneidad de la muestra, en el momento de su amasado. Al añadir las fibras y conforme se aumente su cantidad, se prevee una disminución de la trabajabilidad, no obstante no se realizará ningún cambio en la relación A/C.

5.- Aditivo superplastificante: En las mezclas que a medida lleven más cantidad de fibras de acero como son las de 60 y 120 Kg/m³, no se modificará la cantidad de aditivo, para no tener que modificar la matriz del hormigón. Aunque podría aumentarse, ya se ha calculado el aditivo en los ensayos previos, al límite del % del peso del cemento, para que la matriz no exude ni segregue.

6.- Fibras: Las fibras elegidas de la casa Bekaert, Dramix OL 13/0.16 y Dramix 80/30 en un 40% y 60 % respectivamente, se añaden a la amasada una vez han transcurrido 5 minutos de amasado de la matriz de hormigón.

7.- Amasado:

El equipo de amasado utilizado (fotografía 31) es la amasadora de eje vertical con capacidad para fabricar hasta 60 litros de hormigón.



Fotografía 31: Amasadora hormigón de eje vertical.

Las amasadas se realizan de 45 lt, la forma de verter los componentes en la amasadora es la siguiente: primero vertemos la grava, la arena, el cemento, en este orden de menor finura a mayor finura. Se amasa en seco 1 minuto dichos componentes, después se para la amasadora añadiendo el 50% del agua y se amasa 2 minutos. Después se añade el 50% de agua restante junto con todo el aditivo plastificante y amasándose durante 5 minutos. Posteriormente se procede al vertido de las fibras metálicas, amasándose 5 minutos más hasta apreciar la no formación de "erizos" y la homogeneidad de la muestra.

7.- Caracterizan del hormigón en estado fresco: una vez amasado el hormigón se procede a caracterizar su trabajabilidad con el ensayo del escurrimiento y medición del tiempo T_{50} . Fotografía 32.

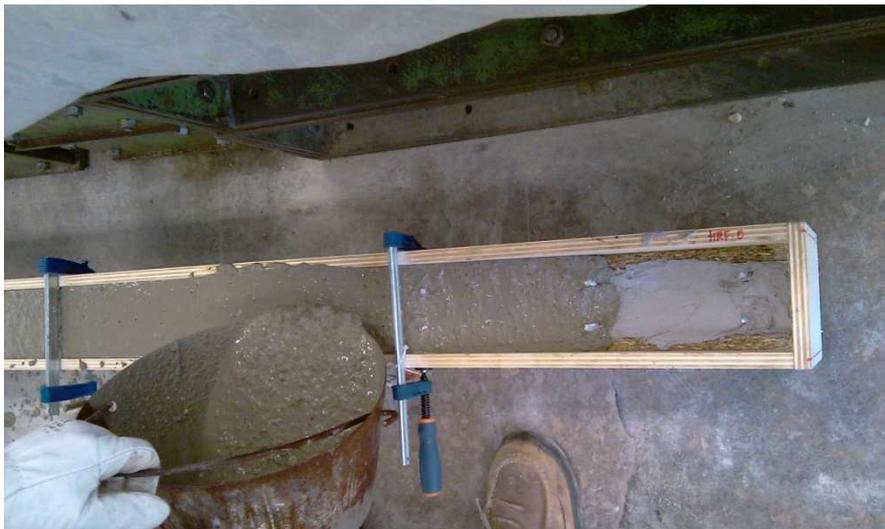


Fotografía 32: Medición del escurrimiento y el T_{50} del hormigón en los ensayos de laboratorio.

8.- Compactación, llenado de las vigas híbridas y las probetas: Seguidamente se procede a llenar los moldes de las probetas fotografía 35 y las vigas híbridas (fotografías 34). Previamente al hormigonado de las vigas se procede en la interfase ala superior de GFRP y capa de compresión de hormigón, a la colocación de la resina epoxi resistente a la humedad, aproximadamente unos 3 minutos antes de verter el hormigón, fotografía 33.



Fotografía 33: Colocación de la resina epoxi previa al hormigonado.



Fotografía 34: Hormigonado de las vigas híbridas.

El sistema de compactación es mediante vibrador de aguja, aunque no hay necesidad para la amasada patrón sin fibras y la amasada con 30 kg/m^3 . Si se hace necesaria la compactación en las amasadas con 60 y 120 kg/m^3 de fibras debido a la dificultad que se tiene en autocompactarse. El hormigón diseñado no suelen presentar propiedades autocompactantes, con cantidades 120 kg/m^3 de fibras, se decide utilizar este método de compactación, como ayuda adicional.



Fotografía 35: Llenado de probetas del HAC+HRF+HAR utilizadas en los ensayos de laboratorio.

9.- El curado: Después de enmoldar probetas y vigas híbridas, se cubren con una lámina de polietileno, una vez transcurridas 24 horas después del llenado, se desmolda y se introducen en la cámara de curado con una humedad ambiente del 95%, a $24 \text{ }^\circ\text{C}$ hasta los 28 días, para su posterior ensayo mecánico.



Fotografía 36: Cámara de curado utilizada a $24 \text{ }^\circ\text{C}$ y 95% HR.

5.2.- ELABORACIÓN DEL PERFIL DE GFRP.

Se fabrican un único tipo de material compuesto, se realizan los materiales de matriz de poliéster reforzados con fibras de vidrio (GFRP).

5.2.1.- Proceso de fabricación de probetas reforzadas de fibra:

Para la conformación de las piezas compuestas se toma como base un perfil pultrusionado de GFRP y se procede a su corte mediante una radial. Las dimensiones de las probetas son de 400x100x12 mm, siendo el espesor en función del número del perfil que se elija de los suministrados por Fibrotec, S.L.

5.2.2.- Proceso de fabricación de los perfiles de fibra de vidrio y resina de poliéster, GFRP:

El proceso se realiza mediante la técnica de pultrusión, los perfiles UPN-120.36.3, los perfiles han sido suministrados por la empresa “**Fibrotec, S.L.**”, las características y composición del perfil han sido los habituales, en cuanto el esquema de la composición y según el orden del núcleo hacia el exterior, se ha colocado, hilo de fibra de vidrio de tipo E, un mat de fibra de vidrio de 300 g/m³, velo y la resina de poliéster ortoftálico de impregnación aditivada con filler calizo, de color gris RAL 7038. Figuras 66, 67 y fotografía 37.

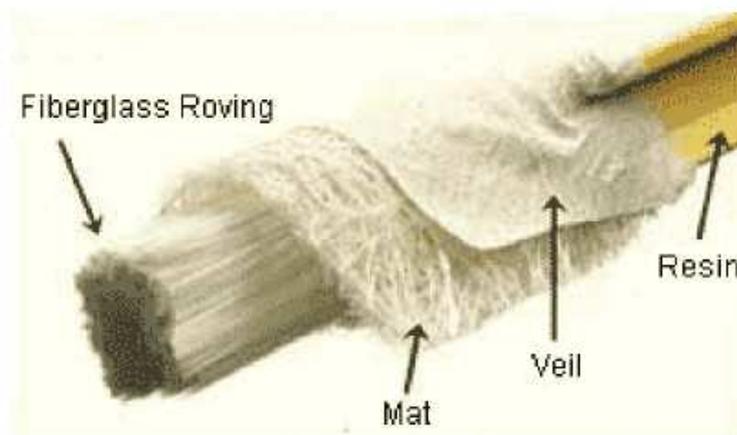


Figura 66: Tipología de los componentes utilizados para la fabricación del perfil UPN de GFRP.

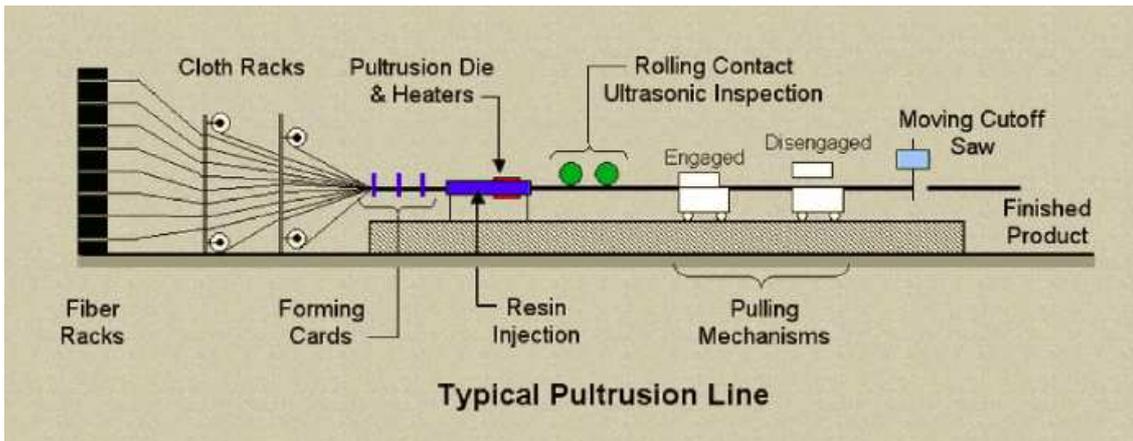
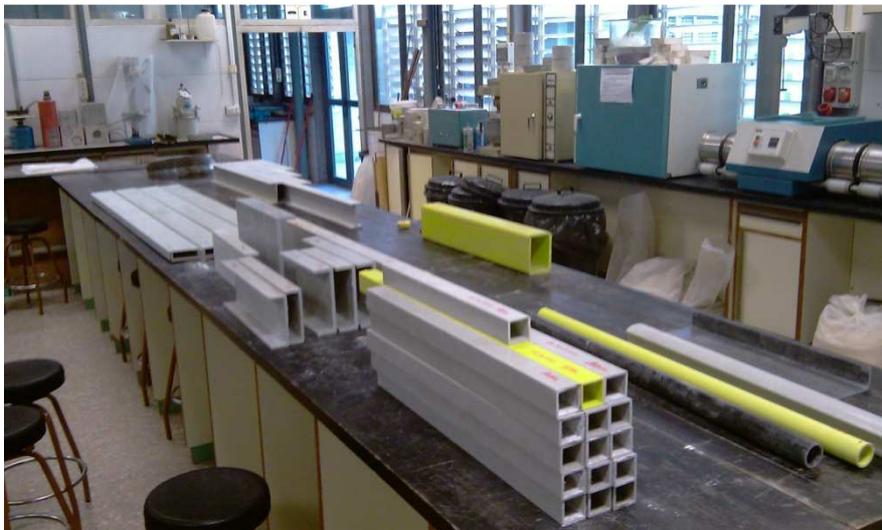


Figura 67: Esquema de una línea de pultrusión del perfil UPN de GFRP.



Fotografía 37: Tipología de perfiles de GFRP suministrados por Fibrotec, S.L.

5.3.-ELABORACIÓN DE LA VIGA HÍBRIDA: GRFP + HRF

Se realizan dos procesos, la confección del hormigón reforzado con fibras metálicas HRF, que ya ha sido descrito su elaboración anteriormente en el punto 5.1 y el montaje del perfil IPE-120 con los dos perfiles UPN-120, descrito a continuación.

Fabricación del perfil compuesto IPE-120:

Los pasos a seguir en el procedimiento de elaboración de los perfiles IPE-120 son los siguientes:

Fase 1: Limpieza, lijado e impregnación de las almas con resina de poliéster ortoftálico de los perfiles UPN-120, para conformar el perfil IPE-120, con el posterior curado a temperatura ambiente 24°C durante 24 h.

Fase 2: Perforaciones, colocación tornillería en ala y alma del perfil IPE-120.

Fase 3: Encofrado y capa de adherencia de resina epoxi en la interface ala/hormigón, para su posterior hormigonado.

Fase 4: Hormigonado vigas híbridas.

Fase 5: Desencofrado.

Fase 6: Curado del HRF de las vigas híbridas.

Fase 7: Instrumentación de las vigas híbridas.

La secuencia de elaboración de las vigas híbridas que se ha seguido en la fabricación por contacto a mano se describe en las siguientes etapas:

1. Preparación del IPE-120 (fase 1 y 2):

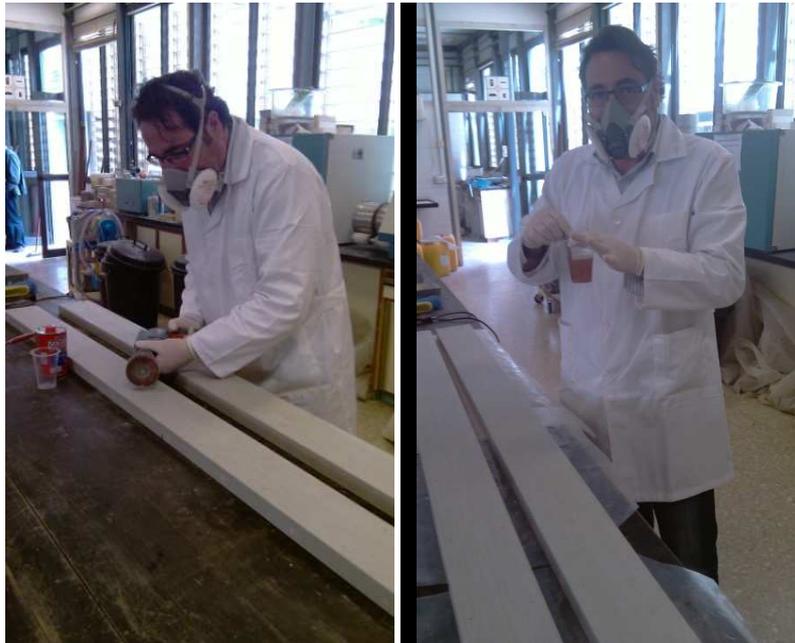
Los dos perfiles UPN-120 pultrusionados de GFRP, que serán unidos por el alma, son limpiados, para eliminar grasas, polvo y suciedad. Después se procede a el lijado de la cara interior de las almas, para abrir la malla de GFRP y se pueda adherir bien las dos almas. Después del lijado manual se procede a su limpieza con acetona y posterior secado.

