

5

Refuerzo a cortante de vigas de hormigón armado mediante *TRM*

Christian Escrig

Resumen El *Textile Reinforced Mortar (TRM)* es un material compuesto que ha sido desarrollado con la intención de minimizar los inconvenientes que presenta el *Fiber Reinforced Polymer (FRP)* en aplicaciones del ámbito de la ingeniería civil. A pesar de los estudios realizados el *TRM* aún está en fase embrionaria de conocimiento, sobretodo en el ámbito del refuerzo a cortante de estructuras de hormigón armado. En el presente capítulo se muestra la preparación y los resultados de ensayar vigas de hormigón armado reforzadas a cortante con diferentes combinaciones de *TRM*. Como resultado de esta campaña experimental, se puede determinar que una sola capa de refuerzo aplicada con una configuración en "U" es capaz de incrementar entre un 40% y un mínimo del 60% la capacidad de resistencia a cortante de un elemento estructural de hormigón con deficiencias en el armado transversal, en función de la combinación del tipo de tejido y de mortero. Además, algunos de estos refuerzos son capaces de evitar la rotura frágil de este tipo de estructuras, aspecto importante desde el punto de vista de la seguridad en edificios e infraestructuras que requieran ser rehabilitados.

5.1. Introducción

El refuerzo de estructuras de hormigón armado tiene una larga trayectoria y un amplio campo de aplicación debido al gran volumen de construcciones existentes que, desde el día que se ejecutaron, van degradándose progresivamente.

Desde el inicio de la crisis financiera global de finales de la década de los 2000, la construcción de obra civil, residencial e industrial, ha decaído notablemente, justo al contrario que la rehabilitación de infraestructuras existentes. Motivos como el cambio de uso de estas

Christian Escrig

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

DOI: [10.3926/oms.203](https://doi.org/10.3926/oms.203) • Omnia Publisher, 2014

construcciones (aumento de cargas en servicio) o modificaciones en los parámetros de diseño en los códigos referentes a las acciones sísmicas, han hecho aumentar considerablemente el número de elementos estructurales a reforzar frente al esfuerzo cortante.

Actualmente existen varias técnicas para aumentar la resistencia a cortante de las estructuras de hormigón armado. Todas ellas presentan sus ventajas e inconvenientes, pero la evolución histórica de las estrategias de refuerzo tiende a priorizar la rapidez y facilidad de ejecución, y la mínima afectación de la estructura existente. Así es como empezaron a aparecer los materiales compuestos en la obra civil: primero con la introducción del *FRP* y luego con el desarrollo del *TRM*.

El presente capítulo desarrolla un breve estado de la técnica de lo descrito anteriormente, así como una explicación detallada de la campaña experimental llevada a cabo en el CER-LITEM BarcelonaTECH referente al estudio de vigas de hormigón armado reforzadas con diferentes combinaciones de *TRM*. Con los datos obtenidos de los ensayos se realiza una introducción al estudio analítico de la cuestión, donde, según la orientación actual del estado de la técnica, la tendencia reside en la adaptación de la formulación existente del *FRP* al *TRM*. Finalmente se desarrollan las pertinentes conclusiones y se proponen unas líneas futuras de investigación que intenten avanzar en el estado de la técnica.

5.2. Breve estado de la técnica

5.2.1. Contextualización histórica

A pesar de que existen muestras de que las antiguas civilizaciones (Persia, Mesopotamia, Roma, etc.) ya utilizaban primitivos hormigones para realizar construcciones¹, en el ámbito de la edificación, se considera a François Coignet (1856-1915) el padre del hormigón moderno, cuando en 1861 plasma el ideal de construir monolíticamente mediante bloques de conglomerado de hormigón unidos entre sí [12].

Años antes, el hormigón armado ya había empezado a ser utilizado en otras aplicaciones fuera del ámbito de la construcción. En 1848, Joseph-Louis Lambot (1814-1887) construyó una embarcación de hormigón con una malla de alambres de hierro dispuestos en su interior, cuya presentación pública fue en la Exposición Universal de París en 1855. Sin embargo, la primera patente de un objeto realizado con hormigón armado la desarrolló el jardinero parisino Joseph Monier (1823-1906) en 1867 con la construcción de recipientes para jardinería. A partir de esa patente Monier desarrolló su uso en vigas y otras estructuras relacionadas con los ferrocarriles [8]. Posteriormente François Hennebique (1842-1921) contribuyó al uso y difusión del hormigón armado con su sistema patentado de construcción [22]. Hasta finales del siglo XIX Hennebique construyó miles de casas en Francia y Bélgica, promovió el uso de este material y realizó los primeros códigos de dimensionamiento estructural.

A pesar de la difusión de Hennebique, hasta después de la Primera Guerra Mundial el hormigón armado no fue tomado como material competidor directo del acero en el ámbito

¹Tal y como se puede observar en las etimologías de las palabras *betón*, *calcestruzzo* o *concrete* [29].

de la construcción y el diseño estructural. Hasta esa fecha el uso del hormigón armado en la construcción se había restringido a los equipamientos industriales (fábricas, depósitos, silos, canales, etc.).

El auge del hormigón armado como material de uso en la construcción llegó con los tratados de Le Corbusier (1887-1965) [13] que lo percibe como un material idóneo para las creaciones y diseños arquitectónicos. En ese sentido, Le Corbusier concibe los elementos hormigón armado aptos para ser fabricados industrializadamente de manera que la construcción de edificios residenciales se convierte en la producción de "máquinas de vivir".

Pero no es hasta después de la Segunda Guerra Mundial cuando el uso del hormigón armado se extiende de forma general en todos los ámbitos de la construcción de manera generalizada. Con la necesidad de reconstruir una Europa arrasada por la guerra, el aumento significativo y creciente de la población y las mejoras tecnológicas en la fabricación del hormigón y el acero para las armaduras, que han hecho este material competitivo económicamente, el hormigón armado se ha convertido en el material de construcción más utilizado hasta la fecha.

Después de más de 60 años de construcción con hormigón armado, el volumen actual de infraestructuras y edificios existentes a lo largo del planeta es, como mínimo, significativo. Todos ellos se han ido (y se están) degradando gradualmente debido a diferentes motivos, dejando entrever que, si se desea su continuación en servicio, deben ser mantenidos y/o reparados.

5.2.2. Necesidad de reforzar

Las estructuras de hormigón armado se ven afectadas por el paso del tiempo. Sus prestaciones se ven mermadas por motivos físicos, químicos y mecánicos. Efectos como la fatiga, la fisuración del hormigón y la consecuente alta probabilidad de ataque químico, la corrosión de las armaduras, los asentamientos o los impactos provocan una degradación en este tipo de estructuras y hacen disminuir su capacidad resistente. En este sentido, la vida útil de los elementos de hormigón armado viene definida por el tiempo que tardan las prestaciones mecánicas de estos elementos en llegar a un mínimo.

El refuerzo de una estructura existente de hormigón armado puede ser concebido desde diferentes puntos de vista. Según Rostam [27], la durabilidad de un elemento de hormigón armado es un parámetro función del diseño, los materiales, la ejecución y el curado. En la actualidad todos los códigos obligan a realizar un diseño de las estructuras de hormigón armado teniendo en cuenta la durabilidad y un plan de mantenimiento de las mismas durante su vida útil. Una problemática habitual reside en que existen edificios e infraestructuras ejecutados antes de la aparición de estos criterios de diseño en los códigos, incluso antes de los códigos mismos. En este caso, si no existe un plan específico de mantenimiento, la degradación de sus estructuras de hormigón armado se ve acelerada, acortando así su vida útil (véase Figura 5.1). En estos casos se pueden reforzar las estructuras existentes de acuerdo con un plan de mantenimiento específico que consiga que la pérdida de capacidad portante sea atenuada.

La crisis financiera y económica global ha agitado profundamente el sector de la construcción, provocando una brusca desaceleración en las ejecuciones de nuevas infraestructuras

reforzantes sí que es posible aumentar la capacidad portante para la cual había sido diseñada la estructura inicialmente.

Existen diferentes técnicas para reforzar e incrementar la resistencia a cortante de estructuras de hormigón armado. Estas se pueden resumir en los siguientes casos:

- (a) Ampliación de la sección transversal o aumento del número de estribos.
- (b) Refuerzo con placas de acero pegadas o atornilladas.
- (c) Refuerzo con tirantes de acero postensados.
- (d) Refuerzo con materiales compuestos de matriz orgánica (FRP).

Todas estas técnicas, cuya aplicación aún se realiza a día de hoy, presentan ventajas e inconvenientes. Sus características se presentan a continuación:

(a) Ampliación de la sección transversal o aumento del número de estribos

Incrementar la resistencia de un elemento estructural de hormigón armado aumentando su sección es seguramente la técnica más antigua de todas las presentadas anteriormente. La capacidad a cortante del elemento estructural se ve acrecentada debido a que la contribución del hormigón aumenta (véase Figura 5.2 izquierda). Estudios realizados demuestran que es necesario disponer estribos adicionales para que las tensiones a cortante puedan ser absorbidas, así como para garantizar el efecto de confinamiento necesario para transmitir el cortante entre la interfase de la sección existente y la suplementada [4]. Para llevar a cabo esta operación es necesario realizar una actuación *in situ* mediante encofrados y apuntalamientos del elemento a reforzar, dejándolo fuera de servicio hasta pasados 28 días después del hormigonado de la sección incrementada.

Otra técnica que supone la modificación e intervención directa sobre la estructura diseñada reside en añadir estribos allí donde sea necesario sin incrementar la sección transversal (véase Figura 5.2 derecha). El proceso de refuerzo consiste en repicar la zona a reforzar hasta dejar descubierto el esqueleto de la estructura, colocar el estribo y rellenar la zona con mortero sin retracción. Esta operación, si se hace de forma puntual y escalonada, no requiere retirar de servicio al elemento estructural.

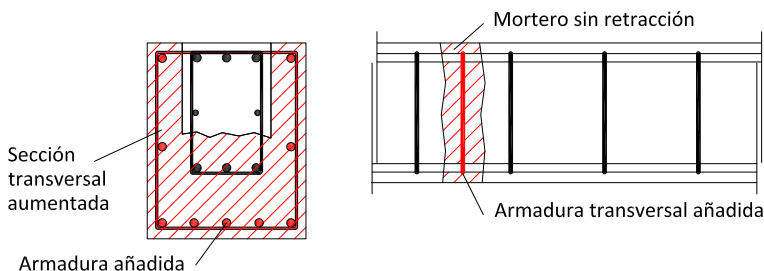


Figura 5.2: Refuerzo mediante actuación directa en la sección existente de hormigón armado: (izquierda) incremento sección transversal, (derecha) adición de estribos.

Generalmente, esta técnica es la que requiere una menor inversión económica debido al

bajo coste de los materiales empleados y a que no se requieren operarios con una formación específica. Desde el punto de vista del aumento de la capacidad resistente, este tipo de aplicación es de las más eficaces, ya que la inserción de nuevas armaduras y el efecto de confinamiento que estas producen, hacen de la estructura reforzada un nuevo elemento estructural de comportamiento resistente totalmente definido. Por el contrario, esta actuación resulta lenta y laboriosa. A pesar de tener los recursos suficientes para realizar la operación lo más rápidamente posible, la estructura no puede ponerse en servicio hasta que el nuevo hormigón no alcance una mínima resistencia (habitualmente a los 28 días desde su ejecución). Además, las dimensiones de la estructura se ven incrementadas, con el consecuente incremento de peso y rigidez (no siempre deseado), y el impacto estético asociado.

