

4

Refuerzo a flexión de hormigones de bajas prestaciones. Empleo del *TRM* como material compuesto

José T. San-José, Pello Larrinaga e Ignacio Marcos

Resumen Recientes enfoques del sector abundan en subrayar la importancia del negocio de la rehabilitación, adquiriendo especial relevancia el estudio de soluciones innovadoras, a la par que económicas. Con un enfoque hacia el refuerzo a flexión de las estructuras de hormigón, se tienen presentes las necesidades de compatibilidad integral (física, cultural y funcional) entre estos hormigones y sus sistemas de refuerzo. En línea con lo anterior, el presente capítulo analiza la tecnología de los morteros reforzados con tejidos como una solución de refuerzo conformada por el empleo conjunto de tejidos técnicos (fibras) y matrices de naturaleza inorgánica.

4.1. Introducción

Los hormigones estructurales aplicados a la construcción han sido largamente utilizados y su comportamiento está bien caracterizado por diferentes modelos, tanto teóricos como experimentales. Referido al marco del presente capítulo, hay que hablar de algunos números que cuantifican la importancia de su rehabilitación estructural. Por ejemplo, relativo al refuerzo

José T. San-José

Departamento de Ingeniería Minera y Metalúrgica y Ciencia de los Materiales
ETSI Bilbao (UPV/EHU). Alameda Urquijo s/n. 48013 Bilbao, España
e-mail: josetomas.sanjose@ehu.es

Pello Larrinaga

Departamento de Construcción Sostenible
TECNALIA, Parque Científico y Tecnológico de Bizkaia, Geldo, Edificio 700, E-48160 Derio (Bizkaia), España

Ignacio Marcos

Departamento de Ingeniería Mecánica
EUITI Bilbao (UPV/EHU). Paseo Rafael Moreno "Pitxitxi", 2. 48013 Bilbao, España

DOI: [10.3926/oms.202](https://doi.org/10.3926/oms.202) • Omnia Publisher, 2014

4 | Refuerzo a flexión de hormigones de bajas prestaciones con TRM

de las estructuras edificadas en España, prácticamente el 60% de los fallos estructurales tienen un origen de flexión: aproximadamente un 25% en vigas y un 35% en forjados como se muestra en la Figura 4.1.

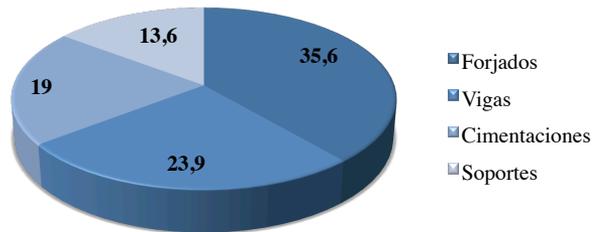


Figura 4.1: Fallos estructurales del hormigón en España [35].

En el caso del País Vasco (unos 2,1 millones de habitantes), según el informe: "*La actividad de rehabilitación en la CAPV*" del Gobierno Vasco, fechado en Octubre 2009¹ hay cerca de un 16% de viviendas (129.000) que necesitan rehabilitación, de las cuales, casi un 24%, precisarían de refuerzo en sus vigas.

Resulta difícil aportar datos fiables sobre las causas más comunes de los problemas de patología estructural. En primer lugar, por ausencia y dispersión de datos. En segundo lugar, porque casi nunca existe una única causa principal de fallo de las estructuras, sino que suele ser debido a varias a la vez. Sin embargo, en España se han realizado varios intentos para obtener una aproximación estadística sobre la situación de la patología estructural del hormigón. Cabe destacar, entre otros:

- En primer lugar la Tesis Doctoral de D. J. A. Vietez [35], en la que se estudia la situación española a principios de los años 80. Adicionalmente, en 1992, el Grupo Español del Hormigón (GEHO²), publica un trabajo titulado "*Encuestas sobre patología de estructuras de hormigón [?]*" en el que se recogían casos de patología estructural hasta finales de la década de los 80.
- Prácticamente a la vez se publica la Tesis Doctoral desarrollada por D. J. Escribano [11]. En este segundo caso más enfocada al proceso edificatorio global, es decir, incluyendo otros apartados, al margen de la estructura, como son la albañilería y los acabados, instalaciones, cubiertas, etc. Dicho trabajo es el resultado del estudio de 1500 expedientes recogidos de la Asociación de Seguros Mutuos de Arquitectos Superiores (ASEMAS), consecuencia de algún tipo de denuncia presentada contra sus asociados durante el período 1984-1987.

Por lo tanto, a la vista del gran impacto que puede suponer la rehabilitación en el mercado de la construcción, parece más que oportuno abordar soluciones de refuerzo a flexión para hormigones antiguos, a tenor del importante parque edificado de más de 50 años que tenemos en el Estado español.

¹http://www.ej-gv.net/etxebide/pd/recursos/documentos/informe_rehabilitacion.pdf

²GEHO, grupo trabajo IV-1, comisión N. *Comportamiento en servicio, mantenimiento y reparación.*

4.2. Breve estado de la técnica

El hormigón armado moderno, tal como lo conocemos hoy, es un material surgido en Europa al amparo de la Revolución Industrial, a mediados del siglo XIX. Sin embargo, ya los constructores de civilizaciones antiguas desarrollaron productos similares al hormigón moderno: primitivas pastas de calizas calcinadas mezcladas con arenas, piedras machacadas y agua pueden ser halladas en maravillas arquitectónicas aún conservadas de aquellas épocas.

