

3

El refuerzo de estructuras de hormigón con laminados de *FRP* según la *FIB*

Lluís Gil

Resumen En los últimos cincuenta años las infraestructuras y las edificaciones se han ejecutado mayoritariamente con la tecnología de hormigón y acero. Algunas de dichas construcciones ya presentan riesgos de estabilidad por problemas de durabilidad y muchas más van a verse puestas en riesgo a lo largo de los próximos años. Las necesidades de mantener el parque construido, e incluso aumentar su capacidad portante a costes asumibles, exige de nuevas estrategias de refuerzo. El refuerzo con *FRP* se basa en la contribución portante que suministra un material compuesto colocado como armadura adicional externa y que se une al hormigón mediante un adhesivo. No obstante, es una tecnología que necesita un cierto recorrido para convertirse en competencia directa de las soluciones tradicionales. Uno de los motivos del freno de la tecnología es el precio. Otro es la falta de normativas que den apoyo a los técnicos en las legislaciones nacionales. Esta pequeña aportación, que no pretende ser exhaustiva, presenta una visión divulgativa de la tecnología del *FRP* y da algunas ideas de cálculo de acuerdo a los planteamientos de la *FIB*¹.

3.1. Introducción

Los refuerzos con *FRP* (*Fiber Reinforced Polymers*) son una tecnología basada en la fabricación y puesta en obra de materiales compuestos en el sector de la construcción. Es en el

Lluís Gil

Departament de Resistència de Materials i Estructures a l'Enginyeria
Universitat Politècnica de Catalunya - BarcelonaTech, Colón 11, TR45, Terrassa, 08222 Barcelona, España
e-mail: lluis.gil@upc.edu

¹ *FIB: fédération internationale du béton, International Federation for Structural Concrete*

ámbito del refuerzo de estructuras de hormigón donde más rápidamente y con mayor éxito se está aplicando la tecnología del FRP. Sobre todo por las propiedades ventajosas que presentan, entre otras, la resistencia a la corrosión y la relación resistencia/peso que se traduce en un ahorro en el transporte y la puesta en obra para la misma capacidad portante. Por este motivo se han empleado de forma masiva en la industria aeronáutica desplazando parcialmente a sus competidores metálicos basados en el aluminio.

En España, el FRP no se empezó a utilizar en obras importantes hasta el año 1996. Las primeras vigas reforzadas corresponden al tablero del puente del Dragó en Barcelona. A partir de esta fecha aumentó su utilización de una manera notoria. En el *Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology* (EMPA) ya se hicieron ensayos con la tecnología en los años 80 y se realizó una prueba piloto en el año 1991 en el puente Ibach en Lucerna (Suiza) [3].

Inicialmente estos tipos de refuerzos se realizaban mediante el método de Hermite [7], que consistía en adherir chapas de acero con epoxi en las posiciones de la viga donde se necesitara aumentar la cuantía. Como evolución lógica se estudió la posibilidad de sustituir este sistema basado en el acero por otro similar con materiales compuestos, con el fin de eliminar la corrosión a largo plazo y reducir el peso, con todas las ventajas de manipulación que ello conlleva. Existen varias patentes sobre este sistema, por ejemplo *Reinforcing fiber sheet, method of manufacturing the same, and method of reinforcing structure with EPO* del año 1991 [9].

La mejora y el abaratamiento de los sistemas de fabricación han permitido el acercamiento de los compuestos a sectores de tecnologías muy maduras como la construcción o el automóvil, donde el precio es clave y hay que competir con materiales de larga tradición. Con ello, y en el caso de las estructuras de edificación y obra civil, se ha conseguido la sustitución de sistemas de refuerzo tradicionales (recrados de estructuras, disposición de pletinas, etc.) por otros, basados en la puesta en obra de laminados, sobre todo, de fibra de carbono. El éxito del refuerzo con material compuesto se debe a su sencillez de puesta en obra, unido a unas características mecánicas (resistencia a tracción y módulo elástico) que garantizan una puesta en carga con deformaciones análogas a las del acero para armar; a ello se le une una durabilidad superior.

El refuerzo con compuestos se limita a las estructuras de hormigón y no se emplea en estructuras metálicas. El motivo es que, hoy por hoy, la única fibra con rigidez atractiva es el carbono y ésta favorece la corrosión galvánica debido a las diferencias de potencial que se generan cuando está en contacto con metales. No se descarta en el futuro que nuevas fibras sintéticas compatibles se puedan extender a las estructuras de acero. Los laminados de fibra de carbono se emplean de manera similar a las barras de acero corrugado, de manera que el laminado complementa las barras longitudinales de acero en las zonas traccionadas, o bien a los cercos transversales en funciones de refuerzo de cortante, siempre teniendo en cuenta que la capacidad de refuerzo del carbono es unidireccional en el sentido de las fibras. Los laminados de fibra de carbono presentan altas características mecánicas, muy superiores a las del hormigón y el acero, por ello, en la mayoría de los casos el éxito del refuerzo viene determinado por el estado y preparación del anclaje más que por el propio laminado de carbono.

En este capítulo se realiza una breve descripción de los sistemas de refuerzo con *FRP* tanto para flexión como cortante. Se describen los modos de fallo del sistema de refuerzo con *FRP* y finalmente se introducen los criterios de diseño básicos recomendados por la *FIB* [6] para el refuerzo en flexión y cortante.

3.2. Sistemas de refuerzo *FRP*

Los sistemas de refuerzo a base de materiales compuestos consisten en la adhesión externa del material de refuerzo sobre la superficie del hormigón. El material compuesto tiene unas prestaciones mecánicas muy altas, principalmente resistencia a la tracción. De esta forma, los materiales compuestos actúan como una armadura externa, que hace unas funciones muy similares a las que hace la armadura interna de acero.

Existen dos tecnologías básicas de aplicación del refuerzo (véase Figura 3.1): mediante laminados preconformados (fabricación industrial y aplicación en obra) y mediante textiles (fabricación del compuesto *in situ* durante la aplicación en obra). Estos dos sistemas integran el compuesto en la estructura de hormigón a modo de piel resistente. Otra posibilidad es el refuerzo mediante elementos estructurales externos tipo viga de perfil de material compuesto (fabricación industrial). A continuación se describen y comparan los diferentes sistemas y tecnologías de aplicación del refuerzo *FRP*.



Figura 3.1: Muestras de materiales compuestos en diferentes configuraciones para refuerzos estructurales.

3.2.1. Refuerzo con laminados preconformados

En esta tecnología el material compuesto se presenta habitualmente en forma de laminados con fibras dispuestas unidireccionalmente embebidas en una matriz de resina. Normalmente tienen un espesor de entre 1 y 2 mm, y una anchura entre 50 y 150 mm. Se presentan en rollos de longitud entre 100 y 500 m lineales que después se pueden cortar en obra a medida. El material preconformado es el que tiene mayores garantías de calidad porque se ha fabricado en industria bajo condiciones controladas. Por ello, los laminados preconformados suelen tener unas propiedades homogéneas.

Para adherir los laminados al soporte se utiliza una resina epoxi. Es un adhesivo de dos componentes de consistencia pastosa y alta tixotropía, que garantiza la puesta en obra en paredes verticales o techos sin problemas de despegue ni derramamiento durante la aplicación. Las características que debe tener el adhesivo que se utilice para este fin son:

- Buena resistencia, principalmente a tracción y cizalla.
- Temperatura de transición vítrea elevada.
- Buena adherencia al hormigón y a los laminados.

3.2.2. Refuerzo con tejidos de fibras

Los tejidos de fibra de carbono, aramida o vidrio son textiles trenzados sin matriz de resina. Forman uno de los componentes del material compuesto. Tienen normalmente entre el 95 y el 98 % de las fibras en dirección longitudinal (trama principal) y entre el 2 % y el 5 % en la dirección transversal (trama secundaria), para efectuar el cosido. Los tejidos tienen normalmente un espesor de entre 0,1 y 0,5 mm, con gramaje de entre 200 y 800 g/m³. Se presentan con anchos de entre 200 y 600 mm, en rollos de entre 40 y 100 m, que posteriormente se cortan en obra en las dimensiones deseadas. El tejido se extiende sobre la superficie de hormigón y se adhiere con resinas epoxi fluidas. Esta fluidez permite a la resina penetrar entre las fibras del tejido, impregnarlas y formar el material compuesto. Esta forma de efectuar el refuerzo requiere de manipulación en obra y por lo tanto, una mayor complejidad en la aplicación.

3.2.3. Refuerzo con perfiles

Existe un tercer tipo de sistema que se compone de un producto laminado, igual al descrito en el primer sistema, pero que ya viene doblado en forma de "L". En este caso es un perfil pensado para adaptarse a ángulos rectos. Esta forma es especialmente óptima para hacer refuerzos a esfuerzo cortante. Estos laminados se presentan en piezas largas que pueden adaptarse a las dimensiones de las vigas (entre 30 cm y 100 cm para cada uno de los brazos). La resina que se utiliza para este sistema es la misma que la descrita en el sistema de laminados rectos.

También existen otras variedades de preconformados en forma de barra con diferentes tipos de sección: redonda, cuadrada, rectangular, etc. Estos perfiles pueden ser adheridos a la viga de hormigón dentro de canaladuras longitudinales o ser usados como anclajes mediante perforaciones transversales.

3.2.4. Comparativa de los sistemas de aplicación del refuerzo

Básicamente existen tres sistemas de aplicación del refuerzo (véase Figura 3.2): el refuerzo *FRP* de perfiles y laminados que se adhieren en superficie, el refuerzo con hojas y finalmente, el refuerzo con perfiles que se introducen en canaladuras que se practican a lo largo de la pieza

(NSM - Near Surface Mounted). En la Tabla 3.1 se recogen las principales características de cada uno de los diferentes sistemas de aplicación.

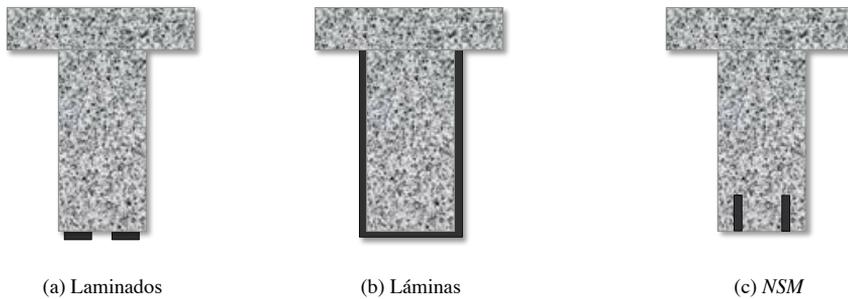


Figura 3.2: Sistemas de aplicación del refuerzo.