A continuación se prepara la resina: Se vierte la resina, de poliéster insaturado ortoftálica, preacelerada y tixotrópica, necesaria para la elaboración del perfil, 100 g en un vaso de precipitados. Se añade un 3% de catalizador (Peróxido de metil-etil-cetona) y un 0.15% de acelerante (Octoato de cobalto), según especificaciones del fabricante.



Fotografía 38: Dosificación de la resina de poliéster ortoftálica.

Una vez realizada la incorporación del catalizador se procede a la mezcla de ambas partes de forma manual y durante 1 minuto, logrando una homogeneización adecuada, la mezcla pasa del color azul inicial y adquiere un color marrón que indica que la mezcla se ha realizado correctamente, como se aprecia en la fotografía 39 derecha. Al homogeneizar la mezcla, la resina de poliéster se aplica sobre la superficie del alma de los perfiles UPN-120. Ver fotografía 39 izquierda.



Fotografía 39: Lijado almas (izquierda) e impregnación con resina de poliéster del alma del perfil (derecha).

Inmediatamente se unen los dos UPN-120 y mediante presillas se quedan fijadas, ya que el tiempo abierto de utilización de la resina viene determinado por su tiempo de gelificación (15°C 38 minutos, 20°C 25 minutos y a 25°C 17 minutos). Durante el curado de la resina de poliéster, tenga lugar la reticulación y grado de entrecruzamiento de los monómeros de la resina termoestable, que es función del sistema catalítico utilizado y de la temperatura. Transcurridas 24 h la resina está curada a temperatura ambiente 24 °C, se sueltan las presillas, dando forma final al IPE-120. Ver fotografía 40.



Fotografía 40: Unión de UPN por el alma (izquierda) y colocación de tornillos M4 a modo de conectores (derecha).

Posteriormente se realizan taladros con broca de 4 mm, para posteriormente atornillar con tornillería pasante de 4mm, en el alma y el ala superior del perfil IPE-120. Consiguiendo la unión química y mecánica del alma del perfil IPE-120. La interfase del ala superior del IPE-120 con la cabeza de compresión de hormigón también se procederá a colocar la tornillería de acero galvanizado a modo de conectores, con el fin de garantizar que no tenga problemas de rasante. Ver fotografía 41. Se colocarán rigidizadores UPN 50.25.4 GFRP en los puntos de apoyo y carga, con el fin de evitar alabeos o aplastamientos durante el ensayo de rotura a flexión en cuatro puntos.



Fotografía 41: Perfil IPE-120 con conectores en el ala y alma (izquierda) y colocación de encofrado (derecha).

2. Preparación del encofrado y hormigonado de la viga híbrida (fase 3 y 4):

Se procede al encofrado de las vigas con una combinación de presillas y tableros de aglomerado de partículas de madera y contrachapado de pino de 15 mm de espesor, aplicándoles acetite natural como desencofrante, previo al hormigonado. Se procederá a la colocación en la interfase GFRP / hormigón de una resina epoxi resistente a la humedad (SikadurR-31 CF) 3 minutos antes de hormigonar. Fotografía 42.



Fotografía 42: Encofrado capa compresión y resina epoxi interfase ala/HRF (izquierda) y hormigonado viga híbrida (derecha).

3. Desencofrado y curado de la viga híbrida (fase 5 y 6):

Tras el hormigonado se cubren las vigas con un film de polietileno, transcurridas 24 h se desmolda la viga y se introducen en la cámara húmeda de curado a 24°C y una HR 100% hasta los 28 días de edad del hormigón.



Fotografía 43: Vigas híbridas tras desencofrarlas.



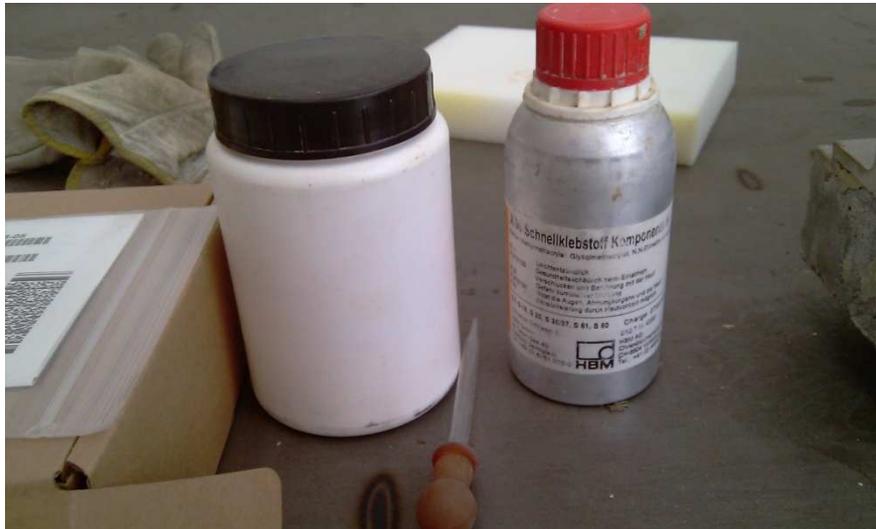
Fotografía 44: Cámara de curado utilizada a 24 °C y 100% HR.

4. Instrumentación de las vigas híbridas (fase 7):

Para instrumentar las vigas se colocaran galgas extensiométricas en las posiciones programadas, véase la figuras 62 y 63 del capítulo IV, 4.3 del programa experimental hojas 91 y 92.

Las galgas extensiométricas de la marca comercial **HBM, Tipo 50/120 LY41-3L-0.5M**, con una resistencia de $120\Omega \pm 0.35\%$, con un factor $K=2.09 \pm 1.0\%$ y con una sensibilidad transversal de -0.2% . Estas galgas se adhieren tanto al hormigón como al GFRP con resinas y catalizadores específicos de la casa HBM en las proporciones de un medidor

de cazo enrasado de resina en polvo y cinco gotas de catalizador líquido, se remueve durante 30 segundos y listo para su utilizarlo. Previamente la superficie de base estará limpia de grasas, polvo y suciedad, se lijará y se aplicará un disolvente como la acetona. Fotografías 45 y 46.



Fotografía 45: Resina y catalizador para el pegado de galgas extensiométricas.



Fotografía 46: Ficha técnica de galgas extensiométricas en las vigas híbridas.

La disposición de las galgas extensiométricas para la medición de deformaciones en el ala inferior, alma y ala superior del perfil pultrusionado de GFRP, y la capa de compresión del hormigón de altas prestaciones HRF; tal y como se aprecia en la fotografía 47.



Fotografía 47: Colocación de galgas extensiométricas en las vigas híbridas.

Se procederá al montaje de los captadores de deformación LVDT en el ala inferior para la medición de la flecha de la viga, se dispondrá un LVDT en la capa de compresión en centro de luz perpendicular a la viga para la medición de la deformación en el caso que exista un pandeo lateral del perfil en la zona comprimida y por último se instrumenta otro LVDT en la interfase capa de compresión con el perfil de GFRP, para la monitorización en su caso del esfuerzo rasante entre hormigón y GFRP. Fotografía 48.



Fotografía 48: Colocación de los captadores de deformación en las vigas híbridas.

Se procederá al montaje del pórtico para su ensayo mecánico a rotura a flexión en cuatro puntos, se procederá a mantener la carga bajo una deformación constante de

0.2 mm/minuto. El cálculo numérico ha establecido que se necesitará una carga de 80 KN.

Véase el esquema del cálculo numérico, tabla 30, en campo elástico, se realiza solo en campo elástico ya que estos materiales en el caso GFRP son materiales elásticos lineales con rotura frágil en cuanto a este tipo de hormigón de altas prestaciones, la tendencia es roturas dúctiles a tracción, a compresión tienen una menor fragilidad debido a las altas resistencias mecánicas alrededor de 80 MPa, tal y como se analiza en el capítulo VI caracterización de ambos materiales. La combinación de ambos materiales se evaluará en el capítulo VII, análisis y resultados de las vigas híbridas.

Tabla 30: Cálculo mecánico de una viga híbrida con HA-80_120Kg fibra

HRF-80_120 kg fibra	Hormigón	ala sup GFRP	alma GFRP	ala inf GFRP
Tension material_MPa	50	420	420	420
E_MPa	35000	32716	32716	32716
A_mm2	5000	210	684	210
E*A	175000000	6870360	22377744	6870360
dist. C.d.g. / Ala inferior GFRP_mm	145	118,5	60	1,5
D=ΣE*A	211118464			
E.N._mm	130,46	desde el ala inferior de GRFP		
E.N._mm	39,54	desde la cabeza de compresion		
Deformación real unitaria en c.d.g	0,0035	0,0012	0,0078	0,0118
Tension_MPa (en el c.d.g)	50	38,55	254,53	386,25
Fuerza_N (en el c.d.g.)	200000	8094,47	174098,81	81113,22
dist. al E.N._mm (desde el c.d.g.)	15,82	11,96	84,97	128,96
Mu N*mm	28513885,58			
Mu KN*m	28,51			
F_KN	41,93			
2F_KN	83,86	KN		
E*I_MPa	3,60E+11			
Flecha solo del momento_mm	22,51		$\delta_{bend} = Pa(3L^2 - 4a^2)/(24EI)$	

CAPÍTULO VI

CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES

CAPÍTULO VI: CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS E HÍBRIDOS.

En el presente capítulo se presentan los datos resultantes de la caracterización de los materiales que componen la viga híbrida por separado, el hormigón de alta resistencia reforzado con fibra metálica con propiedades de autocompactabilidad y los perfiles de GFRP.

6.1.-HORMIGÓN DE ALTAS PRESTACIONES, HRF.

En la tabla 31, se muestran las capacidades mecánicas del hormigón reforzado con fibras metálicas con 0, 30,60 y 120 Kg/m³. En cuanto a los resultados de compresión axial tanto en probeta cúbica de 10x10 cm como la cilíndrica de 15x30 cm, a medida que aumentamos la cantidad de fibra metálica la resistencia a compresión es mayor. La mejora mecánica con respecto al hormigón patrón sin fibras metálicas aumenta en 10 MPa es decir en un 12.18% con el mayor valor de fibras. El módulo de deformación longitudinal aumenta cuanto hay fibras respecto a la patrón pero queda estabilizado con independencia de la cantidad de fibras incorporadas a la dosificación.

Tabla 31: Propiedades mecánicas del HRF-80 /0/30/60/120 Kg/m³.

MPa	HRF_0	HRF_30	HRF_60	HRF_120
F_c cilíndrica	73,77	77,65	79,69	82,76
F_c cúbica	89,35	87,11	95,17	102,55
E_c	37070	39177	39195	39104
F_{c,flex}	5,40	10,00	11,45	16,49
F_{c,flex} Matriz	5,40	6,36	6,36	8,00
F_{I,COMD} 0,05	5,40	6,36	6,36	8,00
F_{c,flex} F1 COMD 0,5 mm	1,60	8,00	9,90	16,00
F_{c,flex} F2 COMD 1,5mm	1,50	9,90	11,38	16,00
F_{c,flex} F3 COMD 2,5 mm	0,50	9,50	10,50	15,03
F_{c,flex} F4 COMD 3,5 mm	0,00	9,00	9,50	13,50
T50 _segundos	3	5,67	*	*
slump-flow _mm	700	717	*	*

* rigidiza la masa rápidamente, no es viable realizar la torta, debido a las altas temperaturas en el laboratorio.

La trabajabilidad, requisito indispensable para verter el hormigón en el elemento constructivo, ha sido evaluada mediante el ensayo de escurrimiento "slump flow" y se ha medido el tiempo que transcurre en superar los 500 mm de diámetro T_{50} , las amasadas patrón y con 30 kg/m^3 , poseen un valor bueno con escurrimientos de 700 mm, según se aprecia en la tabla 31, para las amasadas con 60 y 120 kg/m^3 , presentaron una rigidez prematura de la masa debido fundamentalmente a la gran cantidad de cemento utilizada (500 kg/m^3) y la elevada temperatura del laboratorio $32 \text{ }^\circ\text{C}$, los ensayos quedaron invalidados. La "torta" tal y como se aprecia en la fotografía 49, en ningún momento presento exudación o segregación, de la masa.



Fotografía 49: Propiedades del hormigón en estado fresco, ensayo del escurrimiento y T_{50} .