François Coignet (1856-1915), precursor del hormigón en masa, emplea hormigón para rellenar el entrecigado de perfiles de acero, a fin de crear un suelo resistente al fuego, en su célebre casa de Saint Denis, en 1852. Sin embargo, es William Wilkinson (1795-1865), en Inglaterra, el que plantea en su patente de 1854, el uso de elementos metálicos embebidos en hormigón con una función resistente [5]. Pese a estos antecedentes, la invención del hormigón armado ha recaído tradicionalmente en Joseph Monier (1823-1906), que curiosamente no efectuó su primera patente en construcción, sino en "agricultura, panadería y molinería" [31]. Existe otra patente francesa anterior similar, correspondiente a Joseph-Louis Lambot (1814-1887), autor de una barca imputrescible construida con cemento y alambre, que presentó en la Exposición Universal de París de 1855 y que al poco cayó en el olvido [1].

Este sistema de patentes surge en una época en la que ya estaba consolidada la estructura de acero. Durante la última década del siglo XIX, en Europa y Estados Unidos existían un número relevante de construcciones de hormigón armado. Sin embargo, en España su introducción tiene lugar a finales del XIX bajo influencia francesa. El primer caso conocido es un depósito de agua en Puigverd (Lleida) construido en 1893 por Francesc Macià i Llussà (1859-1933), según el sistema Monier. Pese a este inicio de actividad, la aplicación del hormigón armado seguía siendo bastante limitada y no tuvo unos comienzos claros hasta finales del siglo XIX, siempre asociada a virtudes tales como la durabilidad, el comportamiento al fuego y, por supuesto, su rentabilidad económica.

Es a comienzos del siglo XX cuando se percibe cómo las mismas patentes, bajo las que se impulsó el hormigón armado, se convierten en un obstáculo para su desarrollo, tanto por su reducido carácter científico, como por los derechos económicos y de exclusividad que fomentaban en el sector de la construcción. Simultáneamente ocurren avances científicos, basados en campañas experimentales, con el nuevo material, principalmente en Alemania y Francia. Circunstancias éstas que, sumadas a la alarma generada por algunos accidentes de gran trascendencia a nivel europeo (pasarela en la exposición de París [24], hundimiento de un Hotel en Basilea [18], tercer depósito en Madrid con 30 fallecidos [6], otros colapsos en Berna y Milán [7], entre otros), desembocan en el desarrollo y aprobación de las primeras normativas sobre hormigón armado.

Curiosamente, por estas fechas, la Compañía Anónima del Hormigón Armado de Sestao (Vizcaya), una de las grandes competidoras de Ribera, comienza su primera gran obra en 1906, la Alhóndiga Central de Bilbao (véase Figura 4.2). En esta edificación no se aplica en absoluto la nueva normativa; es más, ni siquiera se tienen en cuenta los criterios de cálculo publicitados por la firma [23]. Aún así, el sistema todavía pervive de la mano de los industriales más potentes, pues sus empresas cuentan con notables técnicos ya habituados a trabajar con el hormigón armado.



Figura 4.2: Alhóndiga de Bilbao.

Se ha observado cómo el desarrollo normativo del hormigón armado ha ido parejo no sólo al desarrollo científico, sino a la formación con la que cuentan los ingenieros dedicados al cálculo de estructuras. En Francia Charles Rabut (1852-1925) inaugura la docencia del hormigón en 1897-98, en la Escuela Nacional de Puentes y Caminos. En España, durante el curso 1910-11 estas enseñanzas comienzan en la Escuela de Caminos de la mano de Juan Manuel de Zafrá (1869-1923), quien asume públicamente la defensa de un nuevo estatus del hormigón basado en el conocimiento y la justificación científica frente al sistema de patentes, manteniendo una agria polémica [25] con François Hennebique (1842-1921) a través de la Revista de Obras Públicas, en varios de sus números.

Podría entonces afirmarse que la conjunción de factores económicos, técnicos, docentes y normativos es, consecuentemente, lo que produce la desaparición paulatina del sistema de patentes, que sobrevive hasta la segunda década del siglo XX. Caso de fijar un hito histórico en España para el inicio de su declive, este sería la aparición de la Circular francesa de 1906 [12]. El fenómeno es común a otros países, y se publican, entre otras, normas suizas (1903 y 1910), alemanas (1904 y 1907), estadounidenses (1908 y 1910), italianas (1907) y rusas (1908 y 1911). En España no se aprobó ninguna norma para el proyecto y el cálculo de estructuras de hormigón armado hasta la Instrucción de 1939, por lo que fue frecuente adoptar la Circular francesa en las primeras décadas del siglo XX. Por lo tanto, son las nuevas regulaciones y la novedosa docencia universitaria las que generalizan el conocimiento, aportando criterios técnicos suficientes para abordar el cálculo estructural, sin recurrir a sistemas patentados. No obstante, son varias las organizaciones vinculadas a la época de las patentes que prosiguen su actividad, una vez superada esta fase, especialmente Wayss & Freytag (hoy existe como ingeniería) y Hennebique (activa hasta 1967).

En este escenario, al afrontar la rehabilitación de estructuras de esas épocas, en las que las patentes tuvieron tanto protagonismo, u otras posteriores en las que las normativas no acaban por estar consolidadas en España, implica la existencia de grandes limitaciones a los conocimientos disponibles acerca de su concepción, materiales, cálculo y construcción. Por ello, antes de proceder a la intervención sobre estas estructuras, debe conocerse en profundidad su génesis, si se efectuó bajo patente y las divergencias entre el sistema y la realidad construida, así como la naturaleza y propiedades básicas de sus materiales.