	Laminados	Láminas	NSM
Forma	Tiras rectangulares y perfilaría	Tejido unidireccional o bidireccional	Laminados o perfiles embebidos
Espesor	1,0 - 2,0 mm	0,1 - 0,5 mm	1,0 - 10,0 mm
Anchura	50 - 150 mm	200 - 600 mm	10 - 30 mm
Uso	Unión simple con adhesivo de perfiles y laminados prefabricados	Unión e impregnación de la fibra seca con resina y curado <i>in situ</i>	Unión simple de perfiles y laminados prefabricados con adhesivo en un ranurado
Observaciones y Aplicaciones	Para forjados. Unión con adhesivo tixotrópico. No son recomendadas más de una capa. La rigidez del laminado y el uso de adhesivos tixotrópicos permite ciertas irregularidades de la superficie. Sencillez en el uso. Calidad garantizada desde la fábrica. Adecuado para reforzar en curvas o ángulos. Necesita estar protegido contra el fuego.	Fácil de aplicar en superficies curvas. Resina con baja viscosidad para unir e impregnar. Se pueden usar múltiples capas (más de 10 son posibles). Las irregularidades deben ser niveladas. Puede ser combinado con sistemas de acabados como el yeso o la pintura. Adecuado para cortantes o refuerzos en curvatura. Necesita estar protegido contra el fuego.	Depende de la distancia al armado. Las ranuras deben ser serradas en la superficie del hormigón. Las ranuras deben estar limpiadas cuidadosamente antes de la unión. Unión con adhesivo tixotrópico. Es posible utilizar mortero de cemento para la unión. Adecuado para refuerzo en curvatura. Protección mínima contra el fuego.

Tabla 3.1: Comparativa de los sistemas de aplicación del refuerzo.

3.3. Campos de aplicación del refuerzo FRP

El sistema de reparación y refuerzo de estructuras de hormigón mediante laminados de fibra de carbono ofrece una capacidad de resistencia a flexión y cortante mucho más elevada. Pueden emplearse de forma ventajosa en jácenas, forjados y pilares. Como se ha observado existen tres posibles formas de aplicación: la adhesión superficial del material compuesto

preconformado, la fabricación y adhesión *in situ* del refuerzo y finalmente, la introducción dentro de la sección transversal. Estos modos de aplicación se pueden emplear para el refuerzo según diferentes esfuerzos, principalmente flexión y cortante.

3.3.1. Refuerzo a flexión

Los laminados son una de las maneras más efectivas para complementar la resistencia a flexión de vigas, losas, muros y otros elementos a flexión. La capacidad a flexión de elementos reforzados, pretensados y postensados puede aumentar hasta un 70%. En estas aplicaciones el sistema de laminados de fibra de carbono se coloca a lo largo de la longitud del elemento a reforzar, de la misma manera que un refuerzo de acero longitudinal convencional (véase Figura 3.3 inferior-izquierda).

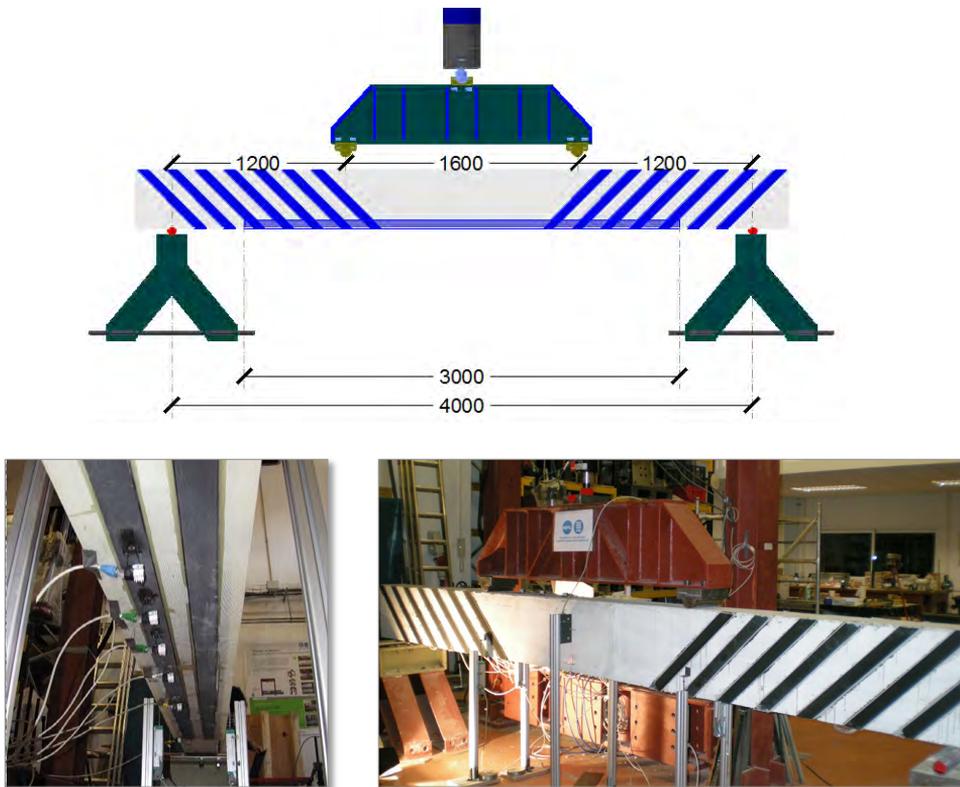


Figura 3.3: Esquema e imágenes del ensayo de una viga biapoyada reforzada con *FRP* a flexión (izquierda) y cortante (derecha).

Este tipo de refuerzo se puede aplicar sobre muros de hormigón, e incluso de mampostería, para aumentar las resistencias a cargas fuera del plano, cargas de viento, presión del suelo, presión de fluidos en tanques y voladuras. En zonas de momentos negativos se puede aplicar el refuerzo en la parte contraria para aumentar también su capacidad portante. En el caso de muros, el *FRP* se puede aplicar tanto a esfuerzos longitudinales (cargas sísmicas, de viento,

etc.) como verticales (cargas gravitatorias). Con el sistema de pegado de tejidos colocados en forma de cruz de San Andrés se consigue mejorar la capacidad portante de los muros contra cualquiera de las cargas indicadas anteriormente.

3.3.2. Refuerzo a cortante

Los laminados se pueden utilizar también para aumentar la capacidad a cortante de vigas, pilares y otros elementos de hormigón. Mediante un adecuado refuerzo a cortante, se puede incluso llegar a duplicar la capacidad de los elementos conectados, así como también aumentar su comportamiento dúctil. En esta aplicación el laminado se orienta transversalmente, de forma similar a las barras inclinadas o los estribos de acero que se utilizan en el hormigón armado tradicional (véase Figura 3.3 inferior-derecha).

Los laminados pueden abrazar los pilares para proporcionar una capacidad adicional a cortante con el fin de aumentar la resistencia a cargas sísmicas, cargas de viento o movimientos de elementos contiguos, por ejemplo debidos a la fluencia y contracción de estos elementos. La envoltura en "U" consiste en abrazar los lados y la parte inferior de la sección con el objetivo de aumentar la resistencia a cortante de la viga en las zonas sometidas a altos esfuerzos a cortante (véase Figura 3.4).



Figura 3.4: Ejemplos de varios tipos de aplicación de refuerzo a cortante.

3.4. Ventajas y desventajas del refuerzo FRP

La decisión de reforzar una estructura, en general, depende de una decisión política acerca del alargamiento de la vida de la estructura, del interés arquitectónico, del nuevo uso de la misma, etc. Ahora bien, una vez se ha decidido reforzar se debe tomar la decisión de cómo se hace. Para poder elegir con criterio técnico-económico y comparar con las soluciones tradicionales es necesario conocer las ventajas y desventajas que actualmente presentan las soluciones con FRP.

La fibra de carbono es el material compuesto resistente que tiene unas propiedades mecánicas comparables al acero. Los compuestos de fibra de carbono tienen un límite elástico mayor que el acero y una densidad mucho menor (véase Tabla 3.2). Estos dos datos de propiedades mecánicas conducen a que los compuestos de fibra de carbono tengan una relación

3 | El refuerzo de estructuras de hormigón con laminados de *FRP* según la *FIB*

resistencia/peso mejor que el acero. En el caso de otro tipo de fibras, por ejemplo vidrio, la capacidad última podría ser también comparable a la del acero pero su rigidez es mucho menor.

Material	Módulo elástico (GPa)	Límite elástico a compresión (MPa)	Límite elástico a tracción (MPa)	Densidad (kg/m ³)
Hormigón	20 - 40	5 - 60	1 - 3	2400
Acero	200 - 210	240 - 690	240 - 690	7800
Fibra de carbono	200 - 800	–	2500 - 7500	1750 - 1950

Tabla 3.2: Propiedades mecánicas medias.

El bajo peso de los compuestos hace que la manipulación y la instalación de los mismos sean significativamente más fáciles que la solución equivalente con acero. Esto es particularmente importante cuando se aplica el refuerzo en zonas de difícil acceso, donde es necesaria la manipulación manual o con sistemas de carga muy ligeros. De esta manera se reduce el riesgo de lesiones y accidentes aumentando la seguridad de los trabajadores. Por el contrario las soluciones con acero siempre requieren de sistemas de apoyo para el manejo de cargas y entibaciones temporales. Estos factores son muy importantes de cara a la reparación de puentes, ya que se trata de un material muy fácil y rápido de instalar y esto supone una reducción del tiempo de cierre de autopistas o carreteras. En Suiza el mercado de los materiales *FRP* para puentes ya supone un 90%, dejando en segundo término el acero.

Generalmente no son necesarias uniones ni anclajes entre componentes de *FRP* y el sustrato, y esto es especialmente importante de cara a no dañar el propio material. El adhesivo o la propia resina del compuesto (para la solución con textiles) garantizan la unión con el hormigón y no es necesario perforar el material compuesto para introducir anclajes mecánicos.

El material compuesto no necesita juntas. Las piezas se colocan directamente sobre el hormigón en toda su longitud. Incluso es posible superponer diferentes láminas de compuesto; es una solución muy competitiva, por ejemplo, cuando se deba reforzar bidireccionalmente. El bajo espesor del material permite que los recrecidos no alteren significativamente el aspecto superficial en cuanto a nivelación y grosores.