Fotografía 50: Serie de probetas para realizar ensayos de compresión a 28 días.

En la figura 68, se aprecia la evolución de los distintos hormigones reforzados con fibras metálicas HRF en función de las cantidades de fibras, a medida que aumentamos la cantidad de estas, el parámetro de resistencia a compresión aumenta en un 12 %, sin embargo la capacidad de deformación que alcanzan estos hormigones con cantidades de fibras de 60 y 120 Kg/m³ se duplican con respecto al hormigón patrón (sin fibras), esto es debido a la capacidad de confinamiento que tienen las fibras proporcionando una rotura dúctil. En el cálculo estructural para elementos sometidos a flexión la mejora es importante ya que podemos mejorar el comportamiento mecánico de la sección estructural, el eje neutro bajaría en la sección y la sección de hormigón comprimida crece, aprovechando mejor la sección.

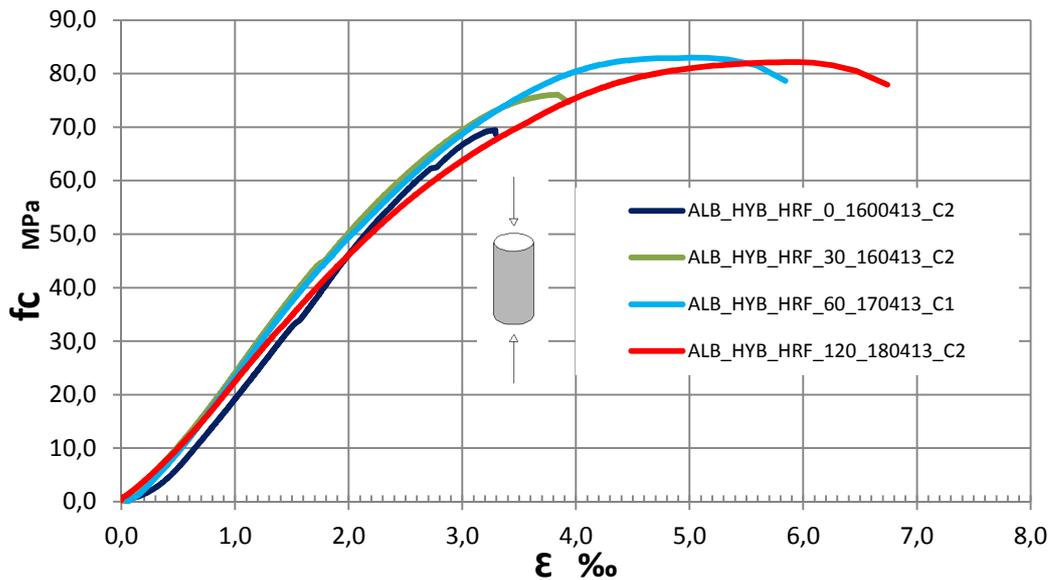


Figura 68: Grafico tensión deformación en compresión de los distintos HRF a 28 días.



Fotografía 51: Probeta de HRF-80/30kg/m³ tras la rotura a compresión a 28 días.

La rotura de las probetas no presenta defectos, la típica rotura en “reloj de arena” no aparece ya que las fibras evitan su formación, como se aprecia en la fotografía 51.

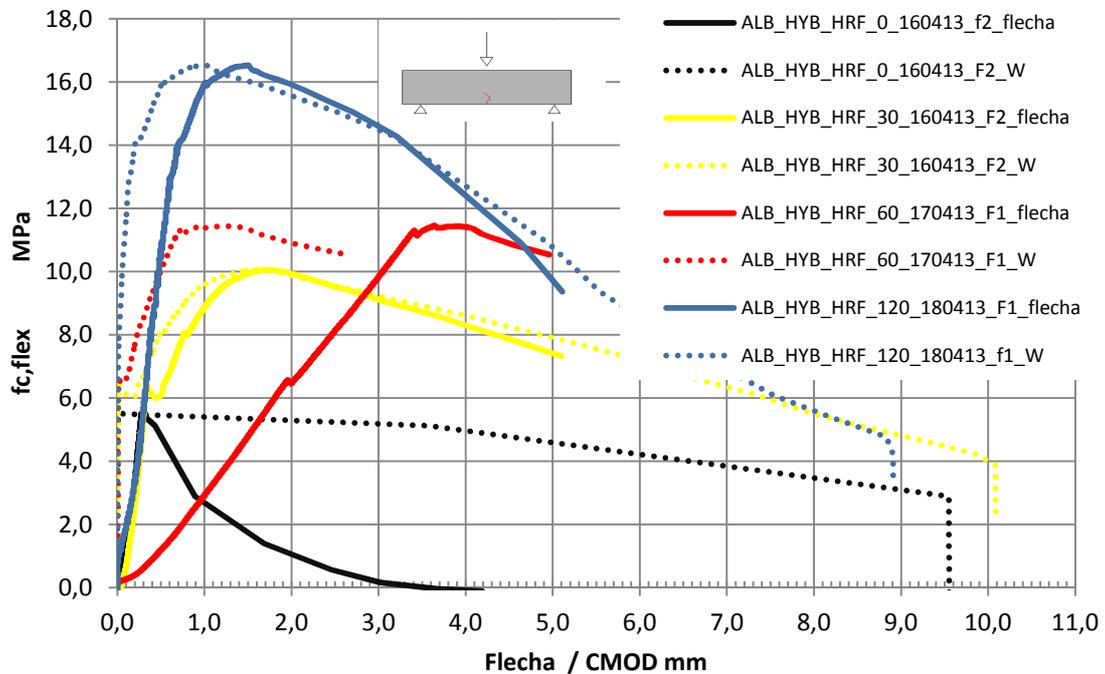


Figura 69: Gráfico tensión deformación de los HRF tras la rotura a flexión en tres puntos a 28 días.

Del ensayo de rotura en flexión de tres puntos, se observa en la figura 69, como el incremento de las capacidades mecánicas a flexión son triplicadas del hormigón patrón sin fibras (HRF_0) 5.40 MPa a el hormigón con 120 kg/m3 de fibras (HRF_120) con 16.49 MPa. La pendiente del material HRF_60 (curva roja) esta respuesta distinta al resto no es correcta ya que la pendiente es la misma hasta fisuración del hormigón, es un fallo de medición del LVDT, se vuelve a ensayar y se verifican los datos de la tabla 31, para el HRF_60.

Habría que seguir estudiando las dosificaciones entre 30 y 60 Kg/m3 de fibras (HRF_30 y HRF_60) ya que no existe una mejoría mecánica a flexión importante de HRF_30 a HRF_60, que justifique el doble de precio en la dosificación con 60 Kg/m3 de fibras de acero. Aunque cabe recordar que en compresión si hay una mejoría que pudiera justificarlo, no solo sus 10 MPa más sino la posibilidad de duplicar su deformación en rotura.

Tal y como se aprecia en la fotografía 52, nos encontramos una muestra de las probetas de HRF, están situadas de tal forma que de izquierda a derecha hay un aumento en las cantidades de fibras en las probetas, empezando por la patrón que

no lleva fibras hasta las dos últimas imágenes de la derecha que pertenecen a dos probetas realizadas con un hormigón reforzado con fibras metálicas.



Fotografía 52: Probetas de los HRF tras la rotura a flexión en tres puntos a 28 días.

Se aprecia a medida que se aumenta la cantidad de fibras como la sección de rotura no es regular es debido al arrancamiento de las fibras. A medida que la cantidad de fibra es mínima el estado de la sección tras la rotura es más limpio y se aprecia como los áridos están partidos, indicando que la interface árido pasta es muy buena y la matriz es resistente.

6.2.-POLÍMERO REFORZADO CON FIBRA DE VIDRIO, GFRP.

Las características de las secciones de los laminados de fibra de vidrio con resina de poliéster ortoftálica, que conforman de los UPN, que se han sido suministradas por la empresa Fibrotec, S.L. son los siguientes de la tabla 32:

Tabla 32: Propiedades mecánicas de los laminados de GFRP, datos Fibrotec, S.L.

Propiedad	Siglas	MPa	NORMAS
Módulo de elasticidad	E 0°	23.000/30.000	EN 527-4
Módulo de elasticidad	E 90°	8.500	EN 527-4
Módulo de Cortante	G	3.000	ASTM D2344-84
Módulo de Poisson	ν0°, 90°	0,23	
Módulo de Poisson	ν0°, 90°	0,09	
Resistencia a Flexión, 0°		240	EN ISO 14125
Resistencia a Flexión, 90°		100	EN ISO 14125
Resistencia a Tracción, 0°		240	EN 527-4
Resistencia a Tracción,90°		50	EN 527-4
Resistencia a Compresión, 0°		240	EN ISO 14126
Resistencia a Compresión, 90°		70	EN ISO 14126
Resistencia a Cortante		25	ASTM D2344-84
Pin-bearing Strength, axial		150	EN 13706-2:2002
Pin-bearing Strength, transversal		70	EN 13706-2:2002

Se ha procedido a ensayar a tracción unas piezas de sección rectangular (150·160 mm²) para comprobar su límite elástico y su límite de rotura, así como su módulo de elasticidad, y con ello corroborar las características fundamentales de los laminados compuestos.

Se puede apreciar en el gráfico 3, que la tensión de rotura de los laminados de GFRP, es de 417.31 MPa, coincide su límite elástico con el de rotura, la capacidad de reserva del material desde su fluencia hasta la rotura es inexistente, aspecto inadecuado para materiales dúctiles. El campo de deformación plástica es prácticamente nulo confirmando pues que el material es frágil. Su módulo de elasticidad 30 GPa es relativamente bajo frente a las barras de acero B500 SD 200 GPa o al S235JR con 210 GPa. Dado que la viga híbrida se le dota de una mayor inercia con la cabeza de compresión, el módulo de elasticidad del conjunto será mayor como se comprueba tras su caracterización en el capítulo VII.

El comportamiento dúctil de un acero B500 SD, como se aprecia en la figura 70, con una deformación bajo carga máxima del 10 %, frente al 5.5 % del laminado de GFRP y la gran capacidad de deformación en campo plástico del B500SD, siendo nula en el laminado de GFRP.

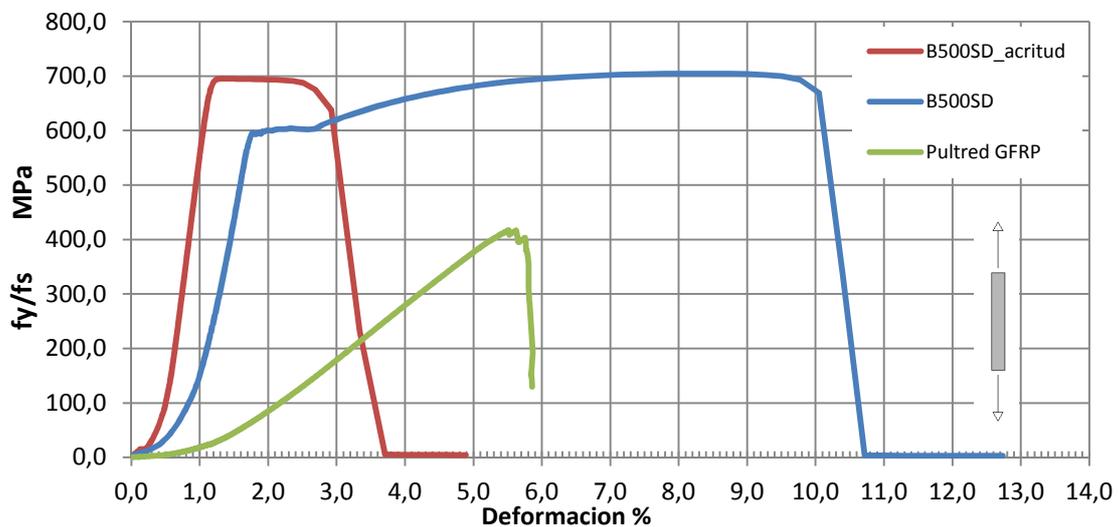


Figura 70: Propiedades mecánicas en tracción de los laminados de GFRP, ensayados y aceros.

Se observa incluso un mejor comportamiento dúctil del acero B500SD endurecido tras un proceso de acritud, que el laminado de GFRP. La rigidez del polímero es mucho menor que la de los aceros como se aprecia en la pendiente. Figura 70.

CAPÍTULO VII

ANÁLISIS Y RESULTADOS DE LAS VIGAS HÍBRIDAS

CAPÍTULO VII: ANÁLISIS Y RESULTADOS DE LAS VIGAS HÍBRIDAS.

7.1.- ENSAYOS Y ANÁLISIS DE LA VIGAS HÍBRIDAS

Se presentan los ensayos y resultados de las distintas vigas híbridas de GFRP y HRF, en primer lugar se analizan de menor a mayor cantidad de fibras incorporadas al hormigón.

7.1.1.- ALB_HYB_HRF_0_viga_050713, viga híbrida patrón en la cual el hormigón de la capa de compresión no posee cantidad alguna de fibras metálicas. En la fotografía 53 se observa la instrumentación y el pórtico para la rotura a flexión en cuatro puntos de la viga. La velocidad de carga es aplicada bajo deformación constante 0.2 mm/m.