Dicho lo anterior, adicionalmente, parece adecuado abordar un estudio específico que oriente acerca de potenciales soluciones de refuerzo de los que podríamos denominar "hormi-

gonos antiguos", entendiendo por tales aquellos con edades superiores a los 50 años (época de patentes, pre-normativos, degradados, etc.), los cuales representan una parte, nada desdeñable (véase Figura 4.3) del total de las estructuras de hormigón actualmente en servicio.

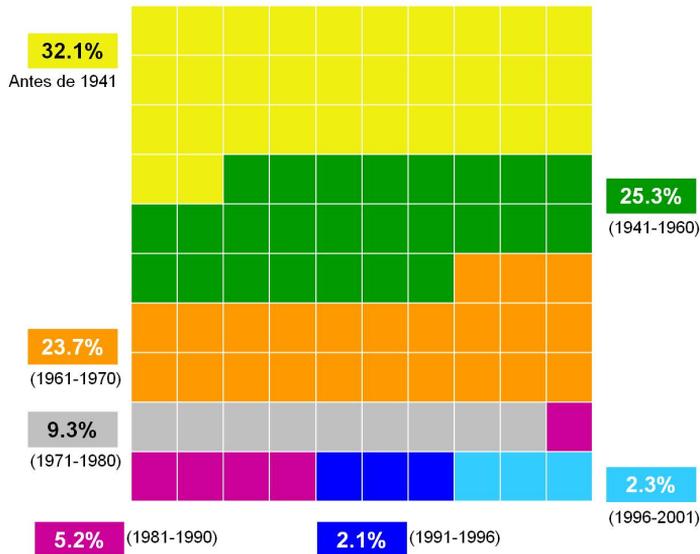


Figura 4.3: Distribución por antigüedad del parque edificado de Bilbao.

Por las especiales características de degradación de estos hormigones antiguos: alta porosidad, bajas resistencias mecánicas, alta deformabilidad, etc., no parecen adecuados para reforzarlos gran parte de los sistemas existentes en el mercado, pues muchos implican una manifiesta incompatibilidad refuerzo/sustrato, en cuestiones tales como: alta rigidez del refuerzo, empleo de soluciones impermeables, sustratos poco cohesivos y difícilmente adherentes, etc. En definitiva, podrían descartarse gran parte de las opciones de refuerzo actuales teniendo, por lo tanto, que plantear otras nuevas que muestren esa necesaria compatibilidad con estas estructuras tan antiguas de hormigón, algunas de las cuales están, además, protegidas como bienes de interés cultural.

En definitiva, se hace necesario abordar en próximos apartados qué se entiende por hormigones antiguos (sus características) y, por otra parte, definir las propiedades y comportamiento de un sistema de refuerzo compatible con aquellos. En definitiva, toda vez que ya se han presentado las características y mercado que puede tener la rehabilitación, la trascendencia concreta del refuerzo a flexión y las especificidades del caso de los hormigones antiguos, los autores proceden a entrar en materia más técnica con una doble visión experimental y analítica.

4.3. Hormigón antiguo, de baja calidad o "pobre"

Los problemas del hormigón se manifiestan por medio de sus patologías. Éstas pueden tener distinto carácter u origen (físico, mecánico o químico). Sin embargo, todas las opciones

concluyen un mismo resultado: reducir las propiedades del hormigón y amenazar su durabilidad y, por tanto, la de sus estructuras. Como antes se exponía, la mayoría de las problemáticas estructurales se localizan en elementos que trabajan a flexión (forjados y vigas).

En el argot constructivo, se considera como hormigón de baja calidad aquel en el que ciertas características físicas y mecánicas se encuentran por debajo de lo fijado en las normas actuales. Son varias las causas por las que se puede obtener un hormigón de baja calidad: diseño incorrecto, ejecución errónea, uso de materiales inadecuados y nulo o insuficiente mantenimiento.

En otras ocasiones la causa de la baja calidad de un hormigón puede ser el contexto histórico (época de las patentes). Incluso hormigones fabricados bajo las primeras instrucciones pueden presentar problemas debido a los límites fijados entonces, bastante inferiores a los actuales, especialmente en lo relativo a los requisitos mecánicos de los materiales. Además, debido a cierto desconocimiento del material era habitual emplear componentes inadecuados: acero dulce liso o arena de playa.

Dicho lo anterior, estos hechos no implican que todos los hormigones antiguos presenten problemas, si bien es cierto que gran parte de las patologías se observan en estructuras erigidas con anterioridad a 1973, fecha en la que la Instrucción incluyó medidas para preservar la calidad y durabilidad. Se puede definir como hormigón de baja calidad o "pobre" aquel que cumpla alguna de estas características [19]:

- Resistencia característica a compresión inferior a 15 MPa.
- Bajo contenido en cemento ($<250 \text{ kg/m}^3$).
- Alta porosidad ($>17\%$).
- Alto contenido de cloruros ($>0,4\%$).
- Elevada relación agua cemento ($A/C > 0,5$).
- Carbonatación del hormigón hasta las armaduras.

Estas características no son independientes entre sí, sino que más bien se encuentran relacionadas, pues la presencia de una de estas carencias fomenta el desarrollo de otras. El paso del tiempo juega en contra de este tipo de hormigones si no se aborda su rehabilitación. Los hormigones de baja calidad se encuentran presentes en nuestras estructuras, nuestro patrimonio e incluso nuestras viviendas; forman parte de nuestra vida cotidiana. Una razón suficiente para analizar sus métodos de rehabilitación.