Una gran ventaja del material compuesto es su adaptabilidad a la superficie. Especialmente en el caso de las soluciones con textiles *in situ*. Las superficies curvas, las irregularidades, etc. se pueden incorporar al material compuesto que se adapta a la geometría del hormigón. En el caso de cúpulas, o arcos la solución es muy competitiva con respecto al acero.

Los materiales, fibras y resinas, tienen una alta durabilidad si están bien fabricados y requieren de muy poco mantenimiento. Si en servicio resultan dañados, es relativamente fácil repararlos añadiendo una nueva capa. El uso de compuestos de fibras no conlleva significativamente el incremento de peso de la estructura ni de las dimensiones del elemento.

En términos medioambientales de impacto y sostenibilidad, los estudios demuestran que la energía requerida para producir materiales *FRP* es menor que otros materiales convencionales. Esto también se debe a que es un material ligero, y en el transporte causa el mínimo impacto.

La principal desventaja del refuerzo exterior de estructuras con compuestos de fibras es el riesgo de incendio, vandalismo o daños accidentales; a menos que el refuerzo esté protegido. Una preocupación particular para los puentes que cruzan carreteras es el riesgo de que vehículos de gran altura puedan golpear el refuerzo. Los daños producidos pueden reducir el factor de seguridad y en el peor de los casos producir el colapso.

A pesar de que los compuestos no sufren corrosión y no son fácilmente atacables, no hay estudios ni experiencias que hablen de los compuestos de fibra a largo plazo, y por tanto, en este sentido la durabilidad real es desconocida. Esto puede ser una desventaja de cara al diseño con una estimación de larga vida.

El mayor inconveniente de los refuerzos *FRP* es el alto coste del material. No obstante, es un problema de economía de escala. A mayor uso, mayor producción y reducción de costes. Además, según el tipo de proyecto, el coste puede ser muy similar en comparación con el acero, sobre todo si se toma en cuenta el ciclo de vida a largo plazo y se incluyen los costes de mantenimiento.

Una de las desventajas de cara a los clientes es la poca experiencia de aplicaciones y la calificación de los operadores que deben llevar a cabo los trabajos. Por otro lado, el uso de materiales orgánicos y la emisión de sustancias tóxicas pueden representar riesgos importantes para la salud de los trabajadores aplicadores. En este sentido es muy importante disponer de las hojas técnicas de los materiales donde aparecen los riesgos y se explican las medidas de seguridad necesarias para una correcta manipulación. Las soluciones con materiales preconformados reducen de forma drástica los riesgos sobre los trabajadores ya que solo se manipula el adhesivo y no la confección de toda la pieza.

Por último, cabe mencionar las dificultades que se encuentran para diseñar mediante normativas nacionales o internacionales. La no existencia de normativas reconocidas limita la aplicación de los materiales.

3.5. Modos de colapso del refuerzo

Mediante el refuerzo exterior con *FRP* se obtiene un incremento significativo de la capacidad de carga última de vigas de hormigón, tanto para flexión como para cortante. Dado que los laminados están adheridos en superficie, se pueden producir fallos mecánicos que no existen en las vigas tradicionales de hormigón armado. Por ejemplo los fallos por despegue o el arrancamiento superficial del hormigón.

En el caso de flexión, los laminados se aplican sólo en la superficie inferior de tracción, los fallos por despegue pueden limitar la completa utilización de la capacidad a flexión de las vigas de hormigón reforzadas. Las investigaciones [14] han demostrado que las vigas de hormigón así reforzadas sufren un número determinado de modos de colapso (véase Figura 3.5).

Es posible clasificar los colapsos en dos grandes categorías:

(a) **Fallo por interacción completa del compuesto:**

1. El laminado de *FRP* adherido y traccionado sufre una rotura. Suele ir precedido por el colapso del acero del armado.

2. El hormigón se fisura en la cabeza de compresiones y sufre aplastamiento.
 3. El hormigón se fisura a cortante y colapsa.
- (b) **Fallo por rotura o despegue del laminado:**
4. Despegues de esquinas de la lámina sin la formación de fisuras de cortante asociadas.
 5. Hormigón con formación de fisuras horizontales, propagadas desde la esquina, en una capa intermedia entre el laminado externo y el acero traccionado.
 6. Laminado de flexión despegado en la región donde la curva de momentos es máxima.
 7. Despegue de esquina por la formación de una fisura de cortante.

En el caso de cortante los modos de fallo son los siguientes [15, 17]:

- (a) **Despegue del laminado:**
8. La pieza de hormigón falla a cortante y se genera una fisura inclinada que provoca el despegue del laminado.
- (b) **Rotura parcial del laminado:**
9. La pieza de hormigón falla a cortante y se genera la fisura inclinada. La deformación en el laminado, según la dirección de la diagonal de tensión, crece hasta provocar la rotura de las fibras.

3.6. Decisión estratégica en el refuerzo de una estructura

Todas las estructuras se proyectan para una vida finita, lo que se llama la vida útil, el plazo de tiempo durante el cual van a dar servicio. Factores ambientales o de uso pueden acelerar la degradación de la estructura y reducir considerablemente su vida útil. El mantenimiento es una actividad indispensable que cumple un doble objetivo. Por un lado sirve como diagnóstico y permite la detección de patologías incipientes que pueden acelerar la degradación de la estructura. Por otro lado, sirve para paliar los efectos adversos de las sollicitaciones mediante actuaciones que ralentizan la degradación de la estructura y le permiten llegar al final de su vida útil con un nivel de prestación aceptable. En general, las actuaciones de mantenimiento no comportan el refuerzo de la estructura.

A lo largo del tiempo, las condiciones de servicio de la estructura pueden variar. Por ejemplo, la ampliación de carriles en un puente, convertir un edificio de viviendas en oficinas, realizar una remonta, variar la actividad industrial hacia ambientes más corrosivos, aumentar el tráfico en una carreta, etc. En estos casos existe un aumento de sollicitaciones mecánicas o ambientales que exige una mejora del nivel de prestación de servicio de la estructura. Por lo tanto, el refuerzo de la estructura será necesario si hay un potencial riesgo de sufrir deformaciones importantes y se llega a los límites de servicio o bien si existe peligro de superar un estado límite último de resistencia. Una decisión puede ser demoler la presente estructura y

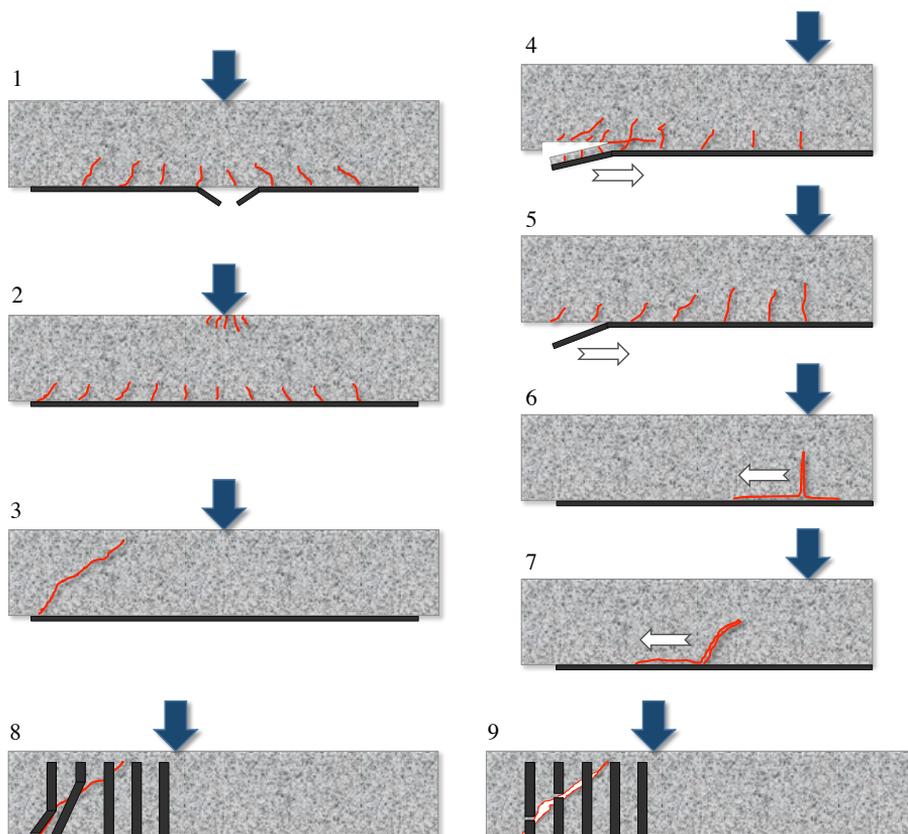


Figura 3.5: Modos de colapso a flexión (1-7) y cortante (8-9) de las vigas reforzadas con FRP.

edificar una nueva, la alternativa es el refuerzo. La decisión se basará en un equilibrio entre los factores económicos (coste comparativo) y políticos (interés cultural, sostenibilidad, etc.).

Si se opta por el refuerzo se puede ejecutar una restauración que devuelve el nivel de prestación al estado prístino de la estructura; o bien una rehabilitación que aumentaría las capacidades estructurales iniciales. Únicamente, en estos dos casos se produce el refuerzo de la estructura. Hay varias técnicas a utilizar en el refuerzo de estructuras; por ejemplo, incrementar el tamaño de los elementos o añadir una nueva estructura complementaria del refuerzo. En estos casos, se produce una afectación arquitectónica relevante que puede interferir en la funcionalidad de la edificación o redundar en un desagradable buñuelo estético.

Antes de tomar alguna decisión estratégica sobre el tipo de refuerzo conviene plantear algunas cuestiones y valorar realmente las necesidades de la estructura:

- Es necesaria una inspección de detalle que evalúe el grado de seguridad de la estructura. El punto de partida es relevante para garantizar una solución efectiva.
- La necesidad de refuerzo suele ser imperante si hay un cambio de usos o un aumento de las cargas. También si existe riesgo de daño relevante y posterior colapso estructural.

- El refuerzo en edificación y en obra pública viene condicionado por el espacio arquitectónico o por los gálibos de la infraestructura. Estos condicionantes geométricos pueden ser determinantes para definir el sistema de refuerzo.
- Las condiciones de obra son un factor a tener en cuenta. Por ejemplo, en una edificación suele ser difícil manipular y mover pesos importantes como pilares y jácenas metálicas. En el caso de la obra civil, el tiempo de ejecución puede ser un factor determinante.
- Finalmente, el criterio económico determinará la viabilidad de la solución. A pesar de que el refuerzo con *FRP* es, en estos momentos de mercado, más caro en materiales, la velocidad de ejecución y la durabilidad hacen que sea competitivo a largo plazo.