Fotografía 53: Viga híbrida ALB_HYB_HRF_0 patrón, ensayo a flexión en 4 puntos.

En la figura 71, se muestran las deformaciones medidas con las galgas extensiométricas, el eje neutro calculado a 39.54 mm desde el extremo de la cabeza de compresión, dictamina que las galgas extensiométricas número 3, 4 y 5, van a estar traccionadas y que la galga extensiométrica nº 1 estará en compresión. La posición del eje neutro no varía hasta una carga de unos 93 KN, poco antes de la rotura, como se aprecia en la galga extensiométrica nº 2, ubicada en la zona del eje neutro; si bien a los 40 KN empieza a estar traccionada (sube el eje neutro) y a los 93 KN pasa a estar comprimida a partir de los 93 KN de carga (baja un poco el E.N.) hasta la rotura (99.60 KN).

La galga nº 1 comprimida, ubicada en la cabeza de compresión tiene una deformación unitaria en rotura del 0,00274 es decir del 2.74 ‰. La máxima deformación unitaria de tracción que experimenta el ala inferior de GFRP pultrusionada es de 0.0076, es decir el 7.6 ‰.

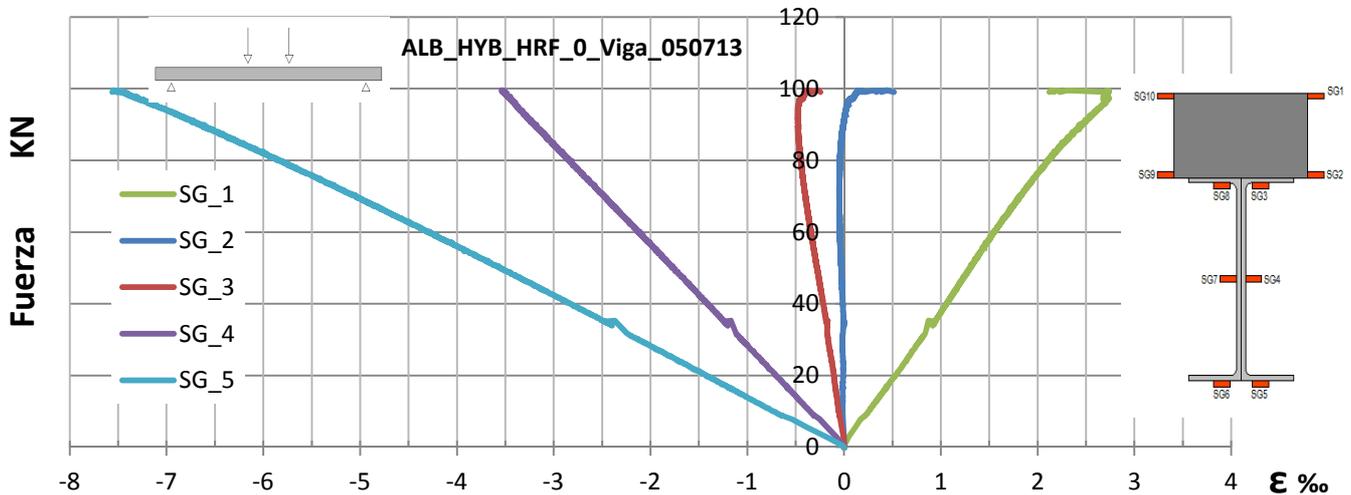


Figura 71: Gráfico Fuerza/deformación (galgas) de la viga híbrida ALB_HYB_HRF_0 patrón, en centro de luz.

La figura 73, muestra el gráfico presenta la fuerza en relación a la flecha en los captadores de deformación (figura 2) LVDT nº 2, 3 y 4; los captadores de deformación LVDT nº 1 y 5 están midiendo el posible esfuerzo rasante en los extremos de la viga híbrida, en la interfase hormigón y GFRP; el LVDT nº 6 está midiendo un posible pandeo lateral producido por el esfuerzo de compresión en la capa de compresión de hormigón que no sucede en este caso. La ubicación de los captadores es la misma para todos los ensayos a flexión en las vigas híbridas, tal y como se muestra en la figura 72.

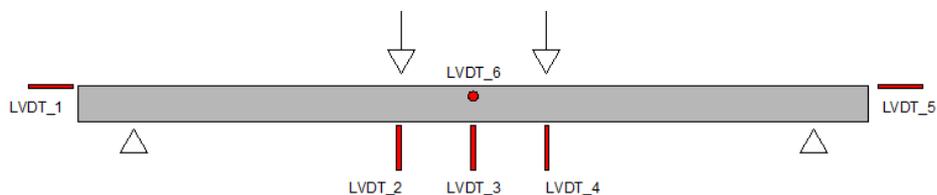


Figura 72: Situación de los LVDT, en las vigas híbridas.

La medición de los LVDT nº 1 y 5 no indican un esfuerzo rasante entre hormigón y GFRP, están midiendo la deformación producida en el giro de la viga.

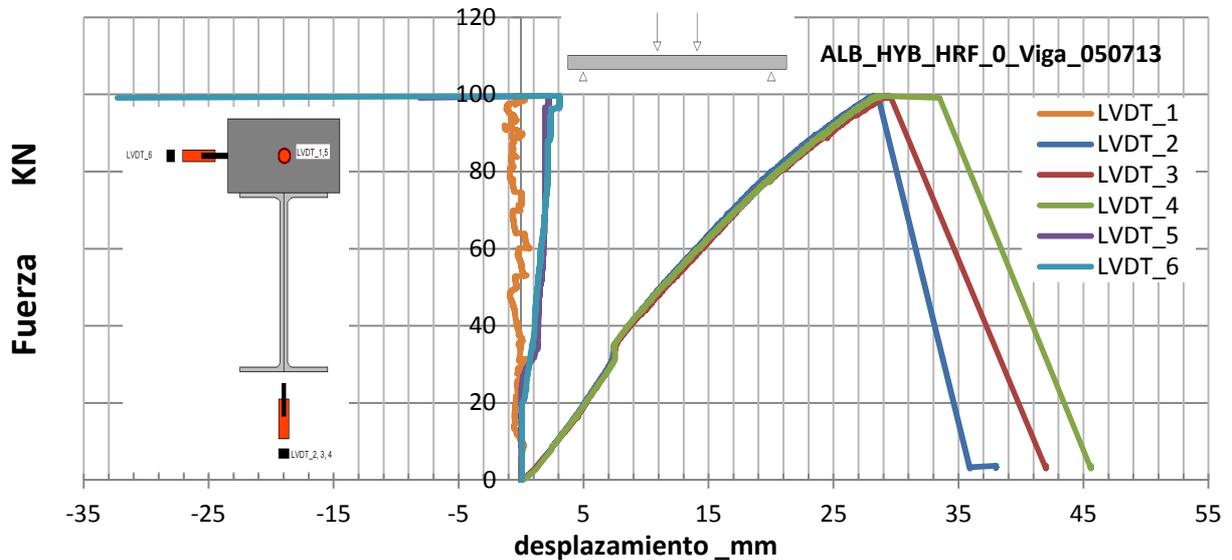


Figura 73: Gráfico Fuerza/desplazamiento (LVDT) de la viga híbrida ALB_HYB_HRF_0 patrón, en centro de luz.

La rotura se produce tras alcanzar la carga de 99.60 KN; hace que se agote la capa de compresión de hormigón en la zona entre los apoyos de las cargas, este estallido instantáneo produce una rotura frágil del hormigón y en consecuencia de la viga híbrida, ver fotografía 54. Hay una importante flecha de 29.60 mm producida antes de la rotura. No hay problema en la interfase hormigón GFRP, ya que el hormigón ha quedado adherido al perfil, los conectores no se han roto. También se observa cómo tras el fallo hay un pandeo del alma del perfil de GFRP.



Fotografía 54: Rotura a flexión 4 puntos de la viga híbrida ALB_HYB_HRF_0 patrón.

7.1.2.- ALB_HYB_HRF_30_viga_090713, es la viga híbrida formada en su capa de compresión por un hormigón reforzado con 30 Kg/m³ de fibras metálicas. En la fotografía 55, se observa la instrumentación y el pórtico para la rotura de la viga. La velocidad de carga es bajo deformación constante 0.2 mm/m, en todos los ensayos.



Fotografía 55: Viga híbrida ALB_HYB_HRF_30, ensayo a flexión en 4 puntos.

La carga máxima alcanzada 65.97 KN es inferior a la viga patrón que alcanzó los 99.60 KN; se esperaba que superara la respuesta mecánica de la viga patrón; no ha sido así. La causa del fallo ha sido la rotura de la interfase entre el polímero GFRP y el hormigón de altas prestaciones, la aplicación de la carga en el extremo derecho ha producido un esfuerzo cortante en el hormigón que ha derivado en un esfuerzo rasante en la interfase. De las tres zonas existentes en la interfase (figura 74), el fallo está localizado en la interfase resina/hormigón; la adherencia entre el ala del perfil de GFRP y la resina epoxi es buena; como se aprecia en la fotografía 56.

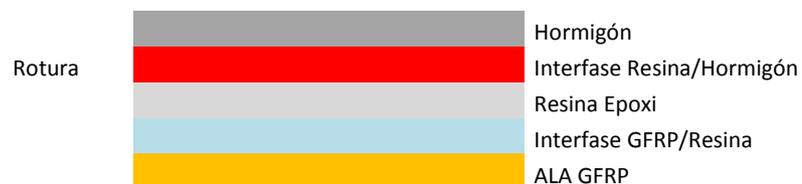


Figura 74: Esquema interfase GFRP/ Hormigón.



Fotografía 56: Interfase más débil resina epoxi/hormigón.

Sería conveniente realizar en futuras investigaciones un análisis mediante microscopía electrónica para conocer las características del enlace y compararlo con una muestra de la viga patrón, donde este problema ha sucedido por otro motivo y a mayor carga. Desde el punto de vista macroscópico, es la mejor resina que se ha podido utilizar y que otros investigadores como Almir Barros [6], ya la han utilizado con éxito frente a otros productos. Ver fotografía 57.



Fotografía 57: Ensayos de tracción con la resina epoxi utilizada en este trabajo y por el investigador Almir Barros [6].

En la figura 75, se muestran las deformaciones medidas con las galgas extensiométricas, número 4 y 5, van a estar traccionadas y que las galgas extensiométricas nº 1 y 2 están en compresión. La posición del eje neutro no varía hasta una carga de unos 50 KN, como se aprecia en la galga extensiométrica nº 3, ubicada en la zona del eje neutro; si bien a los 50 KN empieza a estar comprimida (baja el eje neutro), en este momento el esfuerzo rasante inicia el fallo por adherencia, como se observa con un cambio de pendiente en el gráfico fuerza/flecha (figura 76), y rama de descenso donde recupera la capacidad de carga (rama ascendente) debido al refuerzo de los conectores utilizados entre GFRP y hormigón.

La galga nº 1 comprimida ubicada en la cabeza de compresión de HRF tiene una deformación unitaria en rotura del 0,00225 es decir del 2.25 ‰. La máxima deformación unitaria de tracción que experimenta el ala inferior de GFRP pultrusionada es de 0.0065, es decir el 6.5 ‰, inferior al máximo del 50 ‰, según caracterización del material.

La galga nº 2, en el instante el rasante es más acuciado pasa a estar comprimida, significa que el ala del perfil de GFRP pasa de estar trabajando a tracción a estar comprimido siendo la deformación alcanzada elevada del 6 ‰. La galga nº 2 se tracciona al estar desolidarizado el hormigón del perfil por fallo de adherencia.

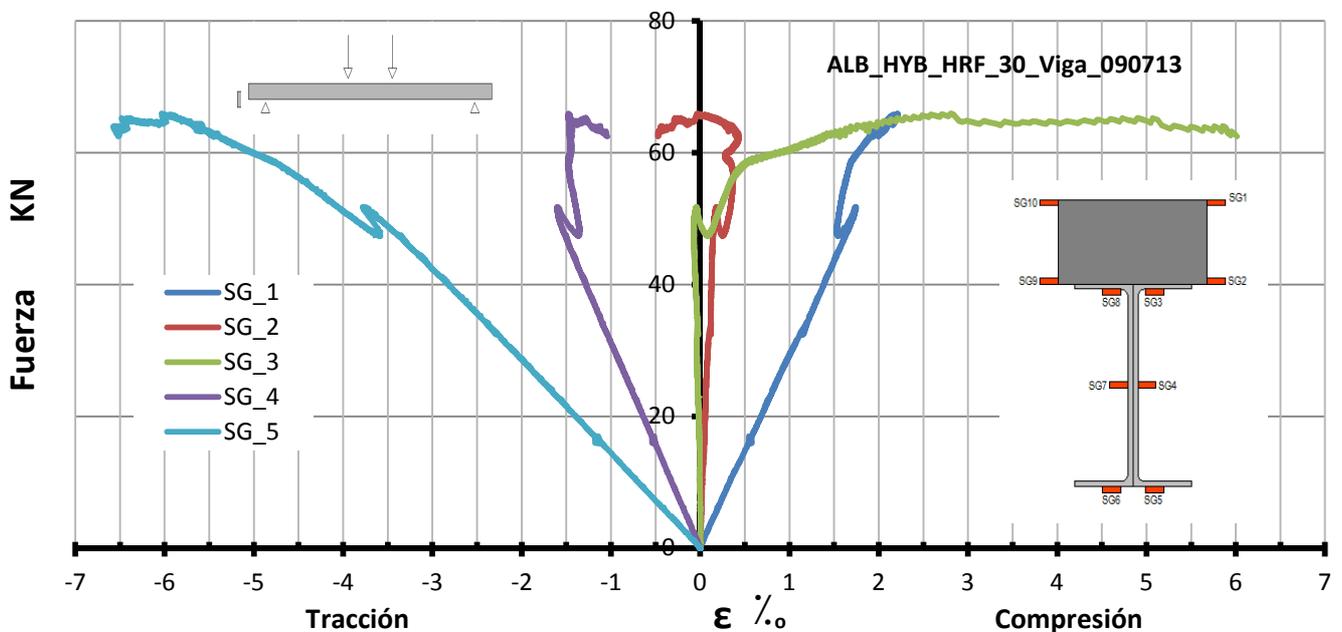


Figura 75: Gráfico Fuerza/deformación (galgas) de la viga híbrida ALB_HYB_HRF_30, en centro de luz.