4.4. Soluciones tradicionales y novedosas del refuerzo estructural

Son muy numerosos los tipos de materiales de reparación y refuerzo estructural que pueden encontrarse en la actualidad en el mercado. Su práctica totalidad podría agruparse en tres familias: materiales de base inorgánica (recrados de hormigón en forjados, por ejemplo), orgánica (hormigones poliméricos para el refuerzo de pilares, por ejemplo) y modificados

(cementos adicionados con polímeros). Además de estas soluciones masivas, el refuerzo estructural también se ha abordado mediante el empleo de elementos auxiliares de refuerzo: suplementación con perfiles estructurales, chapas de acero pegadas, encamisado o empresillados en pilares y vigas, etc. (véase Figura 4.4).



Figura 4.4: Recrecido de hormigón (izquierda) y pegado de chapas de acero (derecha).

Junto a las anteriores soluciones "pesadas", más tradicionales, se plantean otra serie de tecnologías más "ligeras", basadas en materiales compuestos de matriz orgánica e inorgánica con núcleos reforzantes (fibras, textiles, etc.). Un caso de amplio éxito han sido los *FRPs* (*Fibre Reinforced Polymer*): bandas, laminados y varillas (*cut-in*), todas ellas constituidas por matrices orgánicas reforzadas con fibras de carbono, vidrio, aramida, entre otras.

Adicionalmente, en los últimos 10 años se están planteando nuevas líneas de trabajo, centradas en el refuerzo de las estructuras de hormigón (e incluso de fábrica) por medio del empleo de matrices inorgánicas a modo de morteros armados por tejidos técnicos. Siendo los núcleos reforzantes mallas uni/bi-direccionales conformados por fibras flexibles y de distintas naturalezas (acero, basalto, carbono, vidrio, naturales, etc.). Estas tecnologías, aún en desarrollo, son lo que se denominan como *TRM/C/G* (*Textile Reinforced Mortar/Cement/Grout*), en adelante *TRM*. Se trata de sistemas ampliamente difundidos en la escena internacional [30]. Una solución particular híbrida entre los ámbitos *FRP* y *TRM* lo constituyen los *SRP* (*Steel Reinforced Polymer*) y el *SRG* (*Steel Reinforced Grout*), presentados recientemente [34].

Dentro del presente capítulo, se abordará el empleo del sistema *TRM* para reforzar en flexión hormigones de bajas prestaciones (antiguos o "pobres"). Este enfoque se plantea como solución complementaria (no excluyente) a los *FRPs* y, fundamentalmente, en el ánimo de compensar algunas debilidades de la mayoría de los sistemas tradicionales de refuerzo: intervenciones pesadas, durabilidad limitada, compatibilidad integral (física y cultural), entre otros.

Para aquellas estructuras de hormigón antiguo, o incluso en la fábrica, estructuras con una elevada sensibilidad higrométrica y muy deformables (ductilidad estructural), además de con unos sustratos muy degradados y poco cohesivos, el *TRM* -muy cercano a la propia naturaleza del hormigón- supone una opción más que interesante, pues su naturaleza inorgánica (mortero de cal, cemento, yeso, etc.) y porosa resulta altamente compatible. Al tratarse de una tecnología basada en un ámbito inorgánico, tienen una mejor resistencia al fuego frente a

los polímeros y una mejor sostenibilidad frente a la manipulación de los *FRP* (emisiones de estirenos, empleo de derivados del petróleo, etc.).

No obstante, en comparación con los sistemas basados en matrices orgánicas (resinas), como es el caso de los *FRPs*, la solución *TRM* resulta en una menor eficacia en términos de capacidad portante. Este rendimiento está altamente condicionado por la inferior adherencia de la matriz inorgánica, así como por la menor cantidad de fibras en la configuración tipo tejido. Por citar un caso práctico, sobre la base de algunos resultados experimentales, se puede afirmar que, en términos de carga última, el encamisado de pilares con *TRM* es entre un 80 % y un 90 % tan eficaz como los de *FRP* en configuraciones idénticas [2].

4.5. Caracterización del *TRM*

El mortero reforzado con tejido *TRM* podría considerarse como una evolución del *FRP*, habiendo notables diferencias entre ambos sistemas de refuerzo. En primer término, la sustitución de las resinas (matrices orgánicas) del *FRP* por morteros (matrices inorgánicas) promueve la necesidad de adaptar el núcleo reforzante. En los materiales compuestos fibroplásticos las fibras se disponen en láminas unidireccionales continuas, que son fácilmente impregnales por resinas epoxis. Sin embargo, este tipo de configuración es ineficaz cuando la matriz es un mortero de base inorgánica. Para lograr un material compuesto monolítico es necesario permitir el flujo del mortero a través del núcleo de refuerzo. Esto se consigue mediante el uso de tejidos, una disposición que permite la cohesión de las diferentes capas de mortero a través de las celdas que configuran la malla.

En segundo lugar, otra diferencia relevante lo constituye el comportamiento a tracción pura del *TRM* frente al *FRP*. Los fibroplásticos (*FRPs*), donde la matriz es más dúctil que las fibras, muestran un comportamiento elástico-lineal hasta alcanzar una rotura frágil. Por el contrario, un mortero se fisura mucho antes del fallo de las fibras de modo que el tejido soporta carga cuando la matriz comienza a desarrollar fisuras, logrando este efecto con un mínimo volumen de fibras entre el 1 y el 3 % [28].