(b) Refuerzo con placas de acero pegadas o atornilladas

El refuerzo a cortante mediante placas de acero se suele realizar uniendo estos componentes, de forma continua [1] o con una configuración tipo estribos (véase Figura 5.3), al sustrato del elemento de hormigón mediante resinas epoxi. Este tipo de técnica ha caído en desuso con la aparición de los polímeros reforzados con fibras (*FRP*) dada su superior relación resistencia/peso.

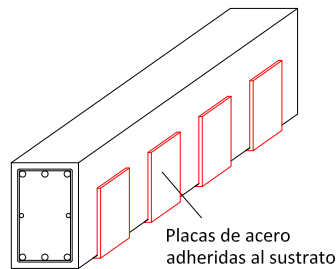


Figura 5.3: Refuerzo con placas de acero distribuidas en forma de estribos.

Un aspecto clave en el diseño de este tipo de refuerzo es el adhesivo. Si bien es cierto que el acero es un material idóneo para aumentar la resistencia a flexión y a cortante de los elementos estructurales de hormigón armado, el aumento de la capacidad portante que este refuerzo proporcionará a la estructura vendrá limitado por la capacidad de transmisión de tensiones que tenga la resina epoxi [19]. Esta técnica resulta eficaz pero puede presentar problemas relacionados con el deslizamiento de la resina, dado su comportamiento viscoelástico y la pérdida de propiedades mecánicas de la misma cuando está expuesta a altas temperaturas.

Una variante a este tipo de unión es atornillar directamente las placas de acero a la estructura existente. Esta solución resulta una alternativa en aquellas estructuras donde no es posible el uso de adhesivos, pero resulta poco eficaz por el número de anclajes que se deben realizar para competir con las resinas, respecto a la transmisión de esfuerzos al refuerzo. Una buena solución planteada para mejorar la eficacia de esta técnica de refuerzo es la combinación de las dos metodologías de adherencia: primero se fijan las placas metálicas a la estructura existente mediante tornillos y posteriormente se rellena la interfase entre el refuerzo y el sustrato con resina. Finalmente, una vez endurecido el adhesivo, se aprietan los tornillos para garantizar el contacto entre los componentes.

(c) Refuerzo con tirantes de acero postensados

El refuerzo con tirantes de acero postensados es la técnica más eficaz para restaurar e incrementar la capacidad portante de estructuras de hormigón armado altamente degradadas o dañadas. Consiste en introducir una compresión externa al elemento estructural mediante el tensionamiento de un tirante fijado a los extremos (véase Figura 5.4). Con esta metodología se descarga la tracción en las armaduras (aumento de la capacidad portante a flexión) y se comprime el hormigón (aumento de la capacidad portante a cortante).

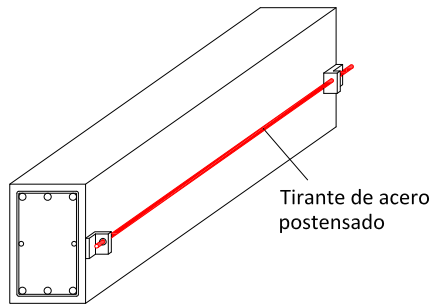


Figura 5.4: Refuerzo con tirante de acero postensado.

El inconveniente que presenta esta estrategia de refuerzo es que su aplicación es compleja, necesitando operarios con formación especializada para su instalación. Además, se debe realizar un análisis global de la estructura teniendo en cuenta los esfuerzos horizontales adicionalmente aplicados. Según su configuración y diseño, cabe la posibilidad de que el conjunto estructural existente no sea capaz de absorber y distribuir estos esfuerzos.

(d) Refuerzo con materiales compuestos de matriz orgánica (FRP)

La introducción de los materiales compuestos en la ingeniería civil supuso una revolución en las estrategias de refuerzo de estructuras de hormigón armado por su versatilidad y facilidad de aplicación. Su estudio empezó a realizarse después de la Segunda Guerra Mundial, pero su aplicación quedaba restringida a la industria militar y aeronáutica. No fue hasta finales de la década de 1980 cuando su utilización empezó a expandirse en el sector de la construcción y las infraestructuras [5].

Los materiales compuestos de matriz orgánica (FRP) están formados por una matriz polimérica de altas prestaciones (habitualmente resinas epoxi) reforzadas con fibras. La principal función de la matriz es mantener las fibras unidas y protegerlas de la abrasión y las agresiones medioambientales. En cuanto a las fibras, estas pueden ser de diferentes materiales, pero las más utilizadas históricamente son las de vidrio, carbono o aramida. Estas se suelen distribuir en la matriz en láminas unidireccionales o bidireccionales.

Las principales diferencias entre este refuerzo y las otras técnicas descritas anteriormente son su carácter anisotrópico, que hace conveniente la orientación de las fibras del refuerzo paralelas a las tracciones a que esté sometido el elemento estructural, y su comportamiento lineal elástico hasta su rotura. Esta última característica es importante tenerla en cuenta en el caso de realizar un diseño plástico del elemento estructural.

Del mismo modo que en las placas de acero pegadas a la estructura existente, el sistema *FRP* necesita ser adherido al sustrato mediante el uso de resinas tipo epoxi. Para garantizar el correcto pegado del *FRP*, antes de aplicar la resina es necesario tratar previamente la superficie del elemento a reforzar. Entre los procesos a realizar se destaca la abrasión de la superficie del hormigón mediante un chorreo de arena, la posterior limpieza de esta superficie y la aplicación de un producto polimérico denominado *primer* que actúa como transición entre el sustrato inorgánico y el adhesivo orgánico, mejorando la compatibilidad química entre ambos. Por último, se aplica el adhesivo sobre el *FRP* y sobre la superficie de hormigón tratada previamente, para finalizar con la fijación del refuerzo a la estructura existente.

En cuanto a las tipologías de *FRP*, existen dos productos de uso habitual en refuerzos a cortante: los sistemas precurados y los de aplicación húmeda o de curado *in situ* (véase Figura 5.5), siendo la principal diferencia entre ellos el proceso de curado de la matriz. En el primer sistema la matriz se cura de forma industrializada y se suministra el *FRP* como producto finalizado en forma de láminas rígidas. En cambio, en los sistemas de aplicación húmeda la matriz se adhiere a las fibras una vez estas se han situado en la zona a reforzar. En este caso las fibras son suministradas en forma de tejido flexible y la matriz en forma líquida, consolidando el sistema *FRP* a la vez que se adhieren las fibras al sustrato de la estructura.

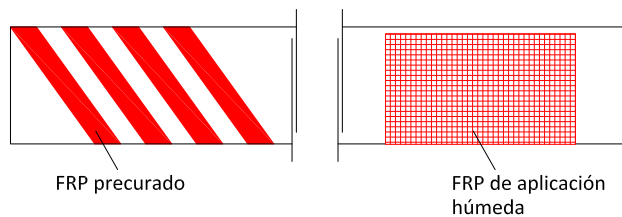


Figura 5.5: Aplicación *FRP* como refuerzo a cortante: (izquierda) sistema precurado y (derecha) sistema de aplicación húmeda o de curado *in situ*.

Los primeros estudios del uso del *FRP* como refuerzo a cortante de estructuras de hormigón armado [7] desarrollaron un modelo analítico que trataba el *FRP* como si fueran estribos de acero. En los siguientes años, se realizaron diversos estudios experimentales [3, 11, 20, 30] con resultados satisfactorios en cuanto al incremento de la resistencia a cortante de las estructuras reforzadas, pero con ciertas divergencias entre los estudios analíticos desarrollados, debido a la complejidad de cuantificar la influencia de las variables que intervienen en los diversos mecanismos de ruptura observados. Posteriormente, Triantafyllou y Antonopoulos [31] analizaron más de 75 ensayos y determinaron que se puede suponer el *FRP* como un refuerzo interno de la estructura, considerando para el cálculo de su resistencia última a cortante en la dirección principal, una deformación eficaz (ϵ_{fe}) generalmente menor que la deformación última de rotura (ϵ_{fu}). Esta deformación eficaz no es un parámetro constante y disminuye al crecer la rigidez axial del *FRP* ($\epsilon_f \rho_f$), así como al disminuir la resistencia a tracción del hormigón de la estructura reforzada. Además, se observó que la contribución del *FRP* a la resistencia a cortante del elemento estructural crece linealmente con la rigidez axial del *FRP* hasta cierto valor límite ($(\epsilon_f \rho_f)_{lim}$), después del cual los mecanismos de despegue del refuerzo hacen que la ganancia de capacidad a cortante sea menor.

Desde el punto de vista aplicativo, las principales ventajas que ofrece esta técnica son la alta relación resistencia-peso del *FRP* y la rapidez en la instalación del refuerzo y la posterior puesta en servicio de la estructura reforzada. Además, el *FRP* es un refuerzo resistente a la corrosión y ofrece un menor impacto visual que las estructuras reforzadas mediante otras técnicas, debido a que los cambios en la geometría de la estructura son mínimos [18].

5.2.4. *Textile-Reinforced Mortar*

A pesar de que el uso del *FRP* supuso una revolución en el refuerzo de estructuras de hormigón armado, a lo largo del tiempo se han ido detectando diferentes inconvenientes debido al uso de resinas en la impregnación de las fibras (como matriz del *FRP*) y en la fijación del refuerzo al sustrato [25, 33]. Entre estas desventajas se pueden incluir el mal comportamiento de las resinas epoxi a temperaturas por encima de la temperatura de transición vítrea, el alto coste relativo de las resinas, la imposibilidad de aplicar el *FRP* en superficies húmedas o a bajas temperaturas, la ausencia de permeabilidad al vapor de agua, la incompatibilidad de los adhesivos y matrices orgánicas del refuerzo con los sustratos inorgánicos, la dificultad de la evaluación de los daños post-sísmicos de las estructuras de hormigón armado reforzadas con mantas de *FRP* sin daños aparentes y el riesgo para la salud de los instaladores del refuerzo debido los productos tóxicos que contienen las resinas.

La evolución planteada para minimizar los inconvenientes que presentaba el *FRP* fue cambiar la matriz orgánica por una de mortero con base cementítica. Con este cambio, debido a la granulometría del mortero, no se obtuvieron buenos resultados en aspectos como la penetración e impregnación de las fibras en productos de refuerzo tipo láminas con alta densidad de material. Por ello el siguiente paso fue actuar sobre la distribución de las fibras. Para garantizar que la matriz de mortero lograra penetrar y humedecer las fibras, estas se agruparon en mechones flexibles y se distribuyeron en forma de malla unidireccional o bidireccional formando una estructura tipo tejido. Esta configuración de las fibras, conjuntamente con la matriz de mortero, dio lugar a lo que se conoce como *Textile-Reinforced Mortar (TRM)* (véase Figura 5.6).