La figura 76, donde se presenta la gráfica fuerza en relación a la flecha con los captadores de deformación LVDT nº 2, 3 y 4; con los captadores de deformación LVDT nº 1 y 5 están midiendo el movimiento producido por el giro de la viga. El esfuerzo rasante en los extremos de la viga híbrida, en la interfase hormigón y GFRP, no se aprecia en la medición del LVDT nº 1 y 5. El LVDT nº 6 está midiendo un posible pandeo lateral producido por el esfuerzo de compresión en la capa de compresión del hormigón.

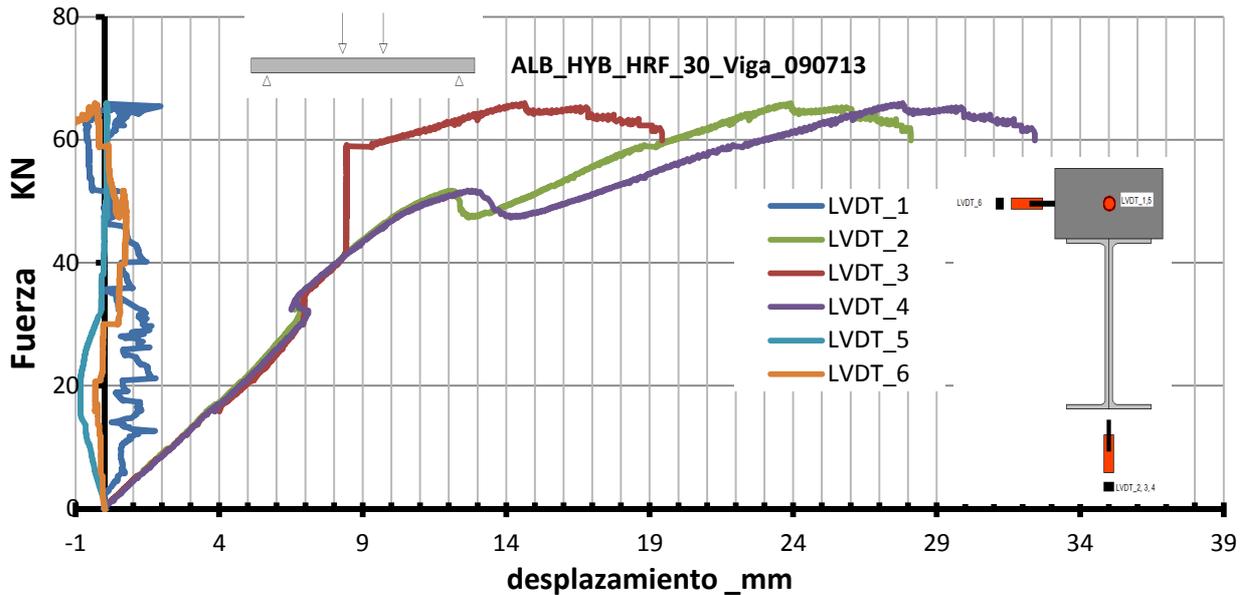


Figura 76: Gráfico Fuerza/desplazamiento (LVDT) de la viga híbrida ALB_HYB_HRF_30, en centro de luz.

En la fotografía 58, se aprecia como el fallo por adherencia de la resina epoxi y el hormigón es coartado por los conectores, no progresando la separación de la capa de compresión de hormigón y el perfil de GFRP; ver fotografía 58.



Fotografía 58: Rotura a rasante en el ensayo a flexión 4 puntos de la viga híbrida ALB_HYB_HRF_30.

7.1.3.- ALB_HYB_HRF_60_viga_090713, es la viga híbrida patrón con la capa de compresión con 60 Kg/m^3 de fibras metálicas. En la fotografía 59, se observa la instrumentación y el pórtico para la rotura de la viga. La velocidad de carga es bajo deformación constante 0.2 mm/m .



Fotografía 59: Viga híbrida ALB_HYB_HRF_60, ensayo a flexión en 4 puntos.

En la figura 77, se muestran las deformaciones medidas con las galgas extensiométricas número 2, 3, 4 y 5, van a estar traccionadas y que la galga extensiométrica nº 1 estará en compresión. La posición del eje neutro no varía hasta la rotura producida a 77.30 KN , tal y como se parecía en las figuras 77 y 78.

La galga nº 1 comprimida ubicada en la cabeza de compresión tiene una deformación unitaria en rotura del 0.00222 es decir del 2.22 ‰ . La máxima deformación unitaria de tracción que experimenta el ala inferior de GFRP pultrusionada es de 0.00597 , es decir el 5.97 ‰ .

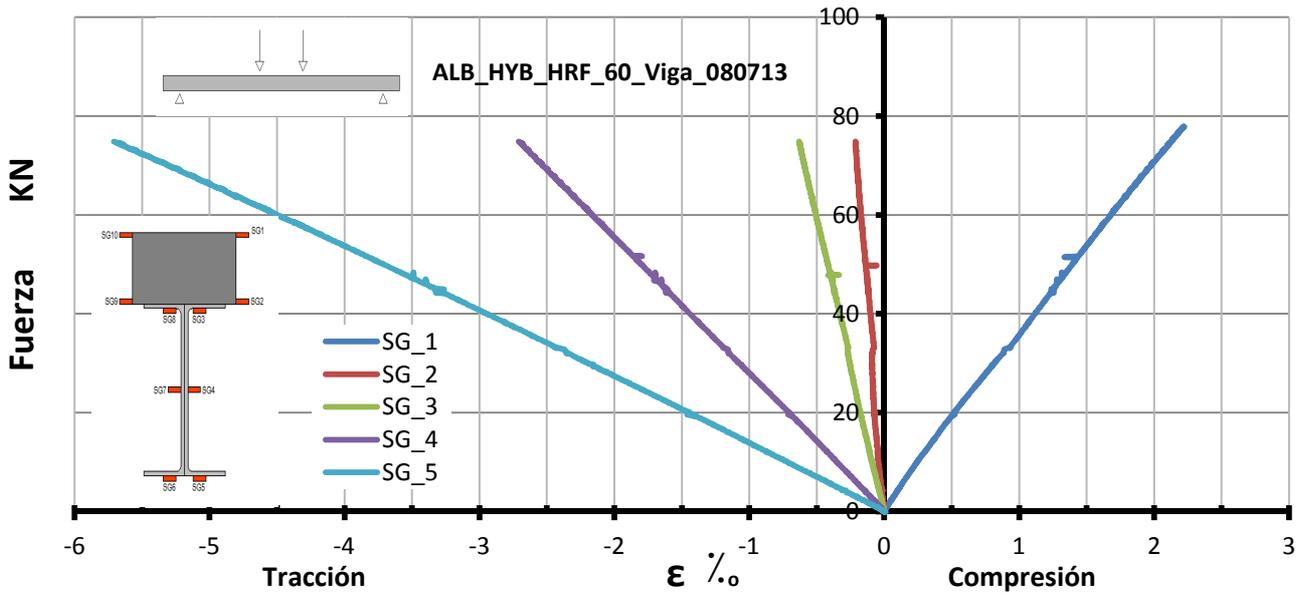


Figura 77: Gráfico Fuerza/deformación (galgas) de la viga híbrida ALB_HYB_HRF_60, en centro de luz.

La figura 78, donde se presenta la gráfica fuerza en relación a la flecha, los captadores de deformación LVDT nº 2, 3 y 4 experimentan una flecha entorno 18 mm; los captadores de deformación LVDT nº 1 y 5 están midiendo el esfuerzo rasante en los extremos de la viga híbrida, en la interfase hormigón y GFRP; el LVDT nº 6 está midiendo 3 mm de pandeo lateral producido por el esfuerzo de compresión en la capa de compresión del hormigón.

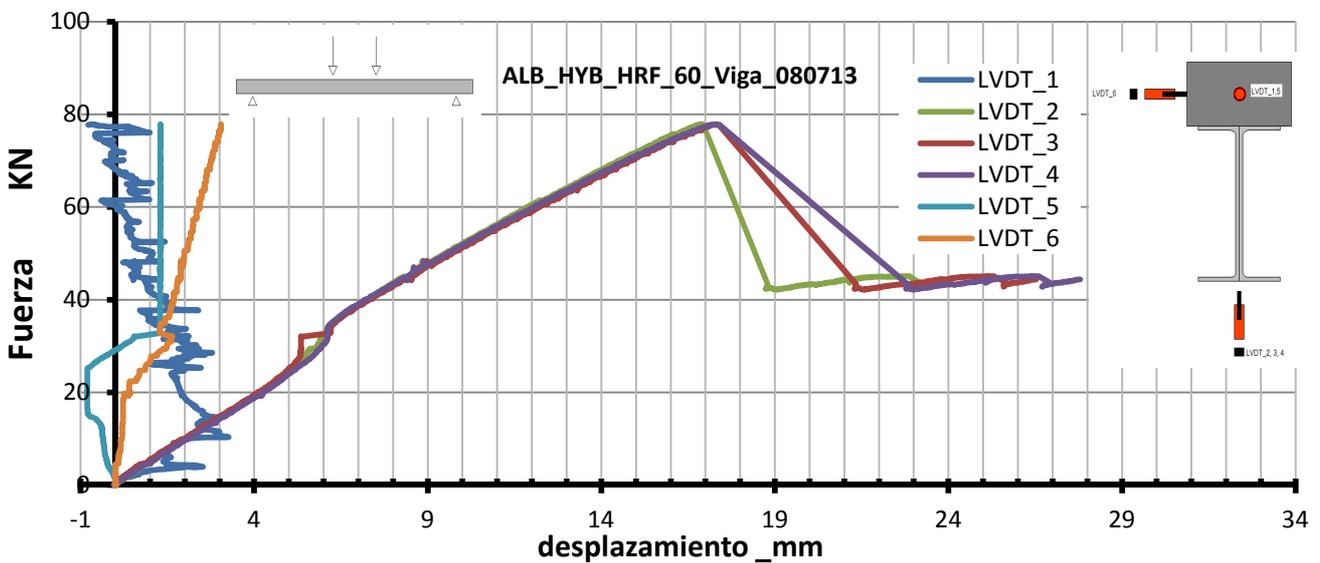


Figura 78: Gráfico Fuerza/desplazamiento (LVDT) de la viga híbrida ALB_HYB_HRF_60, en centro de luz.

La rotura producida indica un fallo por esfuerzo rasante y pérdida de adherencia entre el perfil de GFRP y el hormigón (fotografía 60), con una carga de 77.30 KN, la

rotura es instantánea y frágil. Los conectores metálicos están sesgados por cortante, rotura frágil ya que no presenta signos de estricción el metal, como se aprecia en la fotografía 61.



Fotografía 60: Rotura a flexión 4 puntos de la viga híbrida ALB_HYB_HRF_60.



Fotografía 61: Rotura de los conectores en la viga híbrida ALB_HYB_HRF_60.

7.1.4.- ALB_HYB_HRF_120_viga_080713, es la viga híbrida con una capa de compresión de hormigón reforzado con 120 kg/m^3 de fibras metálicas. En la fotografía 62, se observa la instrumentación, análoga a las demás vigas y el pórtico para la rotura de la viga. La velocidad de carga es bajo deformación constante 0.2 mm/m .



Fotografía 62: Viga híbrida ALB_HYB_HRF_120, ensayo a flexión en 4 puntos.

Esta viga híbrida al alcanzar los 23.5 KN cambia la pendiente debido a la rotura por esfuerzo rasante, como el estado de carga es todavía bajo los conectores siguen resistiendo el esfuerzo cortante hasta los 57.22 KN momento en que la viga sufre una rotura frágil.

En la figura 78, se muestran las deformaciones tomadas con las galgas extensiométricas número 4 y 5, que van a estar traccionadas y con las galgas extensiométricas nº 1 y 2 están en compresión. El eje neutro está en la posición de la galga nº 3 a 50 mm, según los resultados experimentales, hasta la rotura por rasante a los 23.50 KN. A partir de los 23.50 KN empieza a estar comprimida, al fallar la adherencia la cara inferior del hormigón se tracciona tal como indica la galga nº 2 con una deformación en tracción del 3 ‰ hasta la rotura, deformándose un 4.5 ‰, gracias a las fibras metálicas.