En la Figura 4.5 se presenta la respuesta experimental del *TRM* en tracción, distinguiéndose 3 fases bien diferenciadas:

- Fase I: Transmisión uniforme de los esfuerzos en toda la sección, siendo la rigidez inicial prácticamente la del propio mortero. Esta fase concluye con la primera fisura.
- Fase II: Fisuración múltiple del material compuesto. Con el incremento de la fuerza de tracción se generan nuevas fisuras. La distancia entre fisuras y su espesor está directamente afectado por el material de refuerzo, su cuantía, la interacción entre matriz y tejido y la resistencia a tracción del mortero.
- Fase III: Una vez finalizada la formación de fisuras sólo el núcleo reforzante soporta la carga. Esta etapa es prácticamente lineal con un módulo de Young cuantificado entre un 10 y 30 % inferior al del propio tejido [8]. Esta reducción se ve motivada por la pérdida de adherencia entre el tejido y el mortero, y por la imposibilidad de la matriz de impregnar todas las fibras (vidrio, carbono, aramida, basalto, etc.) del tejido.

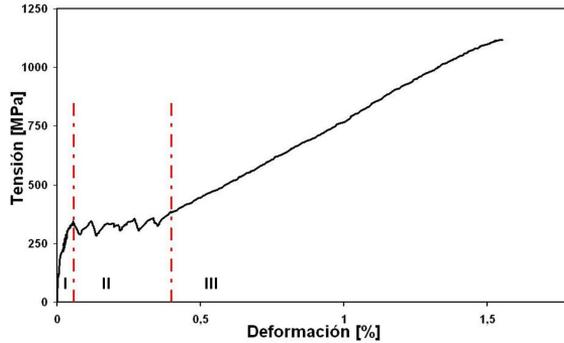


Figura 4.5: Curva del TRM en tracción uni-axial.

En lo relativo a su aplicabilidad, señalar cómo el *TRM* precisa de escasa ejecutoria y preparación de los sustratos sobre los que aplicarse, mientras que es bien conocido cómo en otras sistemáticas de refuerzo es necesario regularizar y tratar la superficie a reforzar con el fin de evitar concentraciones de tensiones o despegues prematuros.

En tiempos recientes se ha abundado de manera notable en el empleo de tejidos como núcleo reforzante para matrices inorgánicas en variadas aplicaciones: elementos prefabricados autoportantes [15], encofrados perdidos [26] y para reforzar estructuras de fábrica [13, 14]. No obstante, la aplicación del *TRM* para el refuerzo estructural del hormigón es aún muy limitada, habiéndose centrado, hasta la fecha, al confinamiento de pilares [2], refuerzo a cortante [33] y a flexión [9], pero siempre en hormigones de media y alta resistencia (>30 MPa).

En vista a posteriores análisis, es importante caracterizar correctamente el material compuesto estudiado. No sólo los materiales que lo conforman por separado, sino también el comportamiento del material compuesto en su conjunto (frente a esfuerzos de tracción pura), régimen en el que idealmente trabajaría el *TRM* si no estuviera adherido a la superficie a reforzar.

4.5.1. Mortero y tejido

La matriz inorgánica de esta solución compuesta (el mortero) es de base cementicia, diseñada con las suficientes prestaciones mecánicas a costes asequibles para promover su aplicación a gran escala. De modo tal que el contenido de resinas poliméricas sea inferior al 4% en peso, por lo que se garantizaría una cierta resistencia y reacción al fuego del refuerzo *TRM*.

Las propiedades mecánicas del mortero se determinan mediante ensayo (curación de 28 días) de probetas al uso ($40 \times 40 \times 160$ mm), siguiendo la normativa UNE-EN 1015-11:2000, obteniéndose una resistencia media a compresión y flexotracción de 20 MPa y 7,2 MPa, respectivamente. Adicionalmente, como refuerzo interno del TRM, se han empleado dos tipos de fibras, según las siguientes características:

- Tejido de carbono conformado por mechones de fibras distribuidos ortogonalmente (véase Figura 4.6 derecha). El peso de este tejido es de 200 g/m^2 , uniformemente en ambas direcciones, teniendo las celdas dimensiones de 4×4 mm.

- Tejido de acero, unidireccional, conformado por torzales o cordeles de alambre trefilado, estando formado cada torzal por 5 alambres entrelazados (véase Figura 4.6 izquierda). Estos filamentos permanecen fijados en su posición por medio de una malla auxiliar de polipropileno, distribuidos en 1,57 torzales por centímetro. Este empleo del acero da como origen a la denominación *Steel Reinforced Mortar (SRM)* y *Steel Reinforced Polymer (SRP)*, si la matriz es mortero o una resina (epoxi, mayormente), respectivamente. Sin embargo, emplearemos el término *TRM* también para el *SRM*, objeto del presente capítulo.

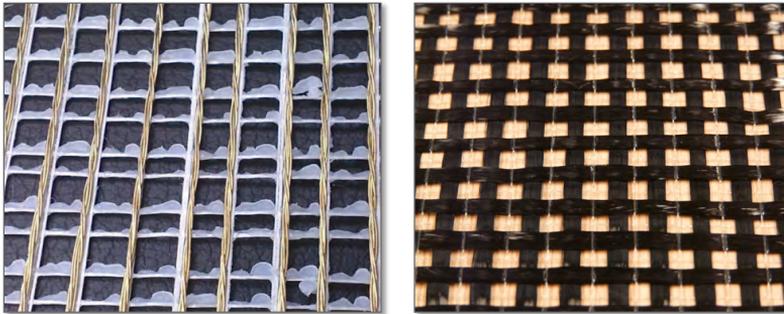


Figura 4.6: Tejidos de acero trefilado (izquierda) y de carbono (derecha).