3.7. Bases de diseño de refuerzo *FRP* a flexión

3.7.1. Generalidades

Los refuerzos con laminados de *FRP* para elementos de hormigón se deben disponer en las zonas de flexión. Los laminados se deben colocar en la dirección paralela a las fibras sometidas a tracción. El análisis para el estado límite último a flexión se basa en:

- La contribución del refuerzo *FRP* externo.
- El correcto funcionamiento estructural del vínculo entre el hormigón y el *FRP*.

En la Figura 3.6 se representan las curvas ideales de tensión-deformación de los materiales hormigón, acero y *FRP*. El comportamiento de los materiales y la hipótesis que no existe un deslizamiento relativo entre el *FRP* y el hormigón constituyen la base para el análisis del refuerzo en ELU (Estado Límite Último). Dado que los espesores de los adhesivos son del orden de 1,0 - 1,5 mm, los fenómenos viscoelásticos como la fluencia de corte axial y interlaminar así como la relajación, pueden ser ignorados.

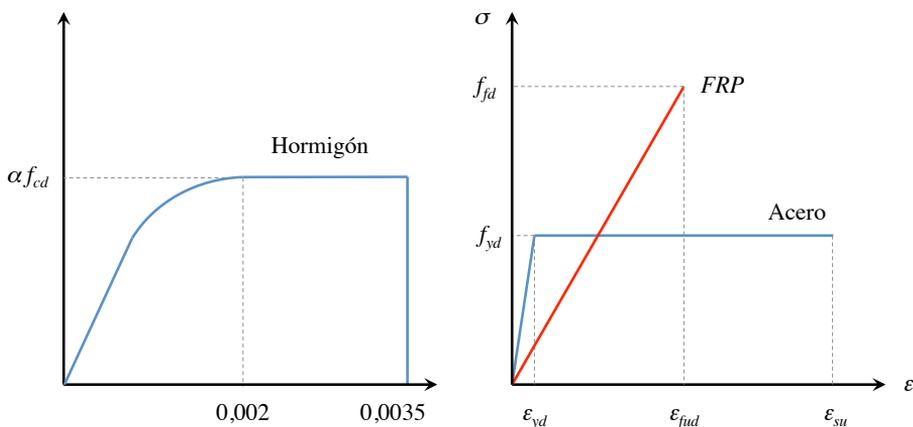


Figura 3.6: Curvas ideales de comportamiento de los materiales.

A continuación se hace un resumen de los puntos más destacables del diseño a flexión y cortante de refuerzos con laminados *FRP* en base a la Normativa Europea [4] y el *FIB Bulletin* [6], y se complementa con observaciones y experimentos realizados por el grupo de investigación CER-LITEM BarcelonaTECH.

3.7.2. Modos de colapso - Estados Límites Últimos

Según la normativa, los modos de fallo relevantes en un elemento de hormigón reforzado a flexión con *FRP* se dividirán en dos clases:

- **Acción compuesta completa**

Se produce cuando el hormigón y el *FRP* trabajan conjuntamente. En este caso, la sección transversal es una sección compuesta y la sección funciona hasta que el hormigón llega a la rotura por compresión o el *FRP* falla en tensión. También juega un papel relevante el acero del armado.

- **Pérdida de la acción compuesta**

Se produce en aquellos casos en los que la acción compuesta de los materiales se pierde antes de llegar al fallo del tipo anterior, por ejemplo, debido al despegue del *FRP*.

A continuación se describen los posibles escenarios de colapso.

3.7.2.1. Acción compuesta completa

(a) **Plastificación del acero y aplastamiento del hormigón**

En este caso, la resistencia máxima a la flexión puede ser alcanzada mediante la plastificación de la armadura a tracción hasta alcanzar el aplastamiento del hormigón en la zona de compresión. El *FRP* seguirá estando dentro del rango elástico sin llegar a la rotura.

(b) **Plastificación del acero seguido de una fractura del *FRP***

Para ratios bajos de acero y de *FRP*, el fallo a la flexión puede darse con la plastificación de la armadura de tracción seguido por una fractura en tensión del *FRP*.

(c) **Aplastamiento del hormigón**

Para ratios altos de refuerzo, el fallo del elemento de hormigón armado puede ser debido al aplastamiento a compresión del hormigón antes de que plastifique el acero o rompa el *FRP*. Este modo es frágil y ciertamente indeseable.

3.7.2.2. Pérdida de la acción compuesta

La adhesión es necesaria para transferir fuerzas del hormigón al *FRP*, por tanto, los modos de fallo de adhesión son cruciales. Los despegues en zonas localizadas comportan un fallo local en la adhesión entre el hormigón y el *FRP*. En este caso la reducción en la resistencia de adhesión entre el hormigón y el refuerzo *FRP* está limitada a una área reducida. Por tanto,

3 | El refuerzo de estructuras de hormigón con laminados de *FRP* según la *FIB*

el despegue localizado no es en sí un modo de fallo, ni tiene porque causar una pérdida de la capacidad de carga de un elemento con *FRP*. No obstante, cuando las adhesiones localizadas se propagan, la acción compuesta se pierde y el refuerzo de *FRP* no es capaz de soportar mayores cargas. Este fallo se denomina despegue (*peeling-off*). Si no hay una redistribución de tensiones desde el refuerzo exterior de *FRP* al refuerzo integrado, es posible que el despegue provoque una rotura repentina y frágil del elemento estructural.

A continuación se van a analizar los tipos de fallos en la interfase entre los materiales.

(a) Fallos en las interfaces

El fallo por despegue puede producirse en diferentes interfaces entre el hormigón y el refuerzo de *FRP*, como se describe a continuación (véase Figura 3.7).

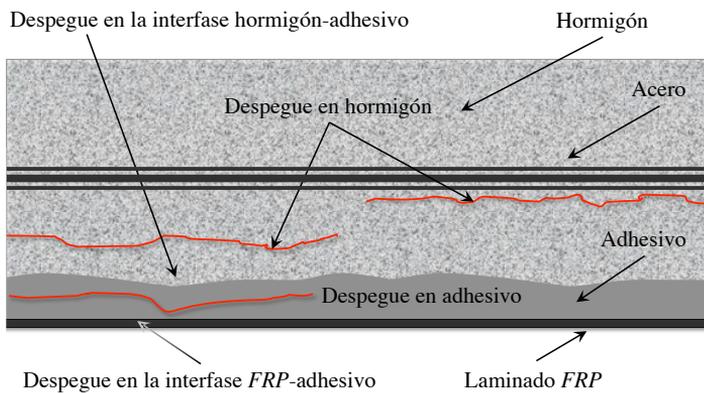


Figura 3.7: Modos de fallo por pérdida de adhesión entre el hormigón y el *FRP*.

■ Despegue en el hormigón próximo a la superficie o a lo largo de una capa debilitada

Como la resistencia a tracción y a cortante del adhesivo (resina epoxy) suele ser mayor que la resistencia a tracción y cortante del hormigón, el fallo se producirá normalmente en el hormigón. En este caso una fina capa de hormigón (unos pocos milímetros de espesor) permanecerá en el refuerzo de *FRP*.

■ Despegue del adhesivo, fallada de cohesión

El despegue puede producirse a través del adhesivo si su resistencia cae por debajo de la del hormigón (por ejemplo, a altas temperaturas o cuando la resistencia del hormigón es inusualmente alta).

■ Despegue en las interfaces entre hormigón y adhesivo o entre adhesivo y *FRP* (fallo de adhesión)

Estos fallos se producirán sólo si no hay suficiente preparación de superficie durante el proceso de aplicación del *FRP*, porque la resistencia de cohesión de las resinas epoxy es más baja que la resistencia de adhesión.

■ **Pérdida de adherencia en el propio FRP (fallo interlaminar a cortante)**

Como el *FRP* es en sí mismo un material compuesto la pérdida de adhesión podría producirse también en el interior *FRP*, por pérdida de unión entre las fibras y la resina. Este mecanismo de fallo se producirá una vez que la propagación de la grieta en el *FRP* sea enérgicamente más conveniente que en el hormigón. Este podría ser el caso con hormigones de elevada resistencia. No obstante, el fallo interlaminar es un modo de fallo secundario, que se produce después de que la rotura adhesiva se ha iniciado en el hormigón, y por tanto, normalmente no se considera.

(b) **Comportamiento de la unión con adhesivo**

El comportamiento del adhesivo entre el *FRP* adherido externamente y el hormigón, puede ser analizado en ensayos de adhesión, tal y como se ilustra en el esquema simplificado e imagen de la Figura 3.8 de un ensayo de ensayo doble cortante. Para niveles de carga bajos las tensiones tangenciales están principalmente concentradas cerca del extremo cargado, pero como la carga se incrementa, las tensiones se mueven hacia el extremo descargado. A diferencia del ensayo simplificado de adhesión, la distribución exacta en el caso del elemento reforzado a flexión está influenciada por el área adhesiva, así como las tensiones normales perpendiculares, las cuales son causadas por los efectos de flexión.

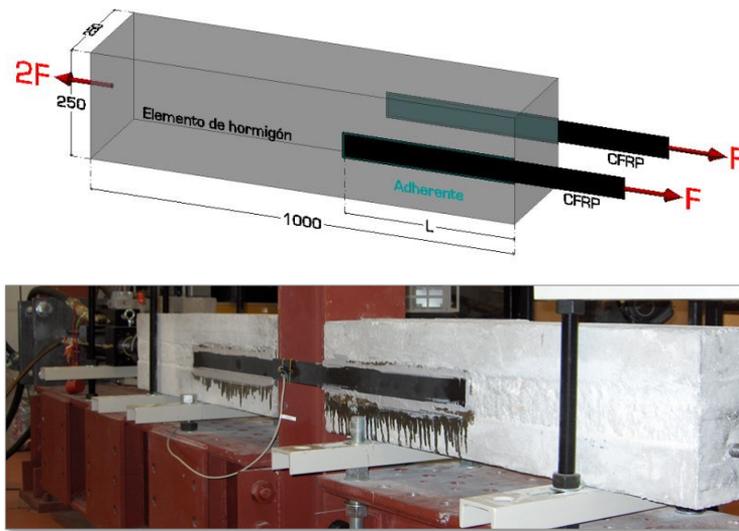


Figura 3.8: Esquema e imagen del ensayo de doble cortante para determinar la adhesión entre el *FRP* y el hormigón.