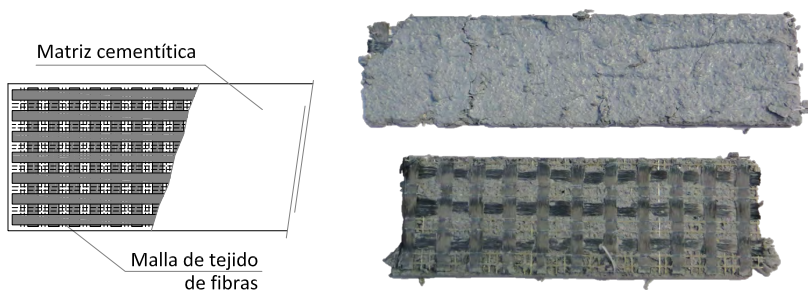


Figura 5.6: Descripción del *TRM*: esquema de configuración interna (izquierda) e imagen interna del refuerzo y del producto acabado (derecha).

El tipo de configuración interna del *TRM* tiene sus orígenes en el ferrocemento [24], material de construcción impulsado después de la Segunda Guerra Mundial por la industria naval,

consistente en elementos estructurales de cemento reforzados internamente por mallas metálicas electrosoldadas, conocidas también como tela de gallinero, con la función de ofrecer resistencia a tracción. Teniendo una estructura similar, el *TRM* ha sido diseñado para actuar como refuerzo que aporte resistencia a tracción a elementos de hormigón armado, aunque durante años su aplicación ha sido principalmente en estructuras de obra de fábrica.

Las mallas del *TRM* pueden estar constituidas por varios materiales. Actualmente se puede encontrar en el mercado mallas de fibra de vidrio, fibra de carbono, fibra de basalto, fibra de Poliparafenil Benzobisoxazol (PBO) y fibra de alambres de acero. El tejido del *TRM* es el encargado de proporcionar el incremento de resistencia a tracción al elemento reforzado, estando limitada su capacidad por la facultad que tenga el mortero de transmitir las tensiones entre el elemento estructural existente y la malla de fibras. De esta forma, a diferencia del *FRP*, la matriz del *TRM* actúa también como adherente al sustrato de la estructura existente. Los morteros que se aplican en esta técnica suelen ser de base cementítica (uso común para sustratos de hormigón), base cal o puzzolánicos, y están específicamente diseñados, mediante la incorporación de aditivos químicos y microfibras, para garantizar la adherencia del correspondiente tipo de tejido al sustrato a reforzar. En todos los casos, las fibras deben ser químicamente compatibles con el mortero de aplicación.

Por otro lado, analizando el comportamiento mecánico del *TRM* respecto a los refuerzos con matriz orgánica, se pueden observar grandes diferencias. Mientras en el *FRP* la matriz es significativamente más dúctil que las fibras y el material compuesto tiene un comportamiento lineal elástico hasta la rotura, en el *TRM* la matriz es considerablemente más frágil que la malla de fibras, aspecto que provoca la fisuración del mortero antes de que el tejido desarrolle su capacidad máxima a tracción, obteniendo así un pronunciado comportamiento no lineal. Una vez fisurada la matriz del *TRM* de manera múltiple, el tejido de fibras será capaz de soportar un incremento de tracciones siempre y cuando el volumen de fibras del refuerzo sea superior a un mínimo, valor entorno al 1-3 % [26].

Hasta la fecha se han realizado varios estudios con estructuras de hormigón armado reforzadas con *TRM* a flexión [10, 16, 21] confinamiento de pilares [9, 33], así como la realización de estudios de la aplicación de este refuerzo en obra de fábrica sometida a compresión excéntrica [6] y en arcos de mampostería sometidos a cargas puntuales hasta el colapso [17]. En la mayoría de ellos, el *TRM* se muestra como una técnica de refuerzo competitiva para lograr un aumento de resistencia y capacidad de deformación, aunque en algunos casos con una menor eficiencia que con la técnica *FRP*.

Varios artículos científicos desde el año 2006 tratan la temática del incremento de resistencia a cortante de vigas de hormigón armado mediante diferentes configuraciones *TRM*. En [10] se comprueba que el *TRM* ofrece incrementos de resistencia aplicando hasta 4 capas de tejido, aunque su eficiencia se ve reducida a partir de la 2ª capa aplicada de tejido en el caso que no existan conectores mecánicos externos que aseguren su adherencia. Por otro lado, en [28, 32] se propone que, al igual que en el caso del *FRP*, se pueda tratar el *TRM* como si fuera un refuerzo interno de la estructura, considerando para el cálculo de su resistencia última a cortante en las direcciones principales la deformación eficaz (ϵ_{re}) del refuerzo. Finalmente, en [2] se muestra la viabilidad de incrementar la capacidad a cortante de elementos de hormigón armado mediante tejidos de basalto con matrices cementíticas, así como que el aumento

de resistencia está relacionado con el número de capas de refuerzo y con la orientación de las mallas de tejido respecto la dirección de las tensiones de cortante.

A pesar de ser un refuerzo competitivo a nivel de incremento de resistencia y solucionar algunos de los inconvenientes que presenta el *FRP*, el *TRM* manifiesta también algunas desventajas, sobretodo en el ámbito del tiempo de espera para poder poner la estructura reforzada en servicio, ya que -por lo general- el mortero tarda 28 días en alcanzar la resistencia deseada.

5.3. Campana experimental

En el apartado desarrollado a continuación se realiza una breve descripción de las diferentes etapas que han constituido la campana experimental del presente estudio, realizado por el grupo de investigación CER-LITEM BarcelonaTECH , así como la exposición de los resultados y su análisis crítico.

5.3.1. Construcción de las vigas

Para el presente estudio se han ejecutado nueve vigas de hormigón armado de 1,70 m de longitud y una sección transversal de 300×300 mm. Todas las vigas se han diseñado con un déficit de resistencia a cortante, logrado mediante la no disposición de armadura transversal en los extremos de las vigas en una distancia igual a dos veces la altura de la sección (véase Figura 5.7). Se ha dispuesto un armado longitudinal 3Ø16 tanto en la parte superior como en la inferior de la viga, suficiente armadura para asegurar el fallo por cortante de las mismas.

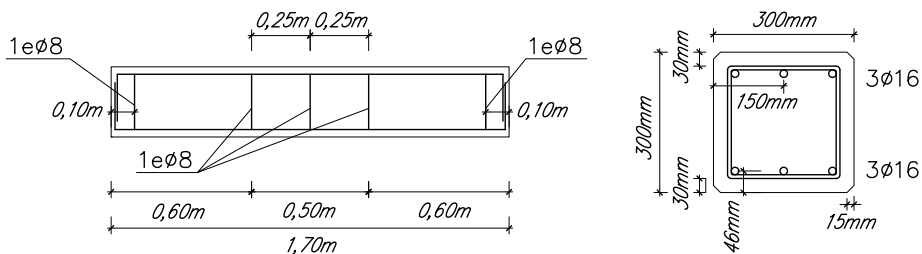


Figura 5.7: Detalle de la geometría y del refuerzo de las vigas construidas y ensayadas: despiece armaduras longitudinal y transversal (izquierda) y sección transversal (derecha).

Las vigas se han ejecutado en tres amasadas distintas. Las resistencias a compresión del hormigón de cada amasada se han obtenido mediante la toma de muestras y el ensayo de cinco probetas cúbicas de lado 150 mm, según UNE-EN 12390-3 [35] (véase Tabla 5.1). Por otro lado, las armaduras dispuestas en las vigas han sido de acero clase B500S. En la fabricación se han utilizado encofrados metálicos, disponiendo en ellos la armadura antes del proceso de hormigonado. Este se ha llevado a cabo vertiendo el hormigón directamente de la cuba. A medio llenado y en la fase de plena capacidad del encofrado se han realizado

operaciones de vibrado del hormigón y finalmente la eliminación de material sobrante para ajustar las tolerancias dimensionales del elemento estructural.

Fecha de la amasada	Resistencia media a compresión f_{cm} (MPa)
22/12/2011	34,07
13/01/2012	33,78
24/01/2012	40,85

Tabla 5.1: Resistencias del hormigón según amasada.

5.3.2. Materiales de refuerzo

Tal y como se ha descrito en apartados anteriores, el TRM es un material compuesto formado por fibras dispuestas en forma de malla y mortero que actúa como matriz inorgánica y adherente al sustrato de la estructura existente. En el presente estudio, de las nueve vigas de hormigón construidas, se han reforzado ocho de ellas utilizando cuatro combinaciones diferentes de fibras y mortero.

Para observar el comportamiento de diferentes materiales de refuerzo existentes en el mercado, se ha optado por estudiar cuatro tipologías de fibras: Vidrio, PBO, Basalto y Carbono (véase Figura 5.8). Se han elegido estos tejidos para el estudio debido a que presentan una alta adaptabilidad a la morfología del sustrato, necesaria para realizar configuraciones de refuerzo en "U". Existen otros tejidos en el mercado que son más rígidos y no presentan esta adaptabilidad. Estos tejidos, como pueden ser los compuestos por fibras de acero, son mucho más aptos para realizar refuerzos en un plano continuo.

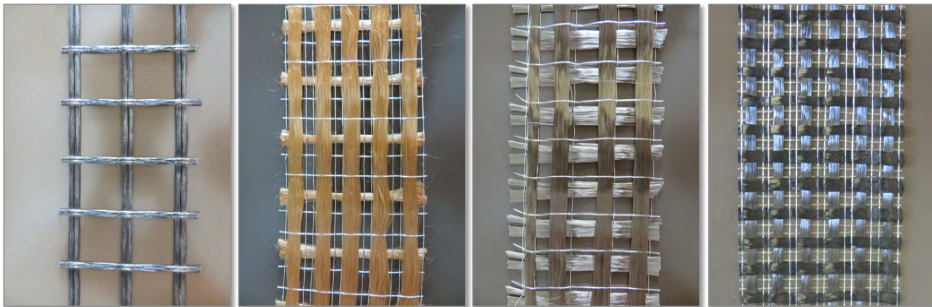


Figura 5.8: Fibras utilizadas en el estudio (de izquierda a derecha): Vidrio, PBO, Basalto y Carbono.

Estas fibras están constituidas en mallas de distintas arquitecturas y diferentes configuraciones anisotrópicas. En la Figura 5.9 se aprecia que todas las mallas presentan una configuración de refuerzo bidireccional, exceptuando la de PBO que es unidireccional. También es destacable que los tejidos de PBO, Basalto y Carbono presentan un tamaño de celda similar, habiendo una separación entre mechones de fibras entre 10-15 mm. En cambio, se puede observar que el tejido de fibra de vidrio presenta una configuración sensiblemente diferente, siendo la que tiene un tamaño de celda mayor. Este hecho puede ser un inconveniente desde

el punto de vista de uniformidad de la respuesta estructural, en aquellos elementos resistentes donde el ancho de la zona a reforzar no sea suficiente para mitigar el efecto malla del refuerzo.