La Tabla 4.1 presenta algunas propiedades de los materiales mencionados, siendo datos proporcionados por el suministrador industrial de los tejidos. Estos valores están referidos a las fibras de carbono y al alambre de base para las de acero, siendo propiedades que, evidentemente, pueden verse afectadas por el formato en el que se presentan: tejidos, como se puede apreciar en la Tabla 4.2.

El mechón es un haz de centenares (o miles) de fibras simples (filamentos) de modo que el comportamiento tenso-deformacional del mechón está influenciado por la posición e interacción de sus filamentos. Siendo cierto que, idealmente, todos los filamentos deberían posicionarse paralelos y estirados, sin embargo, dependiendo del método de fabricación pueden surgir divergencias entre el comportamiento fibras vs. mechón [3].

Propiedad mecánica	Tejido de fibra de carbono	Tejido de alambre de acero
Resistencia a la tracción [†] (MPa)	3500	3500
Módulo de Young (GPa)	240	206
Elongación rotura (%)	1,45	1,60
Espesor efectivo (mm)	0,056	0,075

[†] Respecto al espesor efectivo

Tabla 4.1: Propiedades mecánicas y geométricas del material de refuerzo del TRM.

Por lo tanto, sumando el hecho de que en un tejido actúan múltiples mechones paralelos, es evidente la necesidad de caracterizar mecánicamente los tejidos empleados en el TRM, lo que se hará fabricando por cada tipo de tejido 7 probetas de 600 × 100 mm, ensayándolas a esfuerzo axil de tracción (véase Tabla 4.2).

Propiedad mecánica	Tejido de fibra de carbono	Tejido de alambre de acero
Resistencia a la tracción [†] (MPa)	963	3165
Módulo de Young (GPa)	167	160
Elongación rotura (%)	0,72	2,21

[†] Respecto al espesor efectivo

Tabla 4.2: Propiedades experimentales de tejidos de carbono y acero.

Según esos resultados, hay una notable diferencia entre el experimento y los datos suministrados por el fabricante. Puede decirse que el bajo rendimiento a tracción pura del tejido de carbono, en términos de resistencia y elongación, puede atribuirse a la imposibilidad de aplicar la misma deformación inicial a todos los mechones del tejido [20], produciéndose roturas prematuras. En el caso del tejido de acero la resistencia a tracción es parecida pero con mayores elongaciones. En ambos materiales, se tomará el valor experimental del módulo de Young.

4.5.2. TRM sometido a tracción pura

No estando normalizado el ensayo de uniaxial de tracción para el *TRM*, se adopta su experimentación sobre probetas de $600 \times 100 \times 10$ mm (véase Figura 4.7) similares a otros estudios previos [16]. Al objeto de promover la fisuración en su tercio central y, de esa forma, facilitar la medida de la deformación del *TRM*, se instalan tejidos extra en ambos extremos (zonas de mordazas), permaneciendo 200 mm libres para poder medir la elongación real del material compuesto.



Figura 4.7: Perspectiva general del ensayo de tracción axial del TRM.

Se fabrican 7 probetas por cada tipo de tejido, con una sola capa de refuerzo textil, ensayándose a 28 días con una velocidad de 0,5 mm/min, controlando la deformación del tercio central mediante los correspondientes *LVDTs* (*Linear Variable Displacement Transducers*), acoplados a ambos lados de la muestra, y captando sus lecturas en un sistema de adquisición

4 | Refuerzo a flexión de hormigones de bajas prestaciones con TRM

Propiedad mecánica	Tejido de fibra de carbono	Tejido de alambre de acero
Resistencia a la tracción [†] (MPa)	1865	2959
Módulo de Young Fase III (GPa)	142	144
Elongación rotura (%)	1,37	2,76

[†] Respecto al espesor efectivo

Tabla 4.3: Datos experimentales de tracción pura del TRM.

de datos HBM MGC-Plus a 50Hz. Los resultados se condensan en la Tabla 4.3, donde se incluye el módulo de Young registrado en la Fase III. Esta información se utilizará para la elaboración (con posterioridad en el presente capítulo) de ecuaciones constitutivas que caractericen el comportamiento tenso deformacional del TRM. Las gráficas correspondientes a la Figura 4.8 muestran un comportamiento similar al descrito en la Figura 4.5 anterior.

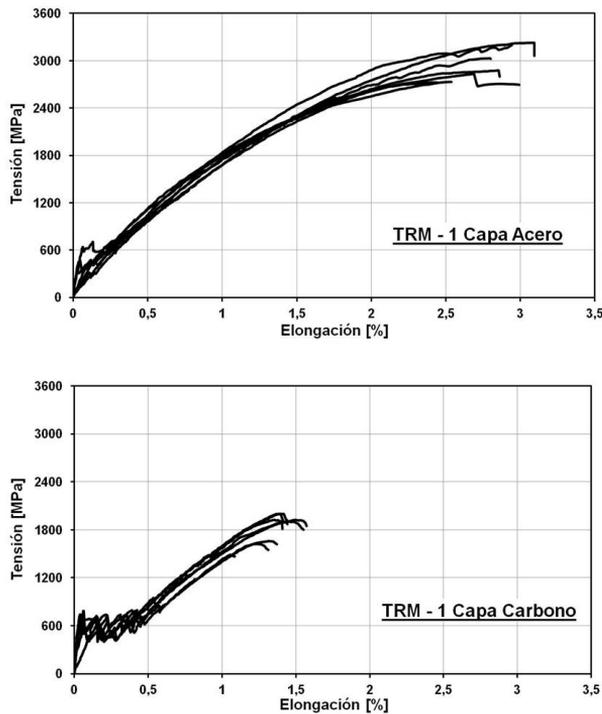


Figura 4.8: Tracción del TRM con tejido de acero (arriba) y de carbono (abajo).