El comportamiento del adhesivo entre el hormigón y el refuerzo viene caracterizado por la relación cortante-desplazamiento (*shear-slip*). La transferencia del esfuerzo de corte se hace a expensas de una deformación en el adhesivo y por lo tanto, se produce un deslizamiento relativo entre el *FRP* y el hormigón. Para los casos de diseño, el comportamiento cortante-desplazamiento puede ser simplificado y modelado de acuerdo a varios grados de complejidad [4].

(c) Fallos por despegue del refuerzo de *FRP*

Muchos colapsos en los elementos reforzados con *FRP* presentan el despegue del elemento *FRP*. Por ello, a continuación nos centraremos en los modos de fallo del laminado y su relación con la viga de hormigón armado. Dependiendo del punto de inicio del proceso de despegue, se pueden identificar los siguientes modos de colapso (véase Figura 3.9):

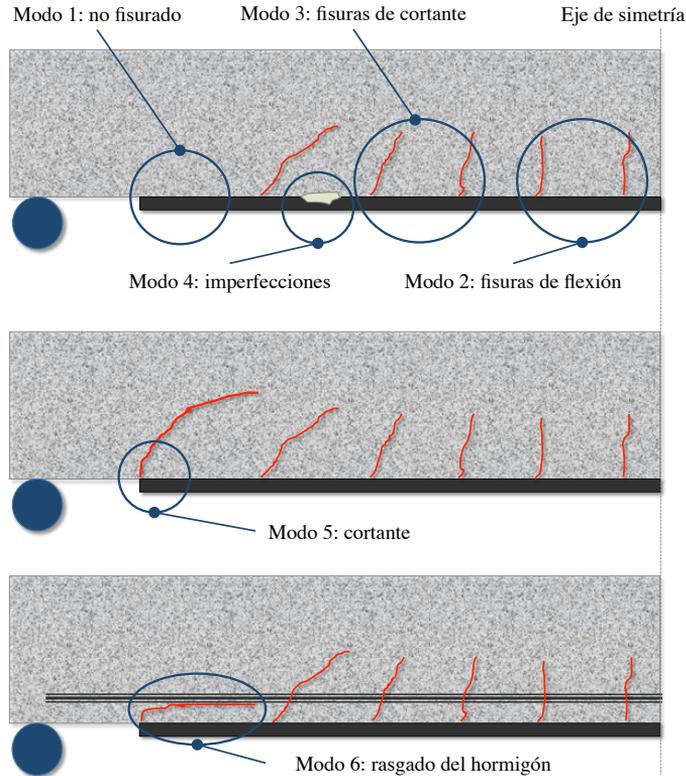


Figura 3.9: Modos de fallo por despegue del laminado de refuerzo.

- **Modo 1: Despegue del anclaje en la zona no fisurada.** El *FRP* puede despegarse en la zona de anclaje como resultado de una fractura del adhesivo a partir de la fisura extrema de cortante que se propaga en el hormigón.
- **Modo 2: Despegue causado por grietas a flexión.** La flexión produce fisuras perpendiculares a la directriz, especialmente en el centro de la viga, las zonas de máximo momento flector. Estas fisuras pueden propagarse horizontalmente en la unión entre el *FRP* y el hormigón y así causar el despegue del *FRP* en regiones alejadas del anclaje. Este despegue puede llegar a propagarse hasta hacer saltar todo el laminado.
- **Modo 3: Despegue causado por grietas de cortante.** La fisuración a cortante en el hormigón aparece en forma de fisuras inclinadas, en general aparecen en las zonas cercanas a los soportes, aunque ésto depende de la distribución de esfuerzos en la viga.

Estas fisuras pueden crear el despegue en la unión *FRP* - hormigón. El armado de cortante es fundamental para controlar el crecimiento de dichas fisuras y así limitar el pernicioso despegue del *FRP*.

- **Modo 4: Despegue causado por imperfecciones en la superficie del hormigón.** Las imperfecciones o rugosidad de la superficie del hormigón puede conllevar a pérdidas de adhesión del *FRP*. La discontinuidad puede generar tensiones locales y crear una fisura que tienda a propagarse y a causar el despegue.
- **Modo 5: Despegue por cortante en el extremo.** Cuando las láminas adhesivas de *FRP* quedan a una cierta distancia de los soportes, como en la mayoría de los casos de aplicaciones de refuerzo, en la zona próxima al borde del refuerzo puede crecer una grieta ligeramente vertical y posteriormente evolucionar como una grieta inclinada de cortante. En el extremo de la grieta se inicia la fractura en las interfases y el *FRP* se desprende.
- **Modo 6: Rasgado del hormigón por cortante.** En el caso anterior, gracias a los estribos internos, la grieta de cortante puede ser detenida. Entonces, el laminado adherido se puede ver separado del hormigón al nivel del armado longitudinal en forma de desprendimiento del hormigón. Este modo de colapso denomina rasgado (*rip-off*) del hormigón.

3.8. Análisis en Estado Límite Último de flexión

Una vez formuladas las hipótesis acerca del comportamiento de los materiales y los posibles modos de colapso del refuerzo de flexión, se procede a formular el método de diseño para laminados de *FRP*. Se distinguirán dos posibles modos de trabajo. La acción compuesta completa, en este caso el refuerzo y la estructura original trabajan de forma solidaria. Este es el modo de trabajo deseable para el diseñador. Cuando el contacto entre materiales no es perfecto y se pierde la acción compuesta, se inician modos de trabajo donde el rendimiento del refuerzo baja considerablemente. En este último caso aparecen los mecanismos de fallo que pueden conducir a la rotura del refuerzo.

3.8.1. Situación inicial

El refuerzo se coloca en estructuras que ya están en servicio a flexión (véase Figura 3.10). Por lo tanto, el efecto de las cargas iniciales sobre la estructura debe ser considerado en el cálculo. Supuesto el momento de servicio M_0 , sin aplicar factores de seguridad en las cargas, se debe comparar con el momento de fisuración de la sección M_{cr} . En general, M_0 será mayor que M_{cr} y por lo tanto, el análisis del refuerzo deberá hacerse sobre una sección fisurada. Si M_0 es inferior al momento de fisuración su influencia será negligible en el cálculo.

Se puede obtener la profundidad de la fibra neutra x_0 mediante la ecuación de equilibrio de esfuerzos entre las resultantes de la cabeza comprimida y la armadura traccionada según

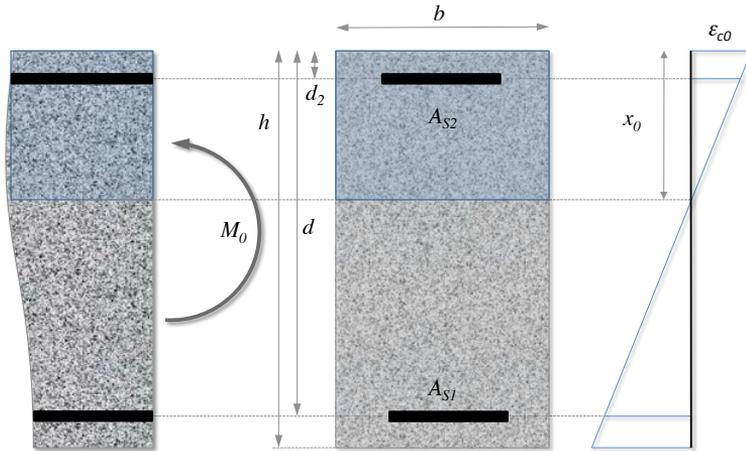


Figura 3.10: Sección compuesta sin refuerzo sometida a flexión (izquierda). Campo de deformaciones (derecha).

procedimiento clásico de cálculo de estructuras de hormigón [4, 5]:

$$\frac{1}{2}bx_0^2 + (\alpha_s - 1)A_{s2}(x_0 - d_2) = \alpha_s A_{s1}(d - x_0) \quad (3.1)$$

siendo A_{s1} y A_{s2} el área de las armaduras a tracción y compresión, respectivamente, y

$$\alpha_s = \frac{E_s}{E_c} \quad (3.2)$$

la relación entre los módulos elásticos del acero E_s y el hormigón E_c ; b el ancho y d , d_2 los cantos útiles de la sección. La deformación en la fibra superior se expresa según:

$$\varepsilon_{c0} = \frac{M_0 x_0}{E_c I_{c0}} \quad (3.3)$$

siendo I_{c0} la inercia de la sección homogeneizada no reforzada; dicha inercia fisurada se expresa como:

$$I_{c0} = \frac{bx_0^3}{3} + (\alpha_s - 1)A_{s2}(x_0 - d_2)^2 + \alpha_s A_{s1}(d - x_0)^2 \quad (3.4)$$

Exigiendo la compatibilidad de deformaciones en la sección plana se obtiene:

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_{c0} \frac{h - x_0}{x_0} \quad (3.5)$$

Con esta última ecuación se determina la deformación ε_0 en la fibra inferior, donde tiene que adherirse el *FRP*. Esta deformación representa un estado inicial que deberá tenerse en cuenta en el momento del análisis del ELU.

3.8.2. Acción compuesta completa

(a) **Plastificación del acero seguido del aplastamiento del hormigón**

En este tipo de colapso el diseño de la sección reforzada frente a flexión se calcula en base a los principios de diseño del hormigón armado. El *FRP* se puede interpretar como una armadura adicional. La profundidad del eje neutro, x , está calculada a partir de la compatibilidad de deformaciones y del equilibrio de tensiones entre materiales. El momento de diseño se puede obtener por una ecuación de equilibrio de momentos. Este análisis debería tener en cuenta que el elemento de hormigón armado puede tener unas cargas iniciales cuando el refuerzo se lleve a cabo y por tanto, debería considerarse una deformación inicial ϵ_0 en el extremo de la fibra de tracción (véase Figura 3.11).