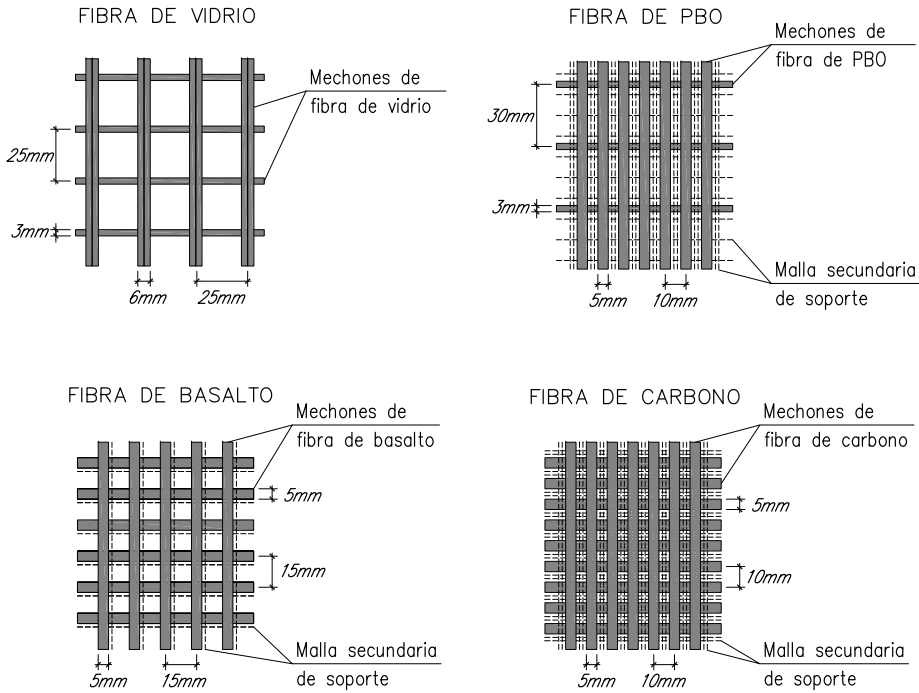


Figura 5.9: Arquitectura de las mallas utilizadas: Vidrio, PBO, Basalto y Carbono.

En cuanto a las propiedades mecánicas (véase Tabla 5.2) se observa que las fibras de PBO son las que presentan una mayor resistencia a tracción y un mayor módulo de Young. En cambio el mayor alargamiento reside en las fibras de vidrio. Al estar dispuestas estas fibras en forma de malla, las características mecánicas de los tejidos deben ser ponderados por el espesor equivalente del refuerzo en cada caso; esto es, tener en cuenta de manera implícita la densidad de fibras por unidad de ancho de malla, variable dependiente de la morfología de los mechones y de la medida de la celda.

Material	Resistencia a la tracción f_{fk} (MPa)	Alargamiento a la rotura ϵ_{fu} (%)	Módulo de Young E_{fu} (GPa)	Espesor equivalente [†] t_f (mm)	Orientación de las fibras	Código
Vidrio	2600	3,00	90	0,0420	Bidireccional	V
PBO	5800	2,15	270	0,0455	Unidireccional	P
Basalto	1735	1,93	90	0,0530	Bidireccional	B
Carbono	3400	1,80	240	0,0470	Bidireccional	C

[†] Espesor equivalente en cada una de las direcciones en caso de ser un tejido bidireccional.

Tabla 5.2: Fibras utilizadas y características mecánicas.

Los morteros utilizados en el presente estudio son morteros de base cementítica o puzzolánica específicamente diseñados para su aplicación en TRM. La mayoría de ellos presentan diferentes aditivos y fibras para maximizar las propiedades del refuerzo en base al tipo de fibra aplicado. Por ello, generalmente, las empresas suministradoras del tejido aportan también un mortero específico que actúe como matriz del material compuesto. Con el objeto de caracterizar la resistencia a flexión y la resistencia a compresión de cada tipo de mortero utilizado, se han ensayado 6 probetas de $160 \times 160 \times 40$ mm según lo establecido en UNE-EN 1015-11:2000 [34] (véase Figura 5.10). Los resultados de estos ensayos se recogen en la Tabla 5.3.

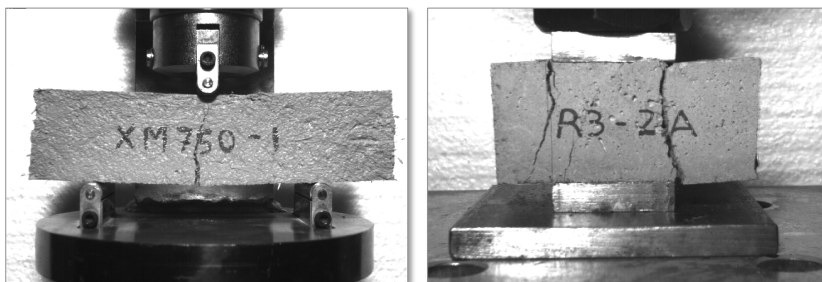


Figura 5.10: Ensayos de caracterización de los diferentes tipos de mortero según UNE-EN 1015-11:2000: determinación de la resistencia a flexión (izquierda) y determinación de la resistencia a compresión (derecha).

Tipo de mortero	Resistencia a compresión (MPa)	Resistencia a flexión (MPa)	Código
Mortero bicomponente a base de cementos de alta resistencia y aditivos poliméricos	35,40 (2,53)	8,63 (0,57)	PHDM
Mortero hidráulico de alta adherencia con fibras y adiciones especiales	30,02 (2,21)	10,65 (0,80)	XM750
Mortero hidráulico modificado con adiciones poliméricas (PCC)	24,65 (1,43)	8,13 (0,99)	R3
Mortero hidráulico puzzolánico	24,95 (1,64)	7,87 (0,78)	XM25

Tabla 5.3: Morteros utilizados y características mecánicas experimentales (entre paréntesis se indica la desviación estándar).

5.3.3. Aplicación del refuerzo en las vigas de hormigón

Dado que el principal objetivo del presente estudio es observar el comportamiento mecánico y la aplicabilidad de diferentes combinaciones de tejidos y morteros como refuerzo a cortante de elementos estructurales de hormigón armado, se han reforzado ocho de las nueve vigas con cuatro combinaciones diferentes de TRM en las zonas donde la configuración del armado no contiene estribos, como se ilustra en la Figura 5.11. En todos los casos se ha dispuesto el refuerzo a cortante mediante una configuración en "U", también conocida como *U-jacketing*. Esta configuración presenta una buena combinación entre la eficacia del refuerzo y la aplicabilidad del mismo en vigas existentes. En los tejidos unidireccionales las fibras principales se han dispuesto con una orientación de 90° respecto de la directriz longitudinal de la viga. De la misma forma las fibras de los tejidos bidireccionales se han orientado con

los ejes que forman 0° y 90° respecto la misma directriz. En la Tabla 5.4 se pueden observar los tipos de combinaciones de *TRM* utilizados y la nomenclatura final de cada una de las vigas ensayadas. Además, se especifica si cada combinación es comercial (el tejido y el mortero son suministrados como componentes de un único producto final por la misma empresa fabricante) o, por el contrario, es no comercial (el tejido y el mortero son suministrados por empresas diferentes y no constituyen, a priori, partes concebidas de un producto final).

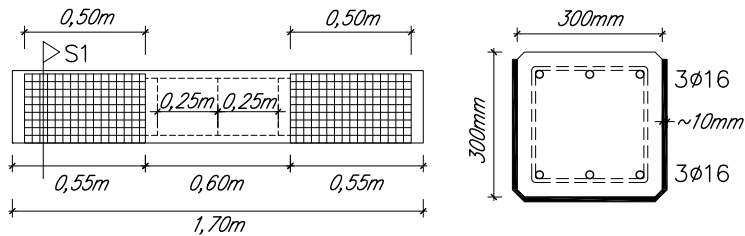


Figura 5.11: Detalle de la geometría y del refuerzo de las vigas reforzadas: ubicación del refuerzo (izquierda) y sección 1 - configuración del refuerzo en "U" (U-jacketing) (derecha).

Tipo de Fibra	Tipo de Mortero	Tipo de Combinación	Designación vigas
Vidrio (V)	PHDM	Comercial	V-VPDM-01
			V-VPDM-02
PBO (P)	XM750	Comercial	V-PXM750-01
			V-PXM750-02
Basalto (B)	R3	No Comercial	V-BR3-01
			V-BR3-02
Carbono (C)	XM25	Comercial	V-CXM25-01
			V-CXM25-02
-	-	-	V-CONTROL

Tabla 5.4: Combinaciones de *TRM* usadas la campaña experimental y nomenclatura de las vigas ensayadas.

La preparación de los materiales se ha llevado a cabo según las necesidades y los condicionantes de los fabricantes en cada caso. En relación a las fibras, en todos los casos menos en el tejido de basalto, el material suministrado tenía el suficiente ancho para cubrir la zona destinada a refuerzo con un solo tramo. En el caso del basalto, la compañía suministra el producto con un ancho inferior a la zona prevista de refuerzo. La solución ha sido duplicar los tramos de tejido instalado, manteniendo un solapamiento de 70 mm en todo el perímetro de la sección reforzada. Respecto a la preparación del mortero se han seguido las instrucciones de los fabricantes en cada caso, en cuanto a proporciones de los componentes de la mezcla, tiempos y velocidades de amasado y tiempos máximos de aplicación. En la preparación de la mezcla, generalmente, se ha procedido a añadir la fase sólida progresivamente a la fase líquida (agua o preparado con específicos químicos). En todos los casos se han mezclado los dos componentes de forma mecánica mediante el uso de un mezclador helicoidal de sección plana asociado a un taladro. En ningún caso se recomienda el amasado manual por no garantizar la homogeneidad de la mezcla.

Con el fin de garantizar una adherencia óptima entre el sustrato de la estructura existente y el refuerzo, Larrinaga [21] propone una metodología definida para la aplicación del TRM en estructuras de hormigón. Inicialmente, para asegurar la penetración del mortero al sustrato del elemento existente, es necesario realizar un tratamiento superficial en la zona de la estructura de hormigón que se va a reforzar. Esta operación consiste en eliminar el grano fino de la superficie del hormigón mediante procedimientos mecánicos (véase Figura 5.12 izquierda), con el uso de un martillo percutor con varillas metálicas o el de una máquina desbastadora con disco de diamante de granulometría adecuada. Una vez abierto el poro en la zona de la estructura de hormigón que se va a reforzar, es importante eliminar los restos arena y polvo mediante la aplicación de ráfagas de aire comprimido o técnicas manuales para dejar la estructura preparada para el procedimiento de aplicación de refuerzo.



Figura 5.12: Preparación de las superficies de la estructura existente.