A los efectos comparativos con las mismas matrices, pero ahora sin el tejido de refuerzo, se ensayan 7 muestras (bandas del mismo mortero) sin reforzar, obteniéndose los siguientes parámetros: resistencia a la tracción (σ_{mu}) = 2,48 MPa; elongación de rotura (ϵ_{mu}) = 0,03 % y módulo de Young (E_m) = 8,25 GPa. Pueden apreciarse los incrementos que proporciona el núcleo resistente al sistema TRM, frente a la banda de mortero, estimados en: 3, 2 y 2 órdenes de magnitud para la resistencia, rigidez y elongación, respectivamente.

Propiedad mecánica	Vigas a escala 1/3	Vigas a escala real
Resistencia a compresión del hormigón a 28 días (MPa)	17,2	17,2
Tensión de fluencia del acero (MPa)	672	589
Tensión de rotura del acero (MPa)	703	690

Tabla 4.4: Características mecánicas de los materiales de las vigas.

4.6. Ensayo del refuerzo a flexión con TRM

4.6.1. Construcción de las vigas de hormigón armado

A continuación se presenta un estudio sobre el efecto del refuerzo con TRM (tejido de carbono y acero, respectivamente) sobre vigas de hormigón armado de bajas prestaciones reforzadas frente a la flexión. En esta campaña experimental se trabaja con dos escalas: real (5 vigas) y 1/3 (12 vigas), tal y como se presenta en la Figura 4.9.

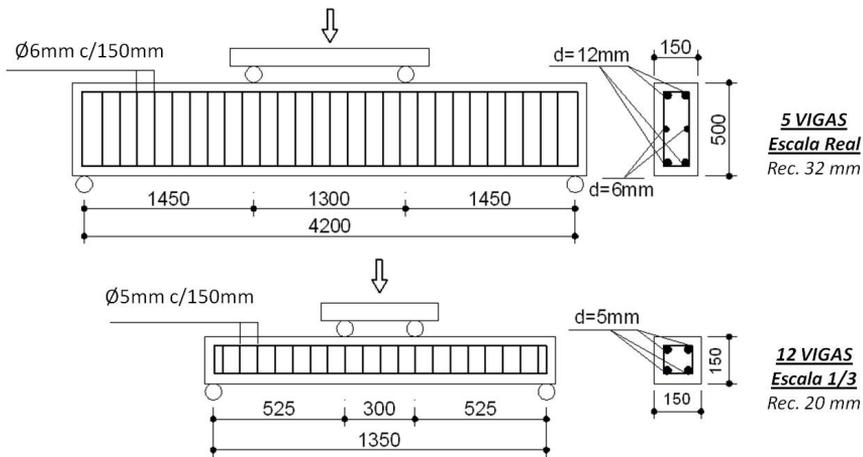


Figura 4.9: Configuración del ensayo a flexión de vigas.

Al objeto de reproducir un hormigón de bajas prestaciones (estructuras antiguas), se optó por diseñar uno de baja calidad con una resistencia media inferior a 20 MPa, adoptando la siguiente dosificación: 200 kg/m³ (cemento) y 0,57 (A/C). Sobre una toma de ese hormigón (Ø 150×300 mm), se ensayó su resistencia media a 28 días (UNE 83303/84) y, adicionalmente, se hizo lo propio con sus armaduras (UNE EN 100002-1), según se indica en la Tabla 4.4.

4.6.2. Refuerzo con TRM de las vigas de hormigón armado

Al objeto de facilitar unas condiciones superficiales de rugosidad adecuadas al refuerzo, se abujardó la cara inferior de cada viga (flexión positiva) que era la que recibiría al TRM.

4 | Refuerzo a flexión de hormigones de bajas prestaciones con TRM

Una vez eliminado por soplado el polvo superficial generado y humectada hasta saturación la superficie adherente, para así obviar absorciones parciales del agua del TRM (mortero), se procede al refuerzo que consiste en (véase Figura 4.10):

- Extensión de una primera capa de mortero con espesor de 4 a 5 mm.
- Colocación del tejido sobre el mortero aún fresco. Conviene estirar el tejido por medio de un rodillo (por ejemplo).
- Cubrición del tejido con una capa de mortero similar a la primera. En caso de ser necesario aplicar más capas de tejido por necesidades estructurales del refuerzo, se procedería de igual manera.
- Adicionalmente, para evitar despegues prematuros del TRM, se instalan anclajes en "U" realizados con el mismo mortero y tejido del refuerzo.

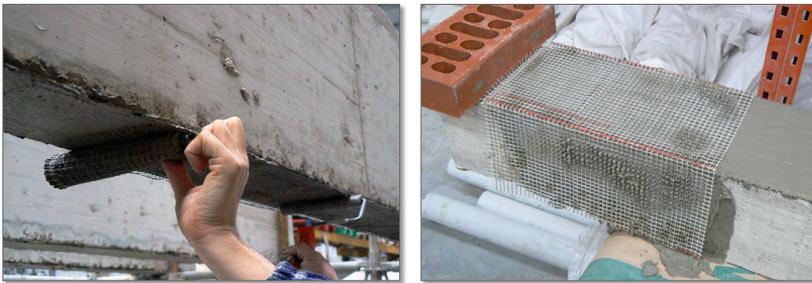


Figura 4.10: Aplicación del TRM en techo (izquierda) y colocación del anclaje en "U" (derecha).