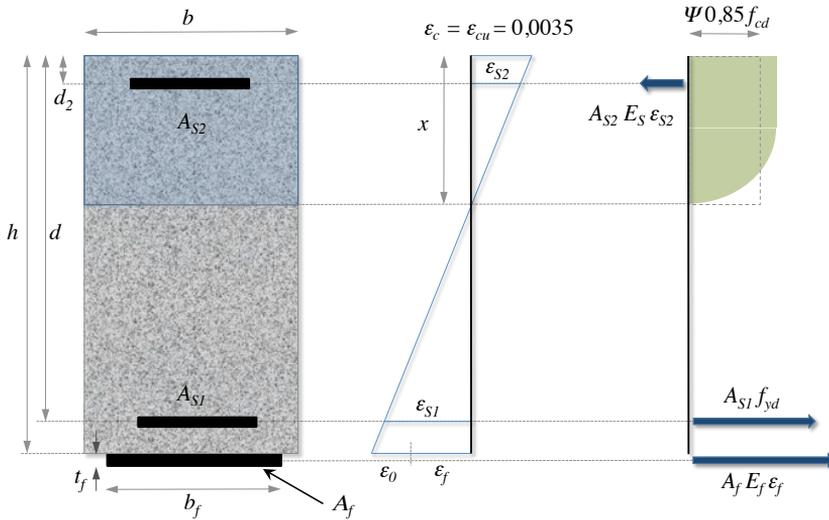


Figura 3.11: Distribución de deformaciones y tensiones en la sección transversal.

La capacidad del momento flector de diseño M_{Rd} se puede determinar mediante el cálculo de la profundidad del eje neutro x :

$$0,85\Psi f_{cd}bx + A_{s2}E_s\epsilon_{s2} = A_{s1}f_{yd} + A_f E_f \epsilon_f \quad (3.6)$$

donde $\Psi = 0,8$ y

$$\epsilon_{s2} = \epsilon_{cu} \frac{x - d_2}{x} \quad (3.7)$$

$$\epsilon_f = \epsilon_{cu} \frac{h - x}{x} - \epsilon_0 \quad (3.8)$$

Finalmente, la capacidad del momento flector de diseño es:

$$M_{Rd} = A_{s1}f_{yd}(d - \delta_G x) + A_f E_f \epsilon_f (h - \delta_G x) + A_{s2}E_s\epsilon_{s2}(\delta_G x - d_2) \quad (3.9)$$

donde $\delta_G = 0,4$ y f_{yd} es la resistencia de diseño del acero.

Para que las ecuaciones anteriores sean válidas es necesario comprobar la existencia de plastificación en la armadura (ecuación 3.10) y que la deformación en el laminado de *FRP*

sigue dentro del rango elástico (ecuación 3.11).

$$\varepsilon_{s1} = \varepsilon_{cu} \frac{d-x}{x} \leq \frac{f_{yd}}{E_s} \quad (3.10)$$

$$\varepsilon_f = \varepsilon_{cu} \frac{h-x}{x} - \varepsilon_0 \leq \varepsilon_{fud} \quad (3.11)$$

(b) **Plastificación del acero seguido de una fractura del *FRP***

El modo de fallo provocado por la plastificación del acero y la rotura del *FRP* es teóricamente posible. De hecho, sería el más deseable porque ambos materiales habrían dado su máxima capacidad portante. No obstante, es muy probable que el despegue prematuro del *FRP* preceda a la fractura del *FRP* y por lo tanto, este mecanismo difícilmente se activará.

La formulación sería la misma para las ecuaciones 3.6 y 3.9, pero la deformación en el hormigón no estaría en el valor último y sería necesario reemplazar ε_{cu} por ε_u . Por contra, la deformación en el laminado llegaría a su estado último y ε_f se convertiría en ε_{fud} . Los valores de Ψ y δ_G se tomarían de las expresiones siguientes:

$$\Psi = \begin{cases} 1000\varepsilon_c \left(0,5 - \frac{1000}{12}\varepsilon_c \right) & \text{para } \varepsilon_c \leq 0,002 \\ 1 - \frac{2}{3000\varepsilon_c} & \text{para } 0,002 \leq \varepsilon_c \leq 0,0035 \end{cases} \quad (3.12)$$

$$\delta_G = \begin{cases} \frac{8 - 1000\varepsilon_c}{4(6 - 1000\varepsilon_c)} & \text{para } \varepsilon_c \leq 0,002 \\ \frac{1000\varepsilon_c(3000\varepsilon_c - 4) + 2}{2000\varepsilon_c(3000\varepsilon_c - 2)} & \text{para } 0,002 \leq \varepsilon_c \leq 0,0035 \end{cases} \quad (3.13)$$

3.8.3. Pérdida de la acción compuesta

Tal y como se ha comentado, existen mecanismos de fallo asociados al despegue del laminado que limitan la capacidad portante conjunta de todos los materiales.

(a) **Despegue causado por fisuras a cortante**

Las fisuras a cortante en elementos de hormigón son inclinadas. Aunque el desplazamiento horizontal durante la apertura de fisura puede considerarse como más relevante porque induce tensiones directas en la capa de hormigón entre el *FRP* y la armadura de acero, el inicio del despegue dependerá de una serie de parámetros, incluyendo los siguientes:

- Desplazamiento vertical de la apertura de fisura
- La rigidez a flexión y a cortante del *FRP*
- La resistencia del hormigón

El modelo de Blaschko [2] propone que el despegue por fisuras de cortante puede ser prevenido limitando la acción de fuerzas de cortante a la resistencia V_{Rd1} de elementos de

hormigón armado sin refuerzo a cortante (aproximación [4]). Se deben introducir las siguientes modificaciones para una resistencia a cortante característica del hormigón τ_{Rk} y para el ratio de refuerzo longitudinal equivalente ρ_{eq} .

$$\tau_{Rk} = 0,15f_{ck}^{\frac{1}{3}} \quad (3.14)$$

$$\rho_{eq} = \frac{A_s + A_f \frac{E_f}{E_s}}{bd} \quad (3.15)$$

Si la capacidad de cortante está en entredicho será necesario un refuerzo adicional. Basado en resultados experimentales, en [6] se presenta el valor de la resistencia a cortante como $V_{Rp} = \tau_{Rp}bd$, con un valor característico de resistencia a cortante de $\tau_{Rk} = 0,38 + 151\rho_{eq}$ (MPa).

(b) El despegue en la zona de anclaje y las fisuras de flexión

El tratamiento del despegue en el anclaje final y por las fisuras de flexión se puede hacer de acuerdo a varios criterios, que se describen brevemente a continuación.

■ Verificación del anclaje final. Limitación de la tensión en el FRP

Esta aproximación implica dos pasos independientes: el primero, verificar el anclaje final basándose en las tensiones de cortante y la ley constitutiva de deslizamiento en la interfaz FRP-hormigón. Para ello, se debe aplicar en segunda etapa una limitación sobre las tensiones en el FRP para asegurar que el colapso del adhesivo no sea prematuro. En particular, este procedimiento se ha seguido hasta ahora con una serie de directrices de proyectos diseño, debido principalmente a su simplicidad. Pero hay que ser conscientes que representa una simplificación del comportamiento real, ya que la tensión del FRP correspondiente al colapso del adhesivo no es un valor fijo. Dicho valor depende de una serie de parámetros donde se incluyen la relación momento-cortante, la tensión en el armado y la distribución de las grietas.

■ Verificación del anclaje final y la transferencia de fuerza del FRP-hormigón

De acuerdo con esta aproximación se deberían seguir igualmente dos etapas independientes. Primero, el anclaje final debería ser verificado basándose en el esfuerzo de cortante (ley constitutiva de deslizamiento en la interfaz FRP-hormigón). Posteriormente, debería ser verificado que el esfuerzo cortante a lo largo de la interfaz se mantiene por debajo de un valor crítico (la resistencia a cortante del hormigón). Una desventaja de esta aproximación es que se aplica el mismo tratamiento del despegue para zonas próximas al anclaje y para zonas centrales del refuerzo. Otra desventaja es que la aproximación se basa en la distribución de esfuerzos para una viga homogénea, no fisurada. No obstante, la simplicidad de la aproximación permite una aplicación fácil en problemas reales.

■ Verificación de acuerdo con la línea envolvente de las tensiones en el FRP

En esta aproximación el despegue se trata de forma unificada tanto en el anclaje final como en cualquier punto a lo largo de la interfaz FRP-hormigón basándose en el

3 | El refuerzo de estructuras de hormigón con laminados de FRP según la FIB

esfuerzo de cortante de la interfaz, según la ley del deslizamiento y con la línea envolvente de las tensiones en el FRP. La principal ventaja de esta aproximación es que el despegue y las grietas de flexión son tratados con el mismo modelo, mientras que la principal desventaja es que su complejidad hace difícil su aplicación en un modelo práctico de ingeniería.

(b) Fallo final de cortante

Siguiendo las líneas del *Model Code* [4] se puede emplear el concepto de envergadura de cortante ficticia para calcular la resistencia a cortante de vigas, ilustrado en la Figura 3.12.

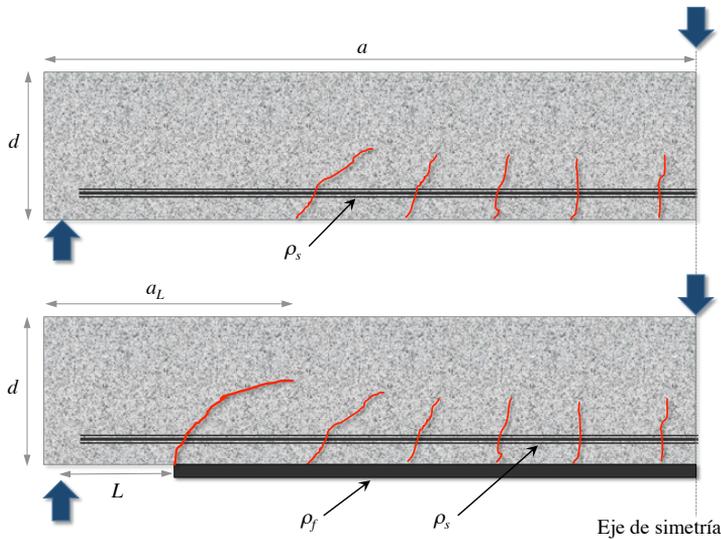


Figura 3.12: Concepto de envergadura de cortante para una viga de hormigón y su extensión para el refuerzo FRP.

Las ecuaciones resultantes son las siguientes:

$$V_{Sd} \leq V_{Rd} = \tau_{Rd} b d \quad (3.16)$$

$$\tau_{Rd} = 0,15 \sqrt[3]{3 \frac{d}{a_L} \left(1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \right) \sqrt[3]{100 \rho_s f_{ck}}} \quad (3.17)$$

$$a_L = \sqrt[4]{\frac{(1 - \sqrt{\rho_s})^2}{\rho_s} d L^3} \quad (3.18)$$

$$a > L + d, \quad a_L < a \quad (3.19)$$

En las ecuaciones de arriba L (en mm) es la distancia del final del FRP al soporte, a (en mm) es la envergadura del cortante y $\rho_s = A_{s1}/bd$.