La galga nº 1 ubicada en la cabeza de compresión tiene una deformación unitaria en rotura del 0,00278 es decir del 2.78 ‰. La máxima deformación unitaria de tracción que experimenta el ala inferior de GFRP pultrusionada es de 0.00759, es decir el 7.59 ‰.

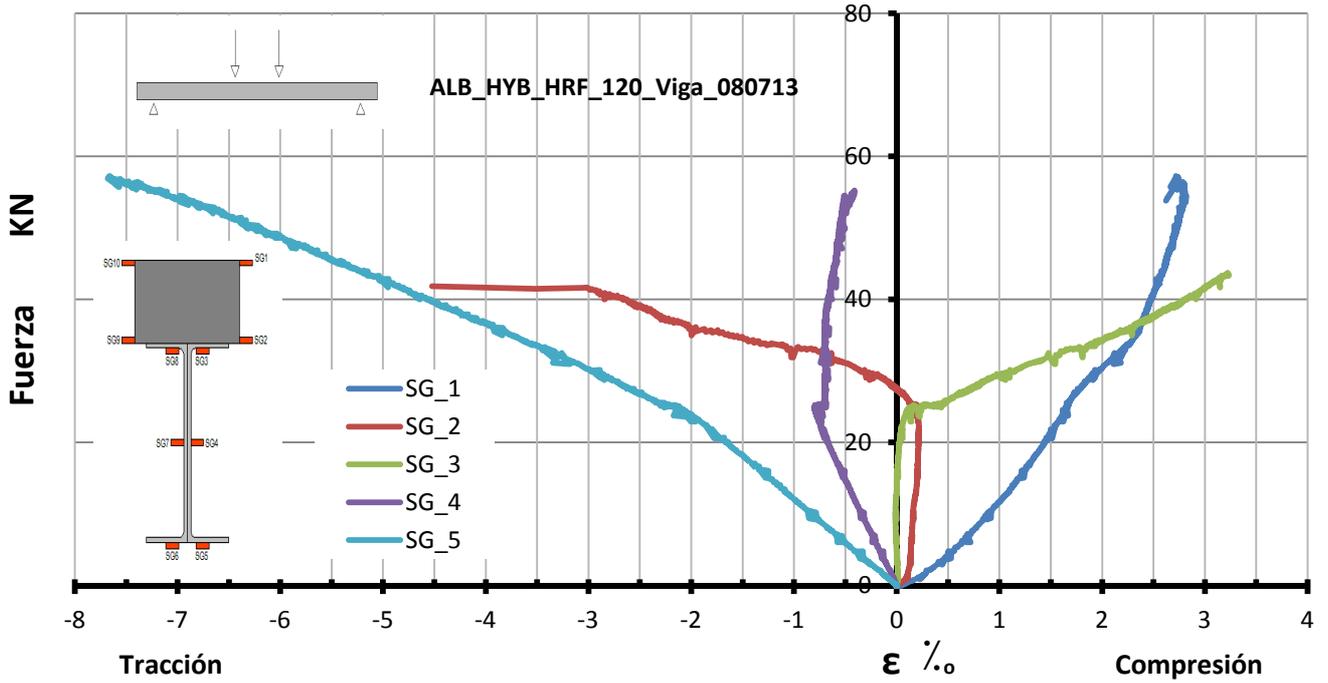


Figura 78: Gráfico Fuerza/deformación (galgas) de la viga híbrida ALB_HYB_HRF_120, en centro de luz.

En la figura 79, donde se presenta el gráfico fuerza en relación a la flecha donde los captadores de deformación LVDT nº 2, 3 y 4, reflejan una flecha de 32 -35 mm; los captadores de deformación LVDT nº 1 y 5 están midiendo la deformación en el extremo debido a la flexión y el esfuerzo rasante en los extremos de la viga híbrida; el LVDT nº 6 no refleja movimiento con lo cual el pandeo lateral no se produce.

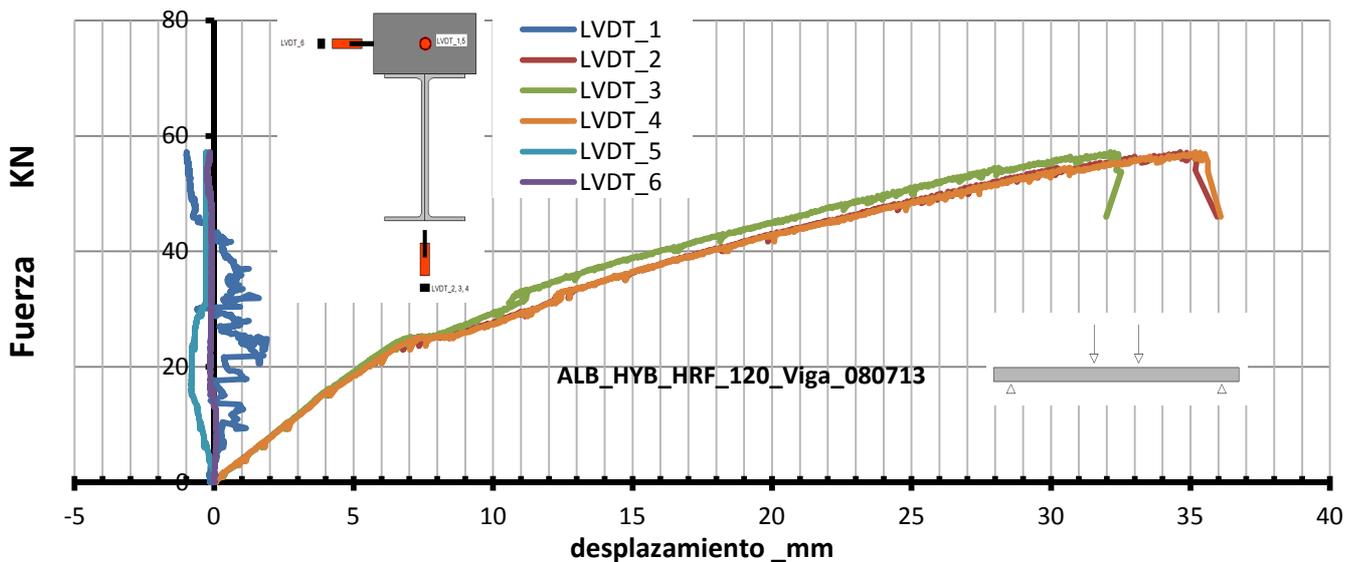


Figura 79: Gráfico Fuerza/desplazamiento (LVDT) de la viga híbrida ALB_HYB_HRF_120, en centro de luz.

La rotura producida con una carga de 57.22 KN, donde la rotura es súbita y frágil. Los conectores no están cortados, debido a la baja carga aplicada, ver fotografía 63. Para una carga de 77.30 KN, los conectores metálicos son rotos por cortante una vez el fallo por adherencia hace presencia previamente.



Fotografía 63: Rotura a flexión 4 puntos de la viga híbrida ALB_HYB_HRF_120.

Se aprecia en la fotografía 64, la fisuración por rasante hasta el punto de aplicación de la carga.



Fotografía 64: Rotura a flexión 4 puntos de la viga híbrida ALB_HYB_HRF_120.

7.1.5.- ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS VIGAS

Se comparan en la figura 80 todas las vigas híbridas pultrusionadas.

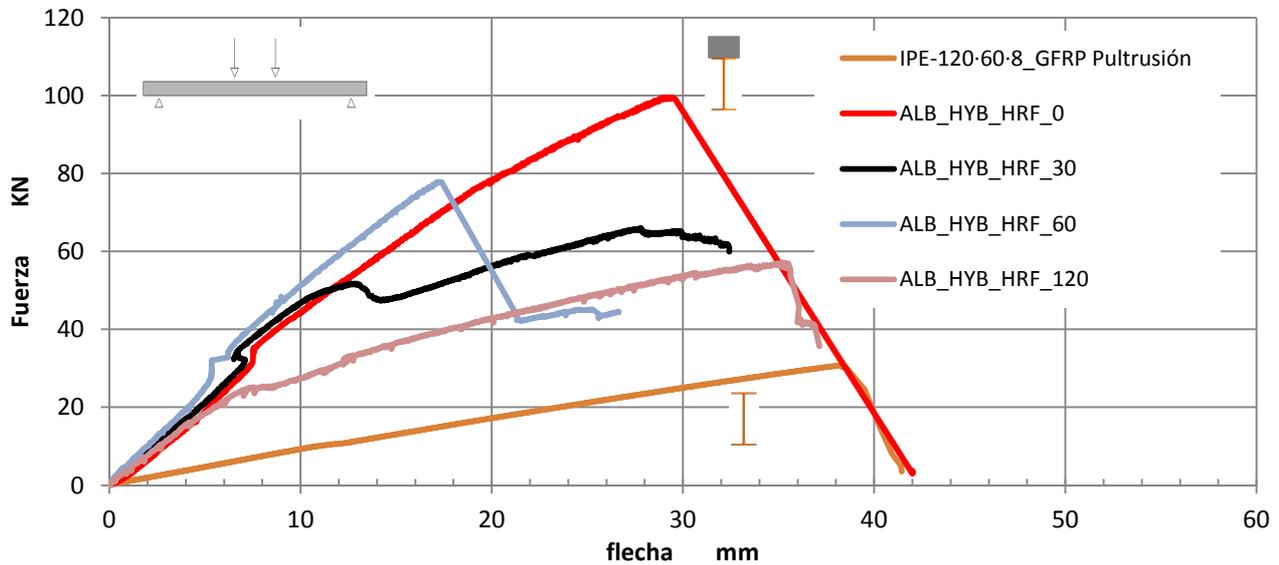


Figura 80: Gráfico carga/flecha ensayo a flexión 4 puntos de las viga híbridas.

Los módulos de elasticidad de las vigas hasta los 20 KN son todos iguales, salvo en la viga pultrusionada, donde la pendiente es menor, indicativo de la baja rigidez de esta.

La colocación de la capa de compresión, puede llegar a cuadruplicar la tenacidad, la rigidez, la resistencia última de la estructura y el modo de rotura.

El diseño de estas estructuras no viene condicionado por su capacidad última portante E.L.U. sino más bien por sus limitaciones de trabajo en servicio E.L.S. debido a su escasa rigidez frente a otros materiales.

El comportamiento de este tipo de vigas viene condicionado según datos experimentales por su resistencia a flexión (99.60 KN), por su resistencia a cortante de los conectores (77.30 KN) o por su resistencia al esfuerzo rasante variable entre 65.97 y 57.22 KN.

Es evidente en estos ensayos que la causa de la rotura se ha visto influenciada por un fallo en la adherencia del hormigón con la resina, por ello la rotura ha sido frágil. Un comportamiento estructural interesante es el de la viga ALB_HYB_HRF_30 ya que avisa

de la rotura por rasante con una rama de descenso, inmediatamente surge una rama de endurecimiento hasta llegar a la rotura, debido probablemente a que la rotura por rasante no ha sido súbita y los conectores han colaborado en la sujeción de la capa de compresión, siempre que no se alcancen los 77.30 KN.

Todas las vigas una vez alcanzada la rotura, se procede a su descarga comprobando que la recuperación de la flecha es del 95%, debido al comportamiento elástico lineal con rotura frágil, como se aprecia en la fotografía 65.



Fotografía 65: Recuperación de la flecha tras descarga de la viga después de ensayo de flexión 4 puntos de las viga híbridas.

7.2.- COMPARATIVA DE LAS VIGAS HÍBRIDAS CON VIGAS DE GFRP PULTRUSIONADAS Vs VIGAS DE HORMIGÓN ARMADO Vs VIGAS HÍBRIDAS “HAND LAY UP”.

Se procede a ensayar varios tipos de vigas de hormigón armado de 100 · 170 mm de sección, esta sección es la envolvente de la viga híbrida IPE pultrusionada+ HRF, de dimensiones totales de base · altura de 90 · 170 mm. Se realizan tres vigas de hormigón armado con hormigones autocompactantes de $f_c=35$ MPa, el armado corresponde a tres tipologías, que varían en función de la armadura de tracción, se han diseñado para que su comportamiento a rotura sea dúctil. Ver tabla 33.

Tabla 33: Tipología de vigas de Hormigón Armado.

Tipo	As´	As	Estribos	B h_ mm	fc_MPa	Peso_Kg
1	2φ8	6φ8	φ8 c/10	100·170	35	81.6
2	2φ8	4φ8	φ8 c/10	100·170	35	77
3	2φ8	2φ8	φ8 c/10	100·170	35	72

Se ha previsto realizar una viga híbrida mediante el procedimiento “hand lay up”, siendo el proceso totalmente artesanal, ver fotografía 66. La viga es rectangular de 170·100·5 mm de tipo cajón, tal como se muestra en la fotografía 14, realizada con varias capas de fibra de vidrio, combinando distintos tipos de tela con diferentes gramajes y direcciones de fibra, aplicada con resina de poliéster ortoftálica. En el ala inferior se ha reforzado con fibra de carbono en sentido longitudinal a 0° con resina epoxi para no encarecer su coste y en la cabeza de compresión se ha realizado con UHPC, un hormigón de ultra alta resistencia y 150 kg de fibras, la viga ha alcanzado un peso de 21 kg, cuatro veces menos que las de hormigón. Ha sido diseñada para que el fallo se produzca en la cabeza comprimida, por el UHPC, la dosificación se muestra en la tabla 34. La interfase entre el UHPC y el perfil en caja de GFRP se ha combinado una resina epoxi resistente a la humedad y conectores de acero M3, para evitar la rotura por esfuerzo rasante. El proceso de curado de las resinas ha sido durante 24 h a Tª ambiente 25 °C.