Las 12 vigas a escala 1/3 son: 2 de referencia sin refuerzo (r-1 y r-2), 2 reforzadas con TRM constituido por una capa de tejido de carbono (c1) y, finalmente, 8 vigas reforzadas con tejido unidireccional de acero. Estas últimas desglosadas en: 4 con una capa de tejido (2 sin anclajes "U", s1, y 2 con anclajes en "U", s1u), 2 con dos capas de tejido sin anclaje (s2) y, finalmente, 2 muestras con matriz de resina epoxi (fs1) a modo de comparativa con las s1. Las 5 vigas de escala real se desglosan en: 1 de referencia, sin refuerzo (R), 1 reforzada con cuatro capas de tejido de carbono (C4), 3 reforzadas con tejido unidireccional de acero. De estas tres últimas, una tiene dos capas sin anclar (S2), otra viga igual pero con anclajes en "U" (S2U) y, finalmente, una tercera con cuatro capas de tejido ancladas en "U" (S4U).

4.6.3. Ensayo de las vigas reforzadas

La simulación de carga uniformemente distribuida se asume cumplida con la configuración de flexión de las vigas en cuatro puntos. La deformación se ejerce mediante una velocidad del pistón actuante de $3 \mu\text{m/s}$, controlando la flecha de la viga con 6 LVDTs y captando todas los datos de los sensores en el sistema de adquisición HBM MGC-Plus a 1Hz.

Se constata cómo las vigas de referencia a escala 1/3 (r-1 y r-2) colapsan por deformación excesiva de la armadura de tracción, debido a que se ha querido seguir la sistemática constructiva de antaño empleando acero estirado en frío (menor ductilidad). Sin embargo, en las vigas a escala real (R) el fallo se produce por agotamiento de la cabeza comprimida. Por otro

lado, en las vigas reforzadas con TRM [19] se registran dos modos de fallo distintos (véase Figura 4.11). El primero consiste en el despegue prematuro del TRM desde una fisura intermedia, comenzando en la zona de flector máximo y extendiéndose hacia los apoyos, siendo un fallo localizado en el interior del TRM que provoca la pérdida de su monolitismo (fallo frágil, sin aviso previo). El segundo supone la fractura del refuerzo cuando el tejido del TRM alcanza su máxima elongación.



Figura 4.11: Despegue prematuro (izquierda) y rotura tejido carbono (derecha).

Se observa una variación muy notable del patrón de fisuración. En las vigas sin refuerzo de TRM (referencia) se da una escasa fisuración, mientras que en las reforzadas su número aumenta considerablemente siendo más finas y uniformemente distribuidas que aquellas, indicando un mejor reparto de los esfuerzos. En la Tabla 4.5 se presentan los resultados de la campaña experimental, siendo la flecha indicada la correspondiente al instante de máximo flector, donde el efecto del refuerzo es muy apreciable en todos los casos.

Viga	Tejido de refuerzo	Nº de capas	Momento flector Máximo (kN·m)		Modo de fallo
				Ratio	
r-1	—	—	3,32	—	Acero
r-2	—	—	3,39	—	
c1-1	Carbono	1	5,35	1,61	Refuerzo
c1-2		1	4,63	1,39	
s1-1	Acero	1	6,49	1,95	Despegue prematuro del refuerzo
s1-2		1	7,15	2,15	
s1u-1		1	8,29	2,49	Refuerzo
s1u-2		1	8,25	2,48	
fs1-1		1	8,18	2,46	
fs1-2		1	8,56	2,57	
s2-1		2	9,97	3,00	Despegue prematuro del refuerzo
s2-2		2	9,56	2,88	
R	—	—	72,32	—	Hormigó, cabeza comprimida
C4	Carbono	4	89,29	1,23	Despegue prematuro del refuerzo
S2	Acero	2	102,66	1,42	
S2U		2	99,54	1,38	
S4U		4	114,16	1,57	

Tabla 4.5: Características y resultados de las vigas ensayadas.

Un estudio interesante es analizar las leyes experimentales que proporcionan los diagramas de flector frente a flecha, comprobándose cómo hay cuatro estadios posibles. El primero en el que toda la sección trabaja a flexión hasta que el hormigón se fisura. El segundo que comprende la fase elástica de las armaduras de acero. Un tercer estadio en el que se aprecia de manera notable el efecto del TRM y, finalmente, el cuarto que representa el comportamiento de la viga tras el fallo del refuerzo.

En la Figura 4.12 se muestran las gráficas de las vigas a escala 1/3. Se constata un aumento apreciable de la rigidez, capacidad portante y ductilidad de las vigas reforzadas frente a las de referencia. Ante la baja inercia de la sección de las vigas (150×150mm) el efecto que aporta la rigidez del TRM es muy notable en el segundo estadio antes mencionado (fase elástica del acero).

En el caso particular de las vigas reforzadas con tejido unidireccional de acero, la rigidez de la viga en su segundo y tercer estadios de la flexión se incrementa ligeramente su rigidez con la aplicación de una segunda capa (Figura 4.12d). Además, se aprecia cómo la fragilidad por despegue prematuro (Figura 4.12b) produce una pérdida repentina de capacidad portante y su consiguiente fallo, pero la aplicación de los anclajes ("U"), en ambos extremos, evita el fallo y permite que el TRM asuma carga hasta rotura, aumentándose el momento máximo y la ductilidad de las vigas frente al caso en el que no tengan anclajes. Referente a la sustitución de las matrices (mortero frente a resina epoxi) según las curvas de la Figura 4.12c (familias s1u y fs1) se puede comprobar un comportamiento mecánico muy similar.