El concepto de la envergadura ficticia del cortante proviene de una aproximación simplificada para el colapso final de cortante con *FRP*. El lector debería anotar que el modelo ha sido desarrollado basándose en el cálculo analítico de las tensiones normales y tangenciales al final del *FRP*.

(c) Despegue causado por defectos en la superficie del hormigón

La pérdida de adhesión en el *FRP* debido a los defectos en la superficie que generan un cambio de nivel (véase Figura 3.13) es un mecanismo de colapso que no ha sido estudiado en profundidad. La evidencia experimental sugiere que el mecanismo puede ser evitado adoptando determinadas normas de buenas prácticas durante la ejecución y limitando la rugosidad en la superficie del hormigón. Muchas de estas limitaciones se refieren a rugosidades máximas del hormigón sobre una longitud dada y depende del tipo de *FRP* y dimensiones (por ejemplo espesores). En las especificaciones de los fabricantes de sistemas de refuerzo para *FRP* suelen darse los detalles específicos.

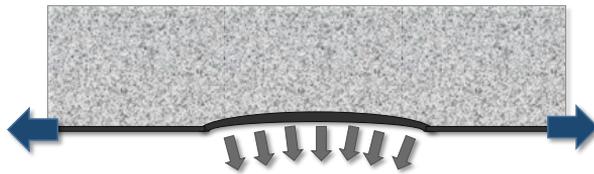


Figura 3.13: Tensiones provocadas por desniveles o defectos en la superficie.

3.9. Análisis en Estado Límite Último de cortante

Tal y como se ha señalado, el *FRP* también se puede emplear para el refuerzo de cortante mediante laminados precurados adheridos al sustrato. La orientación de las fibras de forma paralela a la dirección de las tracciones principales de la estructura es un aspecto clave para maximizar la eficacia del *FRP*, particularmente a partir de cargas superiores al 60% de la capacidad última del elemento estructural [1]. A pesar de este hecho, debido a la facilidad de ejecución, es de uso habitual instalar el refuerzo de *FRP* orientando las fibras perpendicularmente al eje longitudinal del elemento estructural (véase Figura 3.14).



Figura 3.14: Laminados adheridos para refuerzo de cortante.

Las combinaciones entre sistemas de *FRP* y configuraciones de refuerzo no están predefinidas, pero generalmente es habitual utilizar el sistema *FRP* de curado *in situ* para las

3 | El refuerzo de estructuras de hormigón con laminados de FRP según la FIB

secciones completamente envueltas o con configuración en "U", y el sistema FRP de laminados para una distribución tipo estribos mediante pegado lateral [11].

El encamisado completo es la solución más eficaz pero en general es muy difícil de aplicar y en el caso de laminados es imposible. Al estar el material preconformado no puede doblarse ni adaptarse a la forma de la sección. Por ello, la solución que siempre se adopta es la adhesión de los laminados en ambas caras laterales de la viga sin conexión entre ellos. Los refuerzos adheridos en el lateral tienen una longitud máxima de adherencia menor que los de tipo "U" y encamisados, lo que los hace más susceptibles al fallo por despegue (véase Figura 3.15).

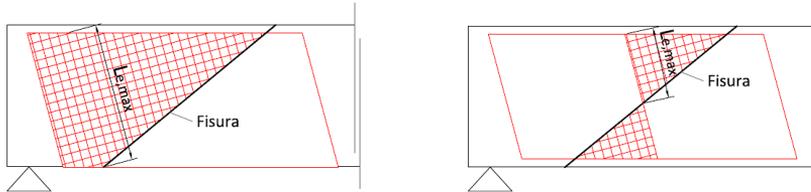


Figura 3.15: Longitud máxima de adherencia: configuración en "U" (izquierda) y pegado lateral (derecha).

El modelo de comportamiento mecánico del cortante sigue la idea de celosía desarrollado por Morsch [10] a principios del siglo XX para explicar la transmisión del esfuerzo cortante en elementos de hormigón armado (véase Figura 3.16). Por ello, el FRP se trata como si fuera un refuerzo equivalente a los estribos internos de la estructura encargados de transmitir las tracciones.

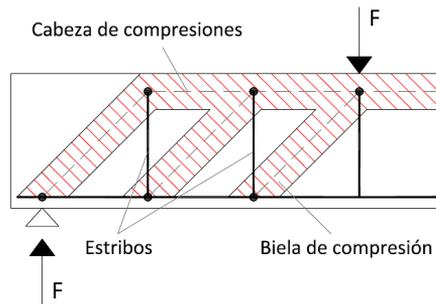


Figura 3.16: Modelo de celosía de transmisión del cortante en una viga de hormigón armado con estribos verticales.

Como consecuencia de esta hipótesis, se considera que la contribución a cortante de un refuerzo de FRP se puede determinar como un factor independiente y aditivo dentro la expresión de la resistencia a cortante de un elemento de hormigón armado:

$$V_u = V_c + V_s + V_f \quad (3.20)$$

donde V_u es la resistencia última a cortante de la viga de hormigón armado y V_c , V_s y V_f son las contribuciones del propio hormigón, del armado transversal de estribos y del refuerzo de laminado FRP, respectivamente.

A partir de los estudios experimentales [13, 16] se ha observado que la contribución del *FRP* es difícil de cuantificar. Existe una notable complejidad en el problema y es imposible hacer una descripción detallada de las variables y procesos que intervienen en los diversos mecanismos resistentes y de rotura. Asimismo, en la mayoría de dichos ensayos experimentales se ha observado que el fallo por desprendimiento del refuerzo es el típico de las configuraciones de pegado lateral.

La contribución al cortante que aporta el *FRP* se puede evaluar según:

$$V_{fd} = 0,9\varepsilon_{fd,e}E_{fu}\rho_f b_w d (\cot\theta + \cot\alpha) \sin\alpha \quad (3.21)$$

donde $\varepsilon_{fd,e}$ corresponde al valor efectivo de la deformación eficaz de diseño, b_w la anchura mínima de la sección transversal a lo largo de su canto útil, d el canto útil, ρ_f cuantía del refuerzo de *FRP* (siendo $(2t_f/b_w)(b_f/s_f)$ en el caso de laminados de espesor t_f , anchura de laminado b_f y distancia entre ejes de laminado s_f), E_{fu} el módulo elástico en la dirección de la fibra principal, θ ángulo que forman las fisuras de cortante con respecto a la directriz de la viga (en general tomar 45°) y finalmente, α ángulo entre la orientación de la fibra y la directriz de la viga (90° para laminados en vertical y $90^\circ \pm 45^\circ$ para laminados inclinados).

En la referencia [16] se analizaron más de 75 ensayos realizados y concluyeron que, para considerar el *FRP* como si fuera un refuerzo interno de la estructura y determinar su contribución a la resistencia última a cortante (V_f), era necesario considerar una deformación eficaz de diseño ($\varepsilon_{fd,e}$) con un valor menor que el de su deformación última de rotura (ε_{fu}). En concreto, para configuraciones tipo pegados laterales con *FRP* de fibras de carbono se definiría dicho parámetro según el valor mínimo de los dos siguientes:

▪ **Modo 1: limitación de despegue**

$$\varepsilon_{fd,e} = \frac{\varepsilon_{fk,e}}{\gamma_f} = \frac{1}{1,3} \cdot 0,8 \cdot 0,65 \left(\frac{f_c^{\frac{2}{3}}}{E_f \rho_f} \right)^{0,56} \cdot 10^{-3} \quad (3.22)$$

▪ **Modo 2: limitación de rotura del FRP**

$$\varepsilon_{fd,e} = \frac{\varepsilon_{fk,e}}{\gamma_f} = \frac{1}{1,3} \cdot 0,8 \cdot 0,17 \left(\frac{f_c^{\frac{2}{3}}}{E_f \rho_f} \right)^{0,30} \cdot \varepsilon_{fu} \quad (3.23)$$

donde el 0,8 de las expresiones juega el papel de coeficiente de seguridad asociado al material. Asimismo, algunos autores [8, 12, 16] recomiendan no superar un valor de deformación efectivo característico de 0,006 (sin considerar el coeficiente de minoración). El coeficiente f_c (MPa) es la resistencia a compresión del hormigón; y E_f (GPa) y ρ_f son el módulo de Young y la cuantía de refuerzo del *FRP*, respectivamente. Finalmente, ε_{fu} es la deformación última de rotura del *FRP*.

Además, se ha observado que la deformación eficaz no es un parámetro constante y que disminuye al crecer la rigidez axial del *FRP* ($E_f \rho_f$); también disminuye cuando lo hace de forma concomitante la resistencia a tracción del hormigón de la estructura reforzada. Finalmente, se ha determinado que la contribución del refuerzo a la resistencia a cortante crece

linealmente con la rigidez axial del *FRP* hasta un cierto valor límite ($E_f \rho_{flim}$), a partir del cual, los mecanismos de despegue del refuerzo hacen que la ganancia de capacidad a cortante disminuya.

Desde entonces, múltiples investigaciones han ido aportando propuestas para el cálculo de la deformación eficaz ε_{fe} , incorporándose algunas de estas expresiones en los diferentes códigos de diseño. A pesar de ello, cabe destacar que, como consecuencia de la falta de concordancia de criterios, la mayoría de las expresiones para el cálculo de ε_{fe} incluidas en las normativas no coinciden o presentan parámetros de cálculo diferentes.

3.10. Conclusiones

El refuerzo con *FRP* es una buena alternativa a las soluciones de refuerzo tradicionales. Las ventajas que ofrecen los *FRP* son muy claras: facilidad de manipulación por su peso liviano, buena capacidad portante comparable al acero y buena resistencia a los factores ambientales. Por el contrario, el precio del material a corto plazo, la menor resistencia al fuego o al vandalismo que hacen necesario medidas adicionales, y la falta de normativas que amparen a los prescriptores limitan su uso. No obstante, en algunos mercados –como el Suizo– ya representan el 90% de soluciones de reparación para puentes de carretera.

Los modos de fallo más habituales están asociados a las debilidades del hormigón ya que resiste mal las tracciones, y a las interfases con el adhesivo. En general, el laminado no suele fallar ya que su capacidad portante es suficientemente alta como para que el fallo se de en el adhesivo o en el hormigón.