Tras la preparación del sustrato de la estructura existente se inicia el procedimiento de aplicación del refuerzo. Como se ha expuesto en las secciones anteriores, el TRM es un material compuesto donde la matriz inorgánica actúa también como adhesivo al sustrato de la estructura existente. Este adhesivo, en forma de mortero, debe estar preparado con la relación de agua/cemento proporcionada por el fabricante en cada caso. Dado que el hormigón fraguado es un material poroso con una determinada capacidad de absorción de agua (aumentada por el hecho de haber eliminado la capa de grano fino), si se aplica el mortero directamente sobre el sustrato de la estructura existente se produciría una transferencia de agua de la matriz del TRM hacia el hormigón y un consecuente cambio en las propiedades químicas y mecánicas del propio mortero. Para evitar este efecto de transferencia de agua entre los dos materiales, antes de aplicar el mortero sobre la superficie del elemento, se humedece toda la zona donde se aplicará el refuerzo hasta la saturación de la propia estructura de hormigón (véase Figura 5.13 izquierda). Dado que tampoco sería deseado el efecto contrario, que el mortero absorbiese agua del sustrato de hormigón saturado, antes de empezar a aplicar la matriz del refuerzo, se eliminan los excesos y sobrantes de agua del sustrato de hormigón. Llegados a este punto se aplica la primera capa de mortero en la zona de refuerzo, garantizando un espesor entre 3 y 5 mm. Su correcta aplicación es de especial importancia dado que actuará como parte de la matriz del material compuesto y como adherente del refuerzo a la estructura existente. Finalizada la aplicación de la primera capa de mortero, se procede a la fijación de las fibras. El tejido, previamente cortado a la medida deseada, se presenta en la zona de refuerzo para, posteriormente, embeber dentro de la primera capa aplicada de mortero (véase Figura 5.13 centro). Es importante que en esta operación el mortero aún esté húmedo para asegurar la impregnación de éste en las fibras del tejido dispuesto en forma de malla, garantizando así una buena conexión mecánica entre ambos. Para acabar con el proceso de

aplicación del refuerzo, se añade una segunda y última capa de mortero (véase Figura 5.13 derecha). Esta capa también debe tener un espesor entre 3 y 5 mm, dotando al refuerzo *TRM* de un grosor total aproximado de 1 cm.



Figura 5.13: Aplicación del refuerzo.

En el caso que se desee aplicar más de una capa de tejido, se deberían repetir estas dos últimas operaciones, vigilando especialmente que el mortero permanezca húmedo y garantice la impregnación de las diferentes capas de malla. En esta casuística, las capas intermedias de mortero deberán tener un espesor de 2 a 4 mm. La capa final de mortero debe tener un acabado uniforme, ofreciendo un espesor del *TRM* y un recubrimiento de la malla constante en toda la zona de refuerzo. Por otro lado, al ser el *TRM* un material de matriz inorgánica, se debe tener un especial cuidado con el curado del mismo, evitando exposiciones directas al sol o al viento que favorezcan altas velocidades de curado que hagan aparecer fisuras en el mortero. Se recomienda mantener la zona húmeda sobre todo en las primeras horas después de la aplicación. Un buen indicativo de la correcta instalación del refuerzo reside en que la malla de tejido no se debe vislumbrar una vez finalizada la aplicación de la última capa de mortero y su posterior proceso de acabado con llana.

5.3.4. Ensayos

El presente estudio experimental ha consistido en someter a un ensayo a flexión de tres puntos las nueve vigas construidas, ocho de ellas reforzadas previamente a cortante con *TRM*. Con una luz libre entre soportes de 1,50 m, los ensayos llevados a cabo han consistido en la aplicación de un solo punto de carga descentrado que lograra movilizar los mecanismos de flexión y cortante, intentando evitar el comportamiento estructural de bielas y tirantes que se desarrolla, por ejemplo, en ménsulas cortas. En este sentido, el punto de aplicación de la carga ha sido descentrado de tal manera que la distancia hasta el soporte no fuera menor que dos veces la altura de la viga (véase Figura 5.14). En todos los casos los especímenes se han apoyado en cilindros metálicos con el giro no restringido de forma que los soportes constituyeran rótulas en el plano de la viga.

La aplicación de la carga se ha llevado a cabo mediante un actuador hidráulico de 500 kN de capacidad. Todos los ensayos se han realizado con control por desplazamiento a una velocidad constante de 1 mm/min, donde el control de la señal ha sido gobernado por un sistema MTS y los datos de fuerza aplicada han sido adquiridos por una célula de carga MTS de 500 kN de capacidad. La flecha ha sido medida en tres planos de deformación mediante seis

5 | Refuerzo a cortante de vigas de hormigón armado mediante TRM

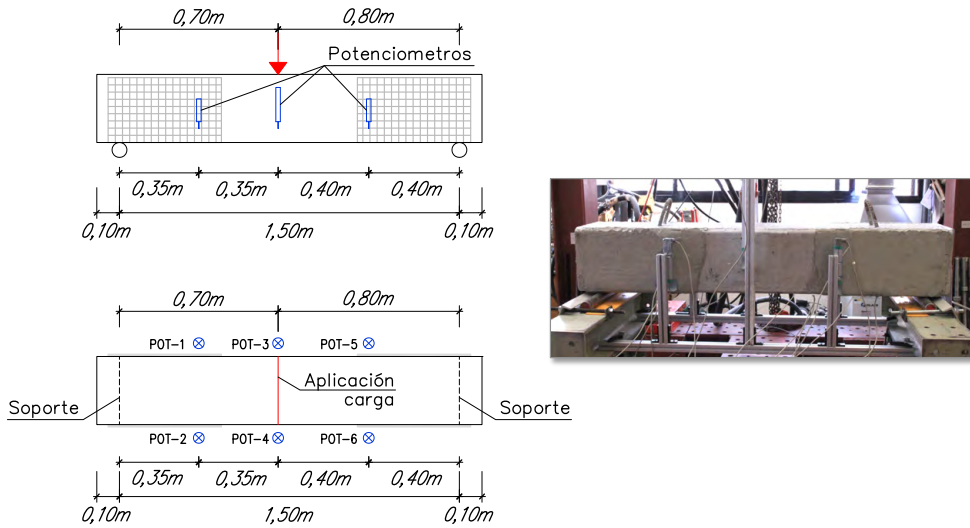


Figura 5.14: Configuración de ensayo: esquema del alzado y la planta (izquierda) se imagen real del montaje del ensayo (derecha).

potenciómetros (dos en cada plano registrado), ubicados en el punto de aplicación de la carga y en el punto medio entre los soportes y la aplicación de la carga (véase Figura 5.14). Los datos de los sensores han sido adquiridos por el sistema HBM MGC-Plus a 50 Hz. Además, se ha registrado el modo de fallo de cada uno de los especímenes mediante la verificación visual del proceso de fisuración. Por último cabe especificar que para garantizar que el mortero haya alcanzado su máxima resistencia, todos los ensayos realizados han sido llevados a cabo, como mínimo, 28 días después de la finalización del refuerzo de la última viga.

5.3.5. Resultados

De las diferentes pruebas de carga realizadas se han observado tres modos de fallo diferentes. Tanto la viga de control sin reforzar, como las reforzadas con malla de carbono, han sufrido una rotura a cortante donde la fisura evita cruzar la zona de la armadura transversal y, una vez superado el último estribo, se desarrolla inclinada hasta el soporte. Por otro lado, las vigas reforzadas con PBO y una de las reforzadas con fibra de basalto (V-BR3-01) y con fibra de vidrio (V-VPDMD-02), desarrollan un modo de rotura a flexo-cortante, en la que la fisura se propaga inclinada desde el punto de aplicación de la carga, cruzando el armado transversal, hasta la parte inferior de la viga sin invadir significativamente la zona del TRM. Por último, las vigas reforzadas con basalto (V-BR3-02) y vidrio (V-VPDMD-01) presentan un modo de rotura a cortante en el que la fisura atraviesa tanto la zona de estribos como la zona de refuerzo, hasta alcanzar el soporte correspondiente. En estos dos últimos modos de fallo, todos los especímenes presentan rotura de la cabeza de compresiones (véase Figura 5.15). En ningún caso se ha desarrollado un modo de fallo de despegue del refuerzo, ya sea con arranque de parte del sustrato (*peeling*) o simplemente despegue del TRM en la interfase entre la primera capa de mortero y el tejido (*debonding*).

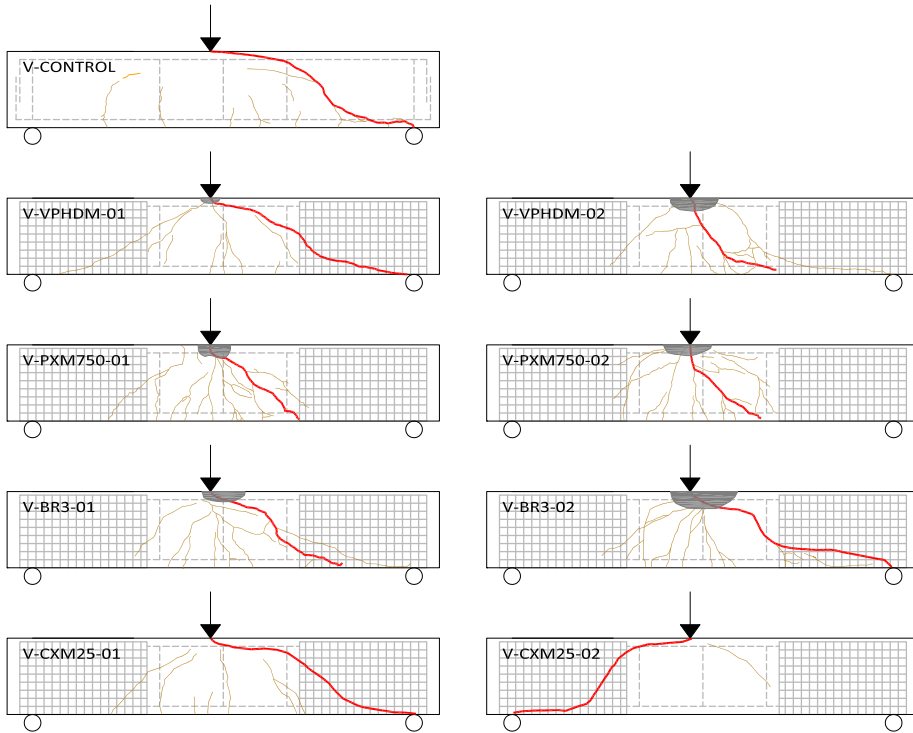


Figura 5.15: Modos de fallo de los especímenes ensayados.

Cabe destacar que ocho de las nueve vigas ensayadas desarrollan el mecanismo de rotura en la parte del espécimen cuya luz de cortante es mayor (zona B). Este hecho, a priori, no es lógico desde el punto de vista de la mecánica clásica, ya que el cortante debido a una carga puntual se reparte mayoritariamente en la zona con una luz de cortante menor (zona A). Una posible explicación a este fenómeno reside en que la luz de corte de la zona A es próxima a dos veces el canto de la viga, valor frontera en que se desarrollan mecanismos de bielas de compresión similares a los que ocurren en las ménsulas cortas, y donde la resistencia a cortante se incrementa notablemente.

En la Figura 5.16 se pueden observar las curvas de carga aplicada (F) respecto el desplazamiento vertical en el punto de aplicación de la carga (δ_{max}). En ella se observa que la mayoría de especímenes reforzados son capaces de aumentar su capacidad de carga, ofreciendo en algunos casos un aumento considerable de la ductilidad. En especial cabe destacar que las vigas reforzadas con PBO son las que presentan mejores resultados desde el punto de vista de capacidad resistiva y de uniformidad en la respuesta estructural.