**Fotografía 66:** Viga híbrida de GFRP+CF+UHPC realizada mediante un proceso manual.

Tabla 34: Dosificación del hormigón UHPC para la viga híbrida hecha a mano.

Dosificación Kg/m ³	UHPC
CEM	10000
H ₂ O	200
ARENA 0/2	700
ARENA 0/4	100
GRAVA	0,00
Aditivo	
SikaViscocrete20HE	20
Dramix OL 13/0,16	150
Humo de Sílice	200
Volumen lt	1015
A/C	0,22

La empresa Fribrotec, S.L. facilita un perfil IPE-120·60·8 realizado mediante la técnica de pultrusión, similar al IPE-120 formado por los dos UPN-120·36·3 utilizados en la viga híbrida de perfiles pultrusionados. Esta viga no tiene capa de compresión de hormigón, con el fin de poder compararla con las programadas que si lo llevan. Ver fotografía 67.



Fotografía 67: IPE-120·60·8 pultrusionado de GFRP y viga Híbrida cajón hecha a mano.

Pórtico "Ibertest" donde se realizan los ensayos de las vigas de hormigón armado, perfiles IPE pultrusionados y viga híbrida en cajo hecha a mano, se aplica una velocidad de carga de 0.06 KN/s. Fotografía 68.



Fotografía 68: IPE-120 60 8 pultrusionado de GFRP.

En la figura 81, adjunta se puede observar el gráfico fuerza/flecha de todo el conjunto de vigas ensayadas, híbridas pultrusionadas de GFRP, pultrusionadas de GFRP, híbridas "hand lay up" y las tradicionales de hormigón armado, siempre con una geometría común en su sección de 100 · 170 mm, para compararlas.

La viga tipo 1, con mayor cantidad de armado 6 ϕ 8 en A_s , alcanza una capacidad de carga en rotura de 70 KN, el tipo de rotura es dúctil, la deformación que sufre antes del colapso es amplia, para posteriormente fallar en la cabeza comprimida.

La viga tipo 2, con nivel intermedio de armado 4 ϕ 8 en A_s , alcanza una carga de rotura 48 KN, siendo también el fallo en la cabeza comprimida, rotura dúctil, plastificando la armadura.

La viga tipo 3, con 2 ϕ 8 en A_s , tiene una plastificación de la armadura mucho mayor ya que al nivel de carga de 25 KN, no se produce el fallo en la capa de compresión si no en la rotura total del armado inferior de tracción, se produce una rotura de mayor comportamiento dúctil de las tres vigas.

Las tres tipos de vigas de hormigón armado, tienen la misma pendiente hasta 7.5 KN, una vez superada dicha carga, el hormigón se fisura, mostrando un cambio de

pendiente en la gráfica de la figura 81. Este cambio de pendiente es distinto para cada tipo de viga ya que la rigidez es mayor a medida que tenemos más armada la zona traccionada. Las tres vigas poseen una rotura dúctil, debido a la gran deformación que se experimenta en campo plástico antes de su rotura.

En cuanto a las vigas de GFRP pultrusionadas y la viga híbrida hecha a mano, se aprecia como la pendiente es menor que en las vigas de hormigón armado. La pendiente de la viga cajón hecha a mano es mayor, debido a la capa de compresión de 20 mm de hormigón de ultra alta resistencia, UHPC, rigidizando más la estructura, que la viga de GFRP pultrusionada que no la lleva.

La rotura de la viga cajón alcanza los 60 KN, se comporta como una estructura elástico lineal con rotura frágil, con una flecha de 29 mm; este último condicionante implica que los estados límites de rotura no son los más restrictivos, en todo caso serán los E.L.S. estados límites de servicio. La rotura se produce por cortante en la capa de compresión en el lugar de aplicación de la carga. Ver fotografía 69.

El perfil IPE-120·60·8 pultrusionado de GFRP, alcanza una carga de 20 KN siendo el comportamiento elástico lineal con rotura frágil producida por el aplastamiento de la cabeza de compresión en el lugar de aplicación de la carga. Ver fotografía 70.



Fotografía 69: IPE-120·60·8 pultrusionado de GFRP y viga Híbrida cajón hecha a mano.

Una vez rota la viga se procede a la descarga y se aprecia la recuperación total de la deformación de la viga. Se procede a voltear el perfil IPE-120·60·8 pultrusionado de

GFRP, roto, invirtiendo el comportamiento estructural de las alas pasando a estar la rota de compresión a hora en tracción, podíamos estar hablando de una simulación de una inversión de momentos en un posible sismo y la respuesta frente a la rotura mejora después de prevenir la rotura por aplastamiento hasta llegar a los 31 KN, llegando a tener una deformación en flecha de 38.5 mm.



Fotografía 70: IPE-120 60 8 pultrusionado de GFRP, rotura por aplastamiento.

El peso de una estructura es muy importante, sobre todo cuando se trabaja en rehabilitaciones de edificios antiguos, como refuerzos estructurales, nuevas aplicaciones de plantas o cuando se necesiten realizar estructuras livianas. Por ello la diferencia de peso es muy importante entre los distintos tipos de vigas, tal y como se aprecia en la tabla 35.

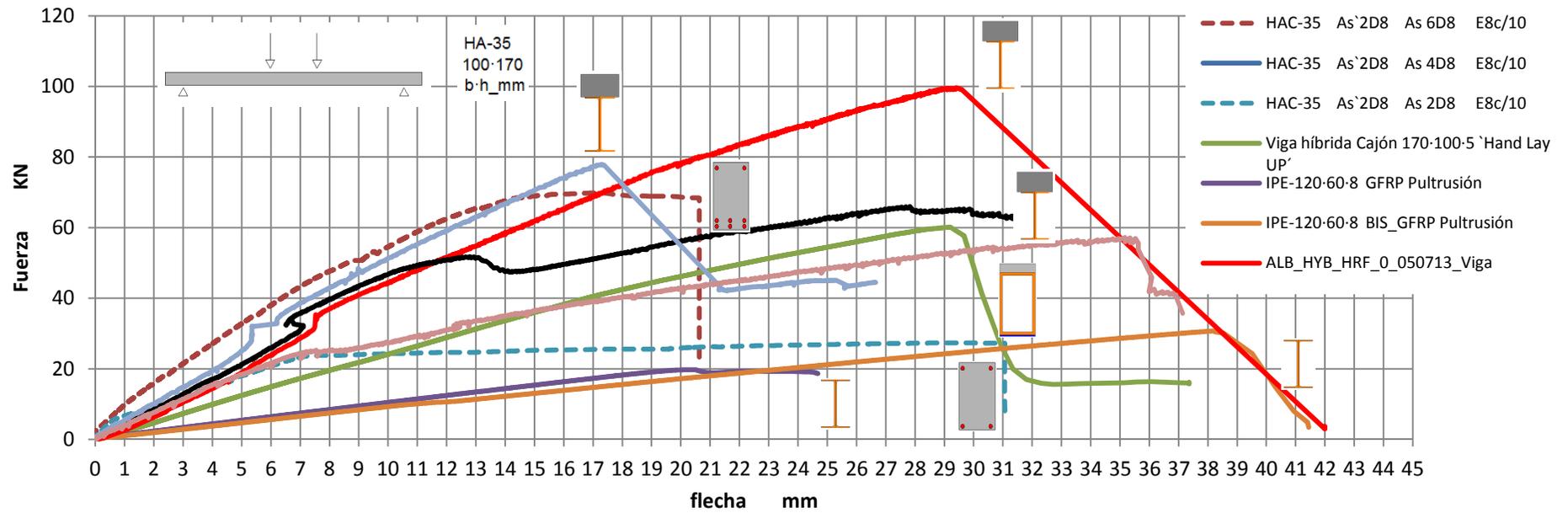


Figura 81: Conjunto de vigas híbridas pultrusionadas, vigas pultrusionadas e híbridas "hand lay up" comparadas con las vigas de hormigón.

Tabla 35: Características de vigas híbridas pultrusionadas, vigas pultrusionadas e híbridas "hand lay up" comparadas con las vigas de hormigón.

Tipo de viga	Sección_mm	Materiales	Proceso	Peso_Kg	Fc,flex_MPa	Rest. Específica	Rigidez	Tipo de rotura	Causa rotura
HA_1	100·170	H.A.	A mano	81,60	70,00	0,86	Muy alta	Ductil	Agotamiento cabeza compresión debido a una excesiva flecha
HA_2	100·170	H.A.	A mano	77,00	48,00	0,62	Alta	Ductil	Agotamiento cabeza compresión debido a una excesiva flecha
HA_3	100·170	H.A.	A mano	72,00	25,00	0,35	Alta	Muy ductil	Plastificación armadura
Híbrida "hand lay up"	17·100·5	GFRP-CF	A mano	21,00	60,00	2,86	Media	Frágil	Cortante en HRF aplicación de la carga
IPE-120	120·60·8	GFRP	Pultrusión	6,50	31,00	4,77	Baja	Frágil	Aplastamiento ala GFRP en la aplicación de la carga.
ALB_HYB_HRF_0	120·72 IPE+HRF	GFRP+HRF	Pultrusión/manual	32,83	99,60	3,03	Alta	Frágil	Agotamiento cabeza compresión
ALB_HYB_HRF_30	120·72 IPE+HRF	GFRP+HRF	Pultrusión/manual	32,53	65,97	2,03	Media	Frágil	Rasante. Fallo adherencia HRF/Resina
ALB_HYB_HRF_60	120·72 IPE+HRF	GFRP+HRF	Pultrusión/manual	33,58	77,30	2,30	Alta	Frágil	Rasante. Fallo adherencia HRF/Resina
ALB_HYB_HRF_120	120·72 IPE+HRF	GFRP+HRF	Pultrusión/manual	34,05	57,22	1,68	Baja	Frágil	Rasante: Fallo adherencia HRF/Resina

CAPÍTULO VIII

**CONCLUSIONES Y
FUTURAS LÍNEAS
DE INVESTIGACIÓN**

CAPÍTULO VIII.- CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

8.1.- CONCLUSIONES

En primer lugar se establecen las conclusiones en cuanto a la caracterización de los materiales y en segundo lugar se procede a establecer las conclusiones de la caracterización de las vigas híbridas.

CARACTERIZACIÓN DEL HORMIGÓN DE ALTAS PRESTACIONES:

Estado fresco:

A medida que aumentamos la cantidad de fibras el hormigón pierde trabajabilidad, la trabajabilidad con más de 60 kg/m³ de fibras es compleja.

Trabajar con hormigones con 120 kg/m³ de fibras metálicas es muy difícil, aunque no es imposible, el empleo de aditivos muy potentes se hace patente, para poder tener trabajabilidad, con el consiguiente riesgo de exudación y la posibilidad de que las fibras queden segregadas en el fondo del elemento estructural.

Para cada tipo de cemento, tipología de áridos y fibras, la dosificación del aditivo es distinta. Las cantidades de aditivo pueden oscilar entre el 1.0 y 1.5 % del peso del cemento sin que segregue la mezcla, en este caso, donde se utiliza una considerable cantidad de cemento (CEM I-52.5 R) 500 kg/m³ y hasta 120 kg/m³ de fibras Dramix OL 13/0.16_40% y Dramix 80/30 BP_60%.

Estado endurecido, ensayo a compresión:

La capacidad mecánica a compresión aumenta con el contenido de fibras metálicas, en concreto, un 10% al contener más de 60 Kg/m³ de fibras metálicas. El aumento en la capacidad mecánica del hormigón a compresión en el intervalo de 60 a 120 kg/m³ de fibras metálicas no es significativo en relación al coste.

La rigidez del hormigón no varía a pesar del aumento de fibras en los ensayos de compresión axial.

La capacidad de deformación que alcanzan estos hormigones con cantidades de fibras entre 60 y 120 Kg/m³ , se duplican con respecto al hormigón patrón (sin fibras),

esto es debido a la capacidad de confinamiento que tienen las fibras proporcionando una rotura dúctil.

Estado endurecido, ensayo a flexión:

En los ensayos **a flexión** a media que aumentamos la cantidad de fibra metálica la resistencia última es mayor, se triplica. Las tensiones son con respecto al hormigón patrón sin fibras (HRF_0) 5.40 MPa, en el hormigón con 120 kg/m³ de fibras (HRF_120) son 16.49 MPa.

Las capacidades residuales mejoran considerablemente, pudiendo alcanzar una tensión R3 de 0.5 a 15.03 MPa de un hormigón sin fibras a uno con 120 kg/m³ respectivamente, proporcionando la rotura dúctil en el material.