El diseño según la *FIB* [6] para la flexión distingue entre la sección compuesta completa, considerando que todos los materiales contribuyen conjuntamente, y la sección sin acción compuesta. Para la sección compuesta completa la formulación sigue los fundamentos del diseño de una sección de hormigón armado clásica, tratando el *FRP* como un tipo de armadura adicional que contribuye a resistir la flexión. En la formulación se han adaptado los coeficientes y las limitaciones de deformación a las propiedades específicas de los materiales. Por ello, se distinguen varios escenarios según falle el hormigón en compresión, el acero, el *FRP* o una combinación de ellos. En el caso de pérdida de sección compuesta, la limitación más importante proviene del despegue del laminado contemplando diferentes causas.

Finalmente, para el diseño del cortante se sigue el planteamiento teórico del hormigón armado convencional tratando el *FRP* como un estribado adicional. Si bien la contribución del *FRP* a cortante no alcanza la totalidad de su capacidad portante y se reduce a un valor efectivo.

3.11. Líneas futuras de desarrollo

La solución tecnológica con *FRP* para la flexión está bastante estandarizada. Aunque no existen normativas aceptadas por los organismos sancionadores, sí que existen guías de diseño como el *FIB-Bulletin* [6] en Europa que permiten el dimensionamiento seguro de los

refuerzos. En el futuro es de esperar que los códigos estándar del hormigón incorporen las soluciones de *FRP*. Así, sería razonable esperar algún capítulo adicional en la futura versión de la EHE, tal y como se ha añadido el hormigón con fibras en la última versión.

En cuanto a los materiales, los laminados preconformados garantizan una calidad en el material que permite aumentar la seguridad en la aplicación con respecto a la solución *in situ*. En este sentido cabe esperar que los laminados ganen cuota de mercado a las soluciones de aplicación manual completa. La mejora en los laminados no será trascendental desde el punto de vista portante, ya que actualmente su capacidad está por encima de otros problemas más relevantes que limitan la aplicación, como por ejemplo, la resistencia al fuego. Las resinas de los laminados tienen el punto de fusión demasiado bajo para soportar valores críticos como los que exigen las normativas contraincendios. Asimismo, el estudio de la durabilidad de los laminados a largo plazo es motivo de preocupación.

Una mejora importante en los materiales debe venir por el comportamiento de los adhesivos. Los nuevos adhesivos han de permitir la transferencia de las cargas del hormigón al laminado mediante su deformación en continuidad en las zonas de contacto. Al mismo tiempo han de soportar la creación de fisuras intermedias que aparecen por el fenómeno de flexión en el hormigón sin perder la adherencia entre los materiales, tal y como sucede en las barras de acero del armado embebido. Finalmente, los adhesivos han de mejorar las prestaciones de durabilidad y resistencia al fuego.

El otro material fundamental es el hormigón. Dado que los refuerzos se aplicarán sobre los hormigones ya construidos, difícilmente pueden mejorarse sus prestaciones. Como no sea el sellado efectivo de fisuras o la limpieza del hormigón carbonatado y su sustitución por morteros de reparación altamente efectivos. No obstante, los hormigones del futuro constituyen una promesa para los refuerzos con *FRP*. Dado que los nuevos hormigones tienen mayor resistencia y mejor comportamiento frente a tracciones, se verá aumentada su capacidad para reducir problemas de despegue por levantamiento del hormigón o problemas de despegue bajo sollicitaciones de cortante, entre otros.

Sobre el comportamiento estructural de las secciones y la distribución de tensiones en los materiales aún queda camino por recorrer. En cuanto a la flexión, reducir los coeficientes de seguridad porque se tiene un mejor control del proceso, tal y como pasa con los coeficientes asociados al acero que son menores que en el resto de materiales. En cuanto a cortante, aún es necesario investigar mucho más. Si bien debe ir parejo a la caracterización del fenómeno de cortante en el hormigón que también es harto complejo. La torsión no es especialmente relevante para las tipologías habituales de hormigón, por ello es un campo casi virgen. El fenómeno de punzonamiento en placas reforzadas ni siquiera se ha abordado. El análisis dinámico y la respuesta ante sismo y acciones con inversión de esfuerzos en los refuerzos ha sido motivo de estudios experimentales relevantes, por ejemplo para el refuerzo de nudos en edificación, pero sigue siendo un tema que necesita mayor investigación.

En lo que respecta a la aplicación, la tecnología de adhesivos en superficie es actualmente muy competitiva. No obstante, se ha demostrado que las soluciones *NSM (Near Surface Mounted)* mejoran las prestaciones. El principal problema radica en la sistematización de la creación de ranuras en el hormigón, así como la colocación de los laminados y el adhesivo en el interior de los surcos. La investigación futura irá hacia la industrialización de las aplicaciones.

Otro campo de investigación abierto es la incorporación de compuestos activos en los refuerzos. Algunas soluciones de refuerzo se resuelven con armaduras activas de acero. Dados los problemas de corrosión de dicho material se impone por sentido común la sustitución funcional de los cordones de acero por sus equivalentes en compuesto. Toda esta tecnología de refuerzo activo está por desarrollar en –casi– su totalidad.

Finalmente, las soluciones mixtas de refuerzo también son un campo abierto de investigación. La adición de perflería de acero y su conexión con la estructura existente permite soluciones de refuerzo mixtas. La sustitución funcional de la perflería de acero por perflería de compuesto es también un reto tecnológico. Una de las mayores dificultades estriba en los sistemas de conexión entre el perfil compuesto y la estructura preexistente. Los conectores mecánicos no son, hoy por hoy, una alternativa tecnológicamente competitiva.

Bibliografía seleccionada

La siguiente referencia es un tratado básico sobre el hormigón. Un libro excelente de consulta indispensable. Contiene de forma didáctica las bases del diseño y el cálculo del hormigón armado y pretensado. Permite la comprensión de los fundamentos científicos que justifican las formulaciones de las normativas europeas.

- GARCÍA MESEGUER, A., MORÁN CABRÉ, F., ARROYO PORTERO, J.C. *Jiménez Montoya. Hormigón Armado*. 15ª Edición. Gustavo Gili. Barcelona (2009).

El libro de Gay & Hoa comprende la fabricación y el análisis estructural de los materiales compuestos. El planteamiento es generalista y permite conocer las propiedades mecánicas de los materiales compuestos, desde la lámina, al laminado y a la pieza estructural. El texto aborda detalles relevantes como las uniones y criterios de diseño. Finalmente, presenta un capítulo de ejemplos prácticos con aplicaciones a sectores diversos.

- GAY, DANIEL & HOA, SUONG V. *Composite Materials. Design and applications*. CRC Press (2007).

El libro de Bank realiza una introducción a los materiales *FRP* y sus aplicaciones. Primero introduce las propiedades mecánicas de los materiales *FRP*, posteriormente analiza su uso como armado en el hormigón; su uso como refuerzo externo adherido y finalmente, su uso como esqueleto estructural en forma de perfiles y entramados. Es un libro con una visión muy completa de la tecnología; siendo la normativa de referencia, la *ACI (American Concrete Institute)*.

- BANK, LAWRENCE C. *Composites for Construction: Structural Design with FRP Materials*. John Wiley & Sons, (2006).

Referencias

- [1] ALSAYED, S. H., AND SIDDIQUI, N. A. Reliability of shear-deficient RC beams strengthened with CFRP-strips. *Construction and Building Materials* 42 (2013), 238 – 247.

- [2] BLASCHKO M. AND NIERDERMEIER R. AND ZILCH, K. Bond failure modes of flexural members strengthened with FRP. In *Proceedings of Second International Conference on Composites in Infrastructures*, Saadatmanesh, H. and Ehsani, M. R., Eds., Tucson, Arizona (1998), pp. 315–327.
- [3] CLARKE, J. L (ED.). *Alternative Materials for the Reinforcement and Prestressing of Concrete*. CRC Press, 1993.
- [4] COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON. *CEB-FIP Model Code 1990, Design Code*. Thomas Telford Ltd. Lausanne, Switzerland, 1993.
- [5] EHE-08. *Instrucción para el Proyecto y Ejecución de Obras de Hormigón en Masa y Armado*. Centro de Publicaciones Secretaría General Técnica Ministerio de Fomento. BOE nº203, 23701-23717, Madrid, España, 2008.
- [6] FIB-BULLETIN 14. Externally Bonded FRP Reinforcement for RC Structures, 2001.
- [7] HERMITE, R. *Constructional element and method of making the same*. Patent US 3468090 A. 1969.
- [8] KHALIFA, A., GOLD, W. J., NANNI, A., AND AZIZ, A. M. Contribution of externally bonded FRP to shear capacity of RC flexural members. *Journal of Composites for Construction* 2, 4 (1998), 195–202.
- [9] MAKOTO, S., MAKOTO, T., AND HIROSHI, I. *Reinforcing fiber sheet, method of manufacturing the same, and method of reinforcing structure with EPO*. Patent EP0441519. 1991.
- [10] MÖRSCH, E. *Der eisenbetonbau, seine theorie und anwendung (Reinforced concrete construction - Theory and application)*, 5th edition ed. Konrad Wittwer, Stuttgart, 1920.
- [11] MOSALLAM, A. S., AND BANERJEE, S. Shear enhancement of reinforced concrete beams strengthened with FRP composite laminates. *Composites Part B: Engineering* 38, 5-6 (2007), 781 – 793.
- [12] PRIESTLEY, M., AND SEIBLE, F. Design of seismic retrofit measures for concrete and masonry structures. *Construction and Building Materials* 9, 6 (1995), 365 – 377. Application of Polymeric Materials to the Construction Industry.
- [13] TENG, J. G., LAM, L., AND CHEN, J. F. Shear strengthening of RC beams with FRP composites. *Progress in Structural Engineering and Materials* 6, 3 (2004), 173–184.
- [14] TRIANTAFILLOU, T., AND PLEVRIS, N. Strengthening of rc beams with epoxy-bonded fibre-composite materials. *Materials and Structures* 25, 4 (1992), 201–211.
- [15] TRIANTAFILLOU, T. C. Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams Using Epoxy-Bonded FRP Composites. *ACI structural journal* 95, 2 (1998), 107–115.
- [16] TRIANTAFILLOU, T. C., AND ANTONOPOULOS, C. P. Design of concrete flexural members strengthened in shear with FRP. *Journal of Composites for Construction* 4, 4 (2000), 198–205.
- [17] TÄLJSTEN, B., AND ELFGREN, L. Strengthening concrete beams for shear using CFRP-materials: evaluation of different application methods. *Composites Part B: Engineering* 31, 2 (2000), 87 – 96.