Para poder comparar directamente los ensayos realizados y eliminar la variable de la resistencia del hormigón de las diferentes vigas, se define μ como el cortante adimensional experimental. Este parámetro consiste en la relación entre el cortante experimental desarrollado en la zona de rotura de la viga y la resistencia a cortante V'_c que proporciona el hormigón en aquellas regiones fisuradas sin armadura transversal, según el EC2 [14]:

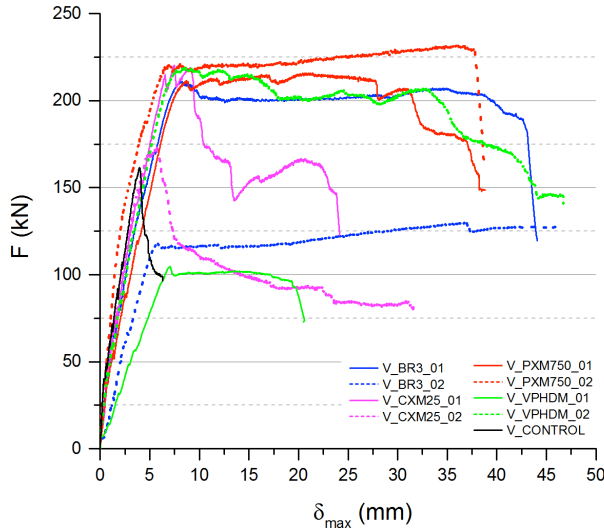


Figura 5.16: Fuerza versus desplazamiento vertical máximo.

$$V'_c = 0,18\xi (100 \rho_l f_{ck})^{\frac{1}{3}} bd \quad (5.1)$$

con un valor mínimo de:

$$V'_c \geq 0,035\xi^{\frac{3}{2}} (f_{ck})^{\frac{1}{2}} bd \quad (5.2)$$

donde:

ξ = coeficiente que tiene en cuenta la influencia del canto útil en el efecto del engranamiento de los áridos

ρ_l = cuantía de la armadura longitudinal a tracción

f_{ck} = resistencia característica del hormigón

b y d = base y el canto útil de la sección, respectivamente

En las Figuras 5.17, 5.18 y 5.19 se muestran las diferentes gráficas de μ respecto del desplazamiento vertical en el punto de aplicación de la carga, agrupándolas por tipo de fallo y añadiendo en todos los casos el espécimen de control. En los casos donde el fallo de la viga reforzada es por flexo-cortante o por cortante sin contribución de la armadura transversal (Figuras 5.17 y 5.19), se puede observar que los especímenes logran aumentar su capacidad resistente entre un 40-60%, dependiendo del tipo de refuerzo aplicado. Además del aumento de resistencia a cortante, es importante destacar que las vigas que presentan una rotura a flexo-cortante desarrollan un significativo comportamiento plástico debido a la movilización de la cabeza de compresiones. Este hecho permite incrementar su ductilidad y, lo que es más relevante desde el punto de vista de la seguridad, evita la rotura frágil del elemento estructural. En cambio, no es así para los especímenes reforzados con tejidos de fibra de carbono, que, aunque tienen la aptitud de desarrollar más capacidad de carga, presentan una rotura frágil similar a la de la viga de control.

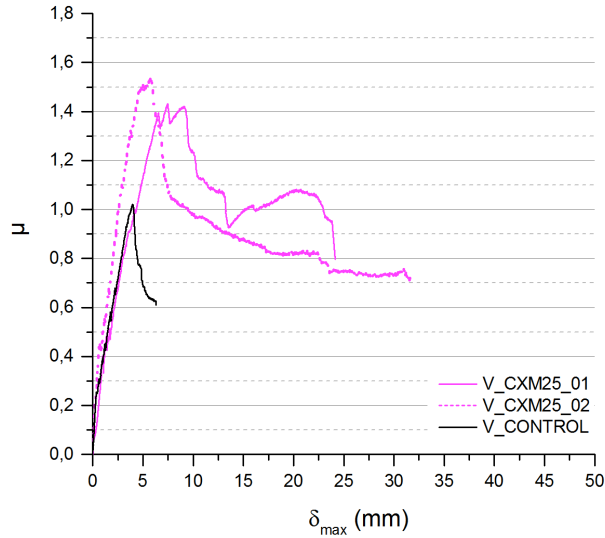


Figura 5.17: Cortante adimensional μ respecto el desplazamiento vertical en el punto de aplicación de la carga (δ_{max}) para el fallo a cortante sin contribución de la armadura transversal.

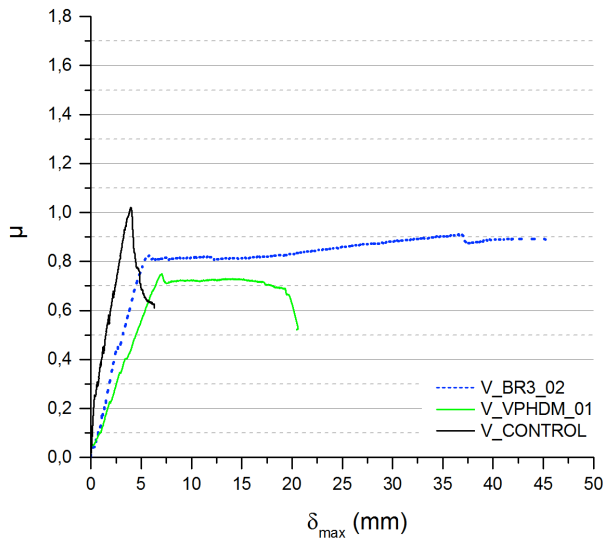


Figura 5.18: Cortante adimensional μ respecto el desplazamiento vertical en el punto de aplicación de la carga (δ_{max}) para el fallo a cortante con contribución de la armadura transversal.

Por otro lado, los especímenes que presentan un fallo por cortante con contribución del armado transversal y del refuerzo (véase Figura 5.18) presentan un comportamiento no esperado, debido a que no son capaces de alcanzar la capacidad portante de la viga de control a pesar de tener las contribuciones del armado y el refuerzo *TRM* en el conjunto global de la resistencia a cortante. Esta respuesta estructural es anómala, dado que son elementos realiza-

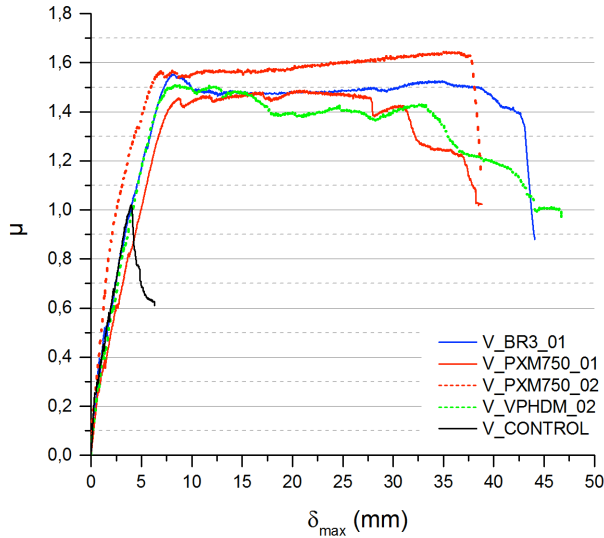


Figura 5.19: Cortante adimensional μ respecto el desplazamiento vertical en el punto de aplicación de la carga (δ_{max}) para el fallo a flexo-cortante sin contribución de la armadura transversal.

dos con hormigón de la misma amasada y que presentan una menor rigidez que el resto de especímenes ensayados (véase Figura 5.20), y se podría deber a una mala ejecución de las vigas durante el proceso de hormigonado y curado, afectando directamente a la resistencia a cortante del hormigón. En cambio, cabe destacar que ambas vigas presentan un comportamiento dúctil, lo que lleva a pensar que se han activado los mecanismos del TRM referentes a la contribución de resistencia a cortante global de la estructura.

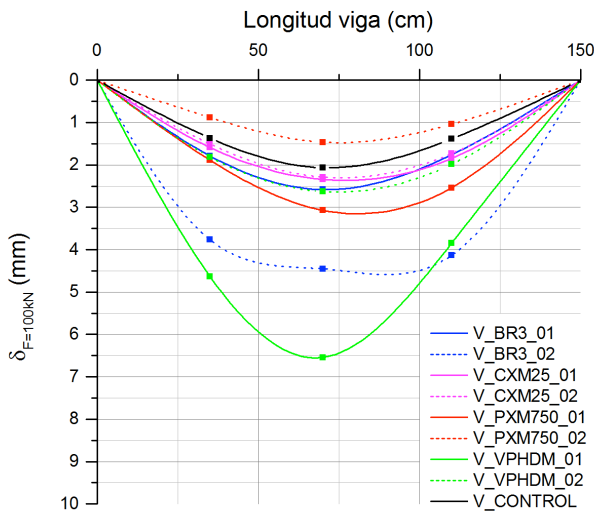


Figura 5.20: Deformada de los especímenes ensayados para una carga de $F = 100$ kN.

5.4. Estudio analítico

El siguiente estudio analítico consiste en la obtención de las deformaciones eficaces del material compuesto ($\varepsilon_{te(j)}$) para cada tipo de tejido utilizado en la campaña experimental descrita con anterioridad. Análogamente al caso de las vigas de hormigón armado reforzadas con *FRP*, el refuerzo *TRM* puede tratarse como un refuerzo interno siguiendo el modelo de celosía desarrollado por Mörsch [23] a principios del siglo XX. En éste modelo se considera que la resistencia a cortante de una estructura de hormigón armado puede obtenerse cómo la suma de las resistencias a cortante de los diferentes elementos que lo componen:

$$V_R = V_c + V_s + V_t \quad (5.3)$$

donde:

V_c = resistencia a cortante del hormigón fisurado en presencia de armado transversal

V_s = resistencia a cortante que ofrece el armado transversal

V_t = resistencia a cortante que ofrece el *TRM*

Algunos códigos de diseño consideran nula la aportación del hormigón a la resistencia a cortante global cuando existe armadura transversal [14]. No obstante, esta consideración se presume muy conservadora ya que numerosos estudios han demostrado que mecanismos resistentes como la existencia de la cabeza comprimida, el efecto arco, el engranamiento de los áridos y el efecto pasador de la armadura longitudinal, contribuyen a la resistencia a cortante del hormigón. De esta manera, para determinar la resistencia a cortante del hormigón en zonas fisuradas con existencia de armado transversal, se utiliza la expresión de la norma española EHE-08 [15]:

$$V_c = 0,15\xi (100 \rho_l f_{ck})^{\frac{1}{3}} bd \quad (5.4)$$

Se puede observar que esta expresión ofrece valores de resistencia un 16,7% menores que en el caso del cálculo de la resistencia a cortante del hormigón en aquellas regiones fisuradas sin armadura transversal (ecuación 5.1) según EC2. En el caso de la contribución del armado transversal, el EC2 y la normativa EHE-08 coinciden en el valor de V_s , que, teniendo en cuenta una disposición de los estribos normales a la directriz, toma la siguiente expresión:

$$V_s = \frac{A_{sw}}{s} z f_{yw} \cot \theta \quad (5.5)$$

donde:

A_{sw} = área de la sección transversal de la armadura de cortante

s = separación entre estribos

z = brazo mecánico de la armadura longitudinal

f_{yw} = resistencia característica de la armadura transversal

θ = ángulo de la fisura que atraviesa la zona de la armadura respecto la directriz de la viga

Por último, para la determinación de la resistencia a cortante que proporciona una configuración en "U" del refuerzo *TRM* en elementos estructurales de hormigón (V_t), Triantafyllou [32] propone adaptar las expresiones desarrolladas para el caso de refuerzos con *FRP* [18] de

5 | Refuerzo a cortante de vigas de hormigón armado mediante TRM

la siguiente manera:

$$V_t = \sum_{i=1}^2 2 t_{ti} \sin \alpha_i \varepsilon_{te,i} E_{fib} z (\cot \alpha_i + \cot \theta) \sin \alpha_i \quad (5.6)$$

donde:

t_{ti} = espesor equivalente del tejido en la dirección i

$\varepsilon_{te,i}$ = deformación eficaz del refuerzo en la dirección i

E_{fib} = módulo de deformación longitudinal de las fibras

z = brazo mecánico de la armadura longitudinal

α_i = ángulo que forman la dirección i de cada uno de los mechones de un tejido bidireccional respecto la directriz de la viga (véase Figura 5.21)

θ = ángulo de la fisura que atraviesa la zona del refuerzo respecto la directriz de la viga (se puede asumir 45°)

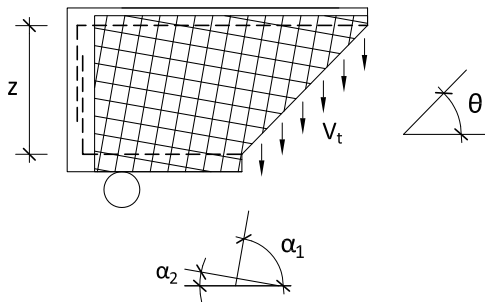


Figura 5.21: Contribución a cortante de los tejidos bidireccionales con mechones dispuestos ortogonalmente.

En el caso de disponer el tejido de refuerzo orientado con los mechones paralelos a las direcciones que forman la directriz de la viga y su normal ($\alpha_1 = 90^\circ$ y $\alpha_2 = 0^\circ$), se observa que la contribución de las fibras dispuestas horizontalmente es nula. Este hecho resulta bastante conservador, ya que se podría intuir que estas fibras podrían colaborar en la transferencia de las tracciones según el modelo de celosía. En cualquier caso, siendo conservadores y suponiendo esta circunstancia, la ecuación 5.6 se ajusta a los parámetros de las fibras orientadas ortogonalmente a la directriz de la viga:

$$V_t = 2 t_t \varepsilon_{te} E_{fib} z (\cot 45^\circ) \quad (5.7)$$

De la ecuación 5.7 se observa que para obtener valores de la deformación eficaz de los diferentes tejidos estudiados ($\varepsilon_{te,exp}$), es necesario saber cuál es la contribución experimental de la resistencia a cortante proporcionada por el refuerzo ($V_{t,exp}$), y relacionarla con la formulación expuesta anteriormente. Con ese fin, es necesario imponer que la resistencia a cortante coincida con el máximo cortante desarrollado por los especímenes justo antes de la rotura, y estudiar las casuísticas que ofrecen los diferentes modos de fallo. Así pues, dejando de lado las vigas que ofrecieron un comportamiento anómalo (V-VPHDM-01 y V-BR3-02), en aquellos especímenes dónde hubo un fallo por cortante con contribución del TRM y sin

contribución del armado transversal, la resistencia a cortante proporcionada por el *TRM* se obtiene $V_{t, exp}$ despejando de la ecuación 5.3:

$$V_{t, exp} = V_{max} - V'_c \tag{5.8}$$

donde:

- V_{max} = cortante máximo experimental desarrollado por las vigas justo antes de la rotura
- V'_c = resistencia a cortante que proporciona el hormigón en aquellas regiones fisuradas sin armadura transversal

Por otro lado, en aquellas vigas cuya rotura ha sido a flexo-cortante con una fisura que no ha invadido la zona del *TRM*, al no intervenir el refuerzo en el proceso de rotura, no se puede obtener el valor exacto de la contribución experimental de la resistencia a cortante proporcionada por el refuerzo. Pero sí que es posible, de manera análoga al caso anterior, estimar un valor límite inferior que permita acotar valores de deformación eficaz del *TRM*:

$$V_{t, exp} \geq V_{max} - V'_c \tag{5.9}$$

De este modo, sustituyendo la ecuación 5.7 en las ecuaciones 5.8 y 5.9, se obtienen los valores experimentales de la deformación eficaz del refuerzo ($\epsilon_{te, exp}$) para los diferentes tipos de tejidos estudiados. Además, se define el coeficiente α_t, exp como la fracción entre la deformación eficaz y la deformación última del tejido. Este coeficiente es utilizado para justificar la distribución no-homogénea de tensiones de cortante a lo largo de la fisura. Por último, también se incluyen en la Tabla 5.5 los valores analíticos de la deformación eficaz del refuerzo *TRM* adaptadas de la formulación desarrollada en el código FIB [18] para refuerzos adheridos de *CFRP*. Esta expresión considera una configuración en "U" vertical y un modo de fallo que incluye la fractura del refuerzo:

$$\epsilon_{te} = \alpha_t \epsilon_{tu} = 0,17 \left(\frac{f_{cm}^{\frac{2}{3}} b}{2 t_t E_{fib}} \right)^{0,3} \epsilon_{tu} \tag{5.10}$$

donde:

- f_{cm} = resistencia media del hormigón (MPa)
- b = base de la sección (mm)
- t_t = espesor equivalente del tejido (mm)
- E_{fib} = módulo de deformación longitudinal de las fibras (GPa)
- ϵ_{tu} = deformación última del tejido

Considerando los valores mínimos experimentales se observa que las deformaciones eficaces del *TRM* están comprendidas entre el 30% y el 92% de las deformaciones últimas, según el caso y dependiendo del tipo de fibra. Estos valores representan una gran dispersión respecto del 0,5 propuesto por Si Larbi [28] en refuerzos con tejidos de vidrio y acero adheridos lateralmente. Por último, se puede apreciar que en los casos de tejidos de fibras de carbono y de fibras de PBO, el ratio experimental de deformaciones es ligeramente inferior que el ratio obtenido mediante el uso de la formulación adaptada del *CFRP*. En cambio, los resultados obtenidos de los tejidos de fibras de basalto y de vidrio presentan notables diferencias.

Tipo de fibra	$\epsilon_{te, exp} (\%)$	$\epsilon_{tu} (\%)$	α_t, exp	$\epsilon_{te} (\%)$	α_t
Vidrio (V)	$\geq 2,20$	3,00	$\geq 0,73$	1,04	0,35
PBO (P)	$\geq 0,65$	2,15	$\geq 0,30$	0,73	0,34
Basalto (B)	$\geq 1,77$	1,93	$\geq 0,92$	0,94	0,49
Carbono (C)	[0,53; 0,66]	1,80	[0,29; 0,37]	0,76	0,43

Tabla 5.5: Deformaciones eficaces del TRM (experimentales y analíticas) y ratios respecto la deformación última para cada tipo de tejido.

5.5. Conclusiones

El TRM es una tecnología desarrollada para el refuerzo de elementos estructurales con sustratos inorgánicos. Como evolución de los materiales compuestos que utilizan resinas como matriz y adhesivo, el TRM ha sido diseñado para mitigar los inconvenientes que presenta su antecesor. En cuanto a la eficacia de esta técnica para el incremento de la resistencia a cortante de elementos de hormigón armado, los ensayos realizados en la campaña experimental descrita en el presente capítulo, revelan que una sola capa de tejido, dispuesto con una configuración tipo "U" y orientado ortogonalmente respecto a la directriz de la viga, es capaz de incrementar la capacidad portante del elemento estructural significativamente. En esta coyuntura, los tejidos de fibras de PBO han sido los que han presentado un mejor comportamiento estructural, siendo capaces de cambiar el modo de fallo de la viga y lograr un elevado grado de ductilidad. En cambio, los tejidos de fibras de carbono han sido los que han mostrado el peor comportamiento, logrando incrementar la capacidad a cortante de las vigas un 40 %, pero no pudiendo evitar un fallo por rotura frágil de las mismas.

En la línea de las mejoras que ofrece el TRM respecto del FRP, cabe destacar la posibilidad de visualizar las fisuras a través del refuerzo durante el proceso de carga de las vigas. Este hecho resulta muy interesante desde el punto de vista de la evaluación de los daños post-sísmicos de las estructuras. En cambio, en el caso de los elementos reforzados con FRP, esta valoración resulta imposible de llevar a cabo sin equipamiento auxiliar adecuado (infrarrojos, ultrasonidos, etc.).

Por otro lado, es importante resaltar que ninguno de los refuerzos de TRM ha presentado un fallo por despegue, ya sea con arranque de sustrato (*peeling*) o en la interfase mortero-tejido (*debonding*). Este hecho indica que para refuerzos de una capa de tejido con una configuración tipo "U" que alcance la cabeza comprimida del hormigón, las longitudes de adherencia son suficientes para evitar el despegue del refuerzo. Es necesario realizar más estudios para determinar las longitudes mínimas de adherencia en el caso de tener más de una capa de tejido.

En cuanto a la exclusividad de tener que usar combinaciones comerciales de tejido y mortero (ambos suministrados por el mismo fabricante), se ha demostrado que es posible utilizar componentes de diferentes empresas (caso del tejido de basalto combinado con el mortero hidráulico modificado con adiciones poliméricas) con resultados aceptables. Este hecho acerca el proceso a un sistema de producción abierto, donde se puedan incorporar diferentes tipos de morteros con diferentes tipos de fibras, siempre que estos morteros estén específicamente diseñados para la aplicación en TRM y sean compatibles químicamente con las fibras del tejido a combinar.

Finalmente, en cuanto al estudio analítico del refuerzo a cortante, se ha observado que es viable utilizar la deformación eficaz de las fibras para el cálculo de la contribución que ofrece el *TRM* a la resistencia a cortante global del elemento reforzado. Para ello es necesario generar una extensa base de datos experimentales que permita extrapolar una formulación analítica para la determinación de la deformación eficaz de cada tipo de tejido. A priori, según los resultados obtenidos, no resulta aconsejable adaptar directamente la formulación desarrollada en el caso de refuerzos con *FRP*.

5.6. Líneas futuras

Al ser el *TRM* un tipo de técnica de refuerzo de corto recorrido cronológico, los estudios experimentales realizados son escasos. Por ese motivo, la principal línea futura propuesta es la realización de más ensayos de estructuras de hormigón armado reforzadas a cortante con *TRM*. El objetivo final es obtener una base de datos suficientemente amplia que permita desarrollar una formulación analítica en función de los resultados experimentales. En este sentido hay diferentes variables a tener en cuenta en la realización de estos ensayos. Aspectos como el tipo de fibra, la arquitectura del tejido, los morteros utilizados, el número de capas de refuerzo, las longitudes de anclaje o la disposición de anclajes mecánicos para aumentar la eficacia del refuerzo, resultan clave en el proceso que debe tener como finalidad desarrollar un código de diseño que permita al proyectista sentirse seguro en el uso del *TRM* como material de uso habitual en la reparación y refuerzo de estructuras de hormigón armado.