CARACTERIZACIÓN DE LAS VIGAS HÍBRIDAS:

El aumento de rigidez en la viga debido a la colocación de la capa de compresión, es el triple a la del perfil pultrusionado sin capa de compresión.

El aumento de la capacidad mecánica a flexión última y de tenacidad de la viga híbrida es casi 3.5 veces la del perfil pultrusionado.

La capa de compresión evita los modos de fallo por aplastamiento o por pandeo del ala superior del perfil de GFRP.

Las vigas híbridas tienen un comportamiento frágil frente a la rotura. Este comportamiento es debido al fallo por adherencia entre el hormigón y el perfil de GFRP, provocado por el esfuerzo rasante.

El fallo por adherencia está localizado en la interfase resina epoxi/hormigón.

Los conectores evitan la rotura catastrófica una vez aparece el fallo de adherencia entre HRF y GFRP, a bajos niveles de carga. Superado cierto nivel de carga (77.330 KN) los conectores no pueden por ellos mismos sin la ayuda de la adherencia al soporte aguantar el estado de carga.

En el caso que no falle la adherencia entre hormigón y perfil GFRP, llegamos a agotar la cabeza de compresión de hormigón; es ahí donde el aporte de fibras al hormigón puede llevarlo a que la viga tenga un comportamiento dúctil.

Las vigas híbridas realizadas tienen una rigidez similar a las vigas de H.A.

Evitando el fallo por adherencia entre el hormigón y el polímero, la capacidad mecánica última es mayor que las vigas de H.A., como el caso de la viga ALB_HYB_HRF_0.

Las vigas de H.A, tienen un comportamiento inicial elástico y una segunda fase plástica, su comportamiento frente a la rotura es dúctil, según su diseño. Las vigas híbridas tienen un comportamiento elástico lineal con grandes deformaciones hasta su rotura frágil.

8.2.- FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.

Como mejorar la ductilidad de los perfiles híbridos actuando en el perfil de GFRP.

Estudio de la influencia del aumento de la anchura y la altura de la capa de compresión, en la rigidez y ductilidad de la viga.

Estudio de la influencia en los perfiles híbridos GFRP y HRF con distintos tipos de resistencia del hormigón y fibras metálicas, en la rigidez y ductilidad de la viga.

Modelización estructural por el método de elementos finitos, para ver el grado de fiabilidad y concordancia entre lo calculado y los ensayos experimentales.

Influencia de distintos tipos de resinas y anclajes, en el comportamiento a rasante.

CAPÍTULO IX

BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA

- [1] **A. Elmahdy, R. El-Hacha & N. Shrive.** "Flexural behaviour of hybrid composite girders in bridge Construction". University of Calgary, Department of Civil Engineering, Calgary, Alberta, Canada. Fourth International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE2008) 22-24 July 2008, Zurich, Switzerland
- [2] **Chanvillard, G, Jones, JP Aitcin, P-C** "Evaluation of the Statistical Significance of a Regression and Selection of the Best Regression Using the Coefficient of Determination R²" ISSN: 0149-6123 CODEN: CCAGPD DOI: 10.1520/CCA10585J
- [3] **EHE-08** Ministerio Fomento. España
- [4] **E. Maravilla**, et al; "Materiales compuestos" Editorial U.P.V.
- [5] **Deskovic N, Triantafillou TC, Meier U.** "Innovative design of FRP combined with concrete: short term behavior". J Struct Eng ASCE 1995;121(7):1069–78.
- [6] **Almir Barros da S. Santos Neto a,1, Henriette Lebre La Rovere b,*** *Composite Structures* 92 (2010) 2554–2564
- [7] **Hiroshi Mutsuyoshi, Kensuke Shiroki, Nguyen Duc Hai & Tatsuya Ishihama**
Department of Civil and Environmental Engineering, Saitama University, Saitama, Japan
CICE 2010 - The 5th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering
September 27-29, 2010, Beijing, China
- [8] **Yuqing Liu, Jun He, Haifeng Fan & Airong Chen**
Department of Bridge Engineering, Tongji University, Shanghai, China
Liang Dai Shenzhen Municipal Design & Research Institute Co. Ltd, Shenzhen, China
CICE 2010 - The 5th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering
September 27-29, 2010, Beijing, China
- [9] **J.G. Teng, T. Yu & Y.L. Wong;** "Hybrid FRP-Concrete-Steel Double-Skin Tubular Structural" CICE 2010 - The 5th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering, September 27-29, 2010, Beijing, China
- [10] **S. Calvo, C. Salom, M.G. Prolongo, R.M. Masegosa**
"Comportamiento mecánico de poliéster insaturados modificados con poli (ϵ -caprolactona) reforzados con monmorillonita c30b" E.T.S.I. Aeronáuticos, Universidad Politécnica de Madrid (España)
- [11] **George Morcou, Yong Cho, Adel El-Safty, and Genmiao Chen** "Structural Behavior of FRP Sandwich Panels for Bridge Decks" KSCE Journal of Civil Engineering (2010) Structural Engineering 14(6):879-888 DOI 10.1007/s12205-010-1025-4
- [12] **Fei zhao, Chaohe Chen, Wenjuan Lou;** "Experimental study of gfrp-concrete hybrid beams" cice 2010 - the 5th international conference on frp composites in civil engineering. September 27-29, 2010, Beijing, China
- [13] **Nguyen Duc Hai, Hiroshi Mutsuyoshi, Shingo Asamoto, Takahiro Matsui**

Department of Civil and Environmental Engineering, Saitama University, Saitama 338-8570, Japan b Advanced Composites Technical Dept., Toray Industries, Inc., Tokyo, Japan . Construction and Building Materials 24 (2010) 956–969

[14] Kheanee et al.

[15] Maritzabel Molina, Juan José Cruz, Sergio Oller, Alex H. Barbat y Lluís Gil. “Estudio numérico-experimental de la interfaz hormigón-epoxi-FRP para una estructura reforzada sometida a doble corte”. Departamento de Resistencia de Materiales y Estructuras en la Ingeniería (RMEE), Universidad Politécnica de Cataluña (UPC), Mòdul C1, Campus Nord, Barcelona, España

[16] Amir Fam1 and Sami Rizkalla Hybrid FRP/Concrete Structural Members
Department of Civil Engineering, The University of Manitoba, Winnipeg, Manitoba, Canada, R3T 5V6

[17] A. Fam, H. Honickman “Built-up hybrid composite box girders fabricated and tested in flexure” Engineering Structures 32 (2010) 1028_1037

[18] Tesis UPV3783

[19] Boremann, R.; Faber, S.; “UHPC with steel and non-corroding high-strength polymer fibres under static and cyclic loading”. University of Kassel. In: First International Symposium of Ultra High Performance Concrete. Kassel University, 2004

[20] J. Pan and C.K.Y. Leung; “Effect of concrete composition on FRP /concrete bond capacity” M.S. Konsta-Gdoutos, (ed.), Measuring, Monitoring and Modeling Concrete Properties, 743–748. © 2006 Springer.

[21] Sakay,E; Aizana, K; Nakamura, A; Kato, H; Daimon, M: “Influence of superplasticizers on the fluidity of cements with different amount of aluminate phase”. In: Second International Symposium of Ultra High Performance Concrete. Kassel University, 2008.

[22] Park, J.J.;Kang,S.T.;Koh,K.T.;Kim,S.W. “Influence of the ingredients on the Compressive Strength of UHPC as a Fundamental Study to Optimize the Mixing Proportion”. In: Second International Symposium of Ultra High Performance Concrete. Kassel University, 2008

[23] Stara,U; Mueller, A. “Optimization of packing density of aggregates”. In: Second International Symposium of Ultra High Performance Concrete. Kassel University, 2008.

[24] Ma, J.; Orgaz, M; Dhen, F. Schimth,D.; Tue, N.V. “Comparative Investigations on Ultra High Performance Concrete with and without Coarse Aggregates”. In: Second International Symposium of Ultra High Performance Concrete. Kassel University, 2008

[25] Frank Matthesen, Morten Mork, Jesper Tychen: “General Jacket design and reassessment conditions”, Background document on Densit Grout Materials, Maersk Oil and Gas AS, January 2000.

[26] Sabir, B.B; Wild, S. and Bai, J.: “Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review”. In: Cement and Concrete Composite, vol 23, 441-454,2001.

- [27] **Li, Z.; and Ding, Z.;** "Property improvement of Portland cement by incorporating with metacaolin and slag". In: Cement and Concrete Research, vol. 3 579-584, 2003
- [28] **Rougeau, P. y Boyrs, B.** "Ultra High Concrete with ultrafine particles other than silica fume". In: Second Internacional Simposium of Ultra High Performance Concrete. Kassel University, 2008.
- [29] **Aixi Zhou *, Thomas Keller;** "Joining techniques for fiber reinforced polymer composite bridgedeck systems" Composite Structures 69 (2005) 336–345
- [30] **Bonaveti, V.; Donza, H.; Menendez, G.; Cabrera, O.; and Irassar, E.F.:** "Liemsatone filler cement in low W/C concrete: Arational use of energy". In: Cement and Concrete Reserch, vol. 3, 865-871,2003
- [31] **Li, V.C.,** "High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites as Durable Material for Concrete Structure Repair," Int'l J. for Restoration of Buildings and Monuments, Vol. 10, No 2, 163–180 (2004)
- [32] **Markovic, I.;** "High Performance hybrid Fibre Concrete". PhD-tehsis ISBN 90-407-2621-3. Delf University.
- [33] **Wuest, J.; Denarié, E.;Brühwile, E.** "Model for predicting The UHPFRC tensile hardening response". In: Second Internacional Simposium of Ultra High Performance Concrete. Kassel University, 2008.
- [34] **Pank, W.; Sato, H.; Sato, Y.; Shionaga, R.;** "Tensile Behavior and Fiber Orientación of UHPC" In: Second Internacional Simposium of Ultra High Performance Concrete. Kassel University, 2008
- [35] **Empelmann, M.; Teutsch, M.; Steven, G.;** "Improvement of the Post Fracture Behavior of UHPC by Fibre". Technical University Brunswick, Germany. 2006.
- [36] **Ashhy. M. F. (1991).** "Materials and shape." Acta Metall. Mat.. United Kingdom. 39(0), 1025-1039.
- [37] **Bakeri. P. A. (19X9).** "Analysis and design of polymer composite bridge decks," MS thesis, Dept. of Civ. Engrg.. Massachusetts Inst. of Teehnol. Camhridge. Mass.
- [38] **Bank, L. C, and Mosallam. A. S. (1990).** "Structural performance of a fihier reinforced plastic pultruded frame." Proc., 8th Struct. Congo 'YO. ASCE, New York. N.Y., 509-510.
- [39] **Banks. W. M., and Rhodes. J. (19X3).** "The instahility of composite channel sections." Composite Struct. 2: Proc., 2nd Int. Conf on Composite Struct., Can. Soc. for Civ. Engrg. Montreal. Canada. 443452.
- [40] **Deskovic, N. (1993).** "Innovative design of FRP composite members combined with concrete." PhD thesis. Dept. of Civ. and Envir. Engrg. Mas,achusetts Inst. of Technol.. Cambridge. Mass.
- [41] **Deskovic. N., Triantafillou. 1'. C, and Meier. U. (1991).** "Innovative design of FRP compositc members combined with concrete." Res. Rep. RYI-22, Dept. of Civ. Engrg.. Massachusetts Inst. of Technol. Camhridge. Mass.

- [42] Deskovic. N., Triantafillou, T. c., and Meier, U. (1995).** "Innovative design of FRP combined with concrete: Long-term behavior." J. Struct. Engrg.. ASCE. 127(7). 1079-1089.
- [43] Donna S. M. Chen & Raafat El-Hacha, 2010** "Flexural behavior of hybrid FRP-UHPC girders under static loading." Proceedings of 8th International Conference on Short and Medium Span Bridge, Niagara Falls, Canada 2010.
- [44] Hollaway. L. cd. (1990).** Polymers and polymer composites in construction. T. Telford, London, England.
- [45] Hollaway, L. C. (2010).** "A review of the present and future utilisation of FRP composites in the civil infrastructure with reference to their important inservice properties." Construction and Building Materials 24(12): 2419-2445.
- [46] Holmes, M., and Just. D. J, (1983).** GRP in structural engineer'lg. Applied Science Publishers Ltd .. London. England.
- [47] Hull. D. (1981).** An introduction to composite materials. Cambridge University Press. Camhridge. England.
- [48] Johansen. G. E. Wilson. R., Pope. D. A., Goss, G., Ritchie, P., and Mellen, J. (1992).** "Spanning 'devil's poor with a prestressed cable! FRP tuhe structural system." Proc., 1st Int. Conf on Adv. Composite Mat. in Bridges and Strucl.. Sherhrooke. Canada. 435-444.
- [49] Plecnik, J. M., Azar, W., and Kabbara, B. (1990).** "Composite applications in highway bridges." Pmc., First Mat. Engrg. Congo '90. ASCE, New York. N.Y., 986-995.
- [50] M Samaan, A Mirmiran, M Shahawy** "Nonlinear finite element modeling of concrete confined by fiber" Journal of Structural Engineering 124 (9), 1025-1031: 476: 1996