De acuerdo con lo expresado, es importante ampliar el conocimiento teórico del comportamiento del *TRM* como material compuesto. Hasta el momento las líneas de investigación tienden a intentar adaptar los conocimientos adquiridos del *FRP*, pero efectos como la distribución no-homogénea de tensiones a lo largo de una sección del *TRM* debidos a la propia arquitectura del tejido, pueden hacer variar esta tendencia. En la misma dirección es necesario que los fabricantes expliciten de manera clara y exhaustiva las propiedades mecánicas de los componentes, especialmente de las mallas de tejido. Para ello es necesario realizar amplias campañas de caracterización de materiales, desde un punto de vista local (deformación última de las fibras) hasta una visión más global del refuerzo (por ejemplo, deformación última de la malla o del conjunto del *TRM*).

Focalizando las líneas de investigación en lo que concierne al refuerzo a cortante de vigas de hormigón armado, es necesario profundizar en la comprensión de los mecanismos resistentes de las mallas bidireccionales. Una posible campaña experimental a llevar a cabo podría consistir en la comprobación del aporte de resistencia a cortante que ofrecen los mechones horizontales de un tejido bidireccional. Actualmente se considera que este aporte es nulo, pero según el modelo de celosía de distribución de tensiones no es incoherente intuir que el tejido orientado horizontalmente pueda ayudar a distribuir tensiones en la zona de tracciones del elemento reforzado.

En resumen, dada la tendencia creciente de la demanda de estructuras de hormigón armado que necesitan ser reparadas o rehabilitadas, la técnica de refuerzo del *TRM* presenta unas cualidades óptimas para su estudio y desarrollo. Pero el éxito de esta técnica está totalmen-

te condicionado a la realización de proyectos de investigación que permitan, a medio plazo, desarrollar códigos que aporten fiabilidad al proyectista en el diseño y cálculo del TRM.

Agradecimientos El presente estudio ha sido parcialmente llevado a cabo en el marco del proyecto "Uso de nuevos materiales composites para el refuerzo y rehabilitación de estructuras de edificación y obra civil con criterios de sostenibilidad TERREME", financiado por el Ministerio Español de Economía y Competitividad. También se agradece el soporte de las empresas Ibermapei, S.A., Ruredil, S.p.A. y Fidia, S.p.A. por el aporte de material para la realización de dicho estudio.

Bibliografía seleccionada

El comportamiento mecánico de estructuras de hormigón armado sometidas a esfuerzo contante es una cuestión compleja que aún no se ha resuelto analíticamente con una formulación universal. Para un mejor entendimiento de los mecanismos que se desarrollan con este tipo de esfuerzo, se recomienda la siguiente lectura:

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

En la misma línea se recomienda la siguiente publicación en la que se incluye un profundo análisis del comportamiento de elementos de hormigón armado reforzados a cortante mediante materiales FRP adheridos externamente a la estructura. Este conocimiento supone una de las bases para el desarrollo analítico del comportamiento del TRM:

- ÁLZATE, A. *Análisis de los modelos de comportamiento de vigas de hormigón armado reforzadas a cortante con polímeros armados con fibras (FRP). Validación y calibración experimental*. PhD Tesis. Universidad Politécnica de Madrid (2012).

Por último, para que el lector pueda introducirse en la temática del TRM como refuerzo externo a cortante de estructuras de hormigón armado, se recomienda la lectura de los dos primeros artículos aparecidos sobre la materia [10, 32], que a la par han marcado el desarrollo de las actuales líneas de investigación:

- BRÜCKNER, A. AND ORTLEPP, R. AND CURBACH, M. Textile reinforced concrete for strengthening in bending and shear. *Materials and Structures* 39, 8 (2006), 741-748.
- TRIANTALFILOU, T. C. PAPANICOLAOU, C. G. Shear strengthening of reinforced concrete members with textile reinforced mortar (TRM) jackets. *Materials and Structures* 39, 1 (2006), 93-103.

Referencias

- [1] ADHIKARY, B. B., MUTSUYOSHI, H., AND SANO, M. Shear strengthening of reinforced concrete beams using steel plates bonded on beam web: experiments and analysis. *Construction and*

- Building Materials* 14, 5 (2000), 237–244.
- [2] AL-SALLOUM, Y. A., ELSANADEDY, H. M., ALSAYED, S. H., AND IQBAL, R. A. Experimental and Numerical Study for the Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams Using Textile-Reinforced Mortar. *Journal of Composites for Construction* 16, 1 (2012), 74–90.
- [3] AL-SULAIMANI, G. J. *et. al.* Shear repair for reinforced concrete by fiberglass plate bonding. *ACI Structural Journal* 91, 4 (1994), 458–464.
- [4] ALTUN, F. An experimental study of the jacketed reinforced-concrete beams under bending. *Construction and Building Materials* 18, 8 (2004), 611–618.
- [5] BAKIS, C. E. *et. al.* Fiber-Reinforced Polymer Composites for Construction: State-of-the-Art Review. *Journal of Composites for Construction* 6, 2 (2002), 73–87.
- [6] BERNAT, E., GIL, L., ROCA, P., AND ESCRIG, C. Experimental and analytical study of TRM strengthened brickwork walls under eccentric compressive loading. *Construction and Building Materials* 44 (2013), 35–47.
- [7] BERSSET, J.-D. *Strengthening of Reinforced Concrete Beams for Shear Using FRP Composites*. MSc Thesis. Department of Civil and Environmental Engineering, Massachusetts Institute of Technology, 1992.
- [8] BOSC, J.-L., CHAUVEAU, J.-M., CLÉMENT, J., AND DEGENNE, J. *Joseph Monier et la naissance du ciment armé*. Éditions du Linteau, Paris, 2001.
- [9] BOURNAS, D. A., LONTOU, P. V., PAPANICOLAOU, C. G., AND TRIANTAFILLOU, T. C. Textile-reinforced mortar versus fiber-reinforced polymer confinement in reinforced concrete columns. *ACI Structural Journal* 104, 6 (2007), 740–748.
- [10] BRÜCKNER, A., ORTLEPP, R., AND CURBACH, M. Textile reinforced concrete for strengthening in bending and shear. *Materials and Structures* 39, 8 (2006), 741–748.
- [11] CHAJES, M. J. *et. al.* Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams Using Externally Applied Composite Fabrics. *ACI Structural Journal* 92, 3 (1995), 295–303.
- [12] COIGNET, F. *Bétons agglomérés appliqués à l'art de construire notamment à l'état monolithique et à l'état de pierres artificielles*. Paris Librairie scientifique, industrielle et agricole E. Lacroix, Paris, 1861.
- [13] CORBUSIER, L. *Vers une architecture [1923]*. Flammarion, Paris, 1995.
- [14] EC2-1. *Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1: Common rules for building and civil engineering structures*. EN 1992-1, European Committee for Standardisation, Brussels, 2004.
- [15] 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 n^o203, 23701-23717, Madrid, España, 2008.
- [16] ELSANADEDY, H. M., ALMUSALLAM, T. H., ALSAYED, S. H., AND AL-SALLOUM, Y. A. Flexural strengthening of RC beams using textile reinforced mortar - Experimental and numerical study. *Composite Structures* 97 (Mar. 2013), 40–55.
- [17] GARMENDIA, L., SAN-JOSÉ, J., GARCÍA, D., AND LARRINAGA, P. Rehabilitation of masonry arches with compatible advanced composite material. *Construction and Building Materials* 25, 12 (2011), 4374–4385.
- [18] INTERNATIONAL FEDERATION FOR STRUCTURAL CONCRETE. *Externally Bonded FRP Reinforcement for RC Structures*. Fédération Internationale du Béton. FIB bulletin 14. Lausanne, Switzerland, 2001.
- [19] JONES, R., SWAMY, R., AND ANG, T. Under- and over-reinforced concrete beams with glued steel plates. *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete* 4, 1 (1982), 19–32.
- [20] 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.

- [21] LARRINAGA, P. *Flexural Strengthening of Low Grade Concrete Through the Use of New Cement-Based Composite Materials*. PhD thesis, Universidad del País Vasco, 2011.
- [22] MCBETH, D. G., HENNEBIQUE, F., AND MOUCHEL, L. Francois Hennebique (1842-1921), reinforced concrete pioneer. In *Proceedings of the ICE - Civil Engineering* (1998), no. 126, pp. 86–95.
- [23] MÖRSCH, E. *Der eisenbetonbau, seine theorie und anwendung (Reinforced concrete construction - Theory and application)*, 5th edition ed. Konrad Wittwer, Stuttgart, 1920.
- [24] OLVERA LÓPEZ, A. *El ferrocemento y sus aplicaciones*. México Instituto Politécnico Nacional, México D.F., 1985.
- [25] PAPANICOLAOU, C. G., TRIANTAFILLOU, T. C., KARLOS, K., AND PAPATHANASIOU, M. Textile-reinforced mortar (TRM) versus FRP as strengthening material of URM walls: in-plane cyclic loading. *Materials and Structures* 40, 10 (2006), 1081–1097.
- [26] PELED, A., AND BENTUR, A. Fabric structure and its reinforcing efficiency in textile reinforced cement composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 34, 2 (2003), 107 – 118.
- [27] ROSTAM, S., BAKKER, R., BEEBY, A., VAN NIEUWENBURG, D., SCHIESSL, P., SENTLER, L., AND VAN VUGT, A. *Durabilidad de estructuras de hormigón: guía de diseño CEB*, 2nd ed. Madrid GEHO-CEB, Madrid, 1996.
- [28] SI LARBI, A., CONTAMINE, R., FERRIER, E., AND HAMELIN, P. Shear strengthening of RC beams with textile reinforced concrete (TRC) plate. *Construction and Building Materials* 24, 10 (2010), 1928–1936.
- [29] SIMONNET, C. *Hormigón. Historia de un material. Economía, técnica, arquitectura*. Editorial Nerea, San Sebastián, 2009.
- [30] TRIANTAFILLOU, T. C. Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams Using Epoxy-Bonded FRP Composites. *ACI structural journal* 95, 2 (1998), 107–115.
- [31] 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.
- [32] TRIANTAFILLOU, T. C., AND PAPANICOLAOU, C. G. Shear strengthening of reinforced concrete members with textile reinforced mortar (TRM) jackets. *Materials and Structures* 39, 1 (2006), 93–103.
- [33] TRIANTAFILLOU, T. C., PAPANICOLAOU, C. G., ZISSIMOPOULOS, P., AND LAOURDEKIS, T. Concrete confinement with textile-reinforced mortar jackets. *ACI structural journal* 103, 1 (2006), 28–37.
- [34] UNE-EN 1015-11. Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 11: Determinación de la resistencia a flexión y a compresión del mortero endurecido, 2007.
- [35] UNE-EN 12390-3. Ensayos de hormigón endurecido - Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas, 2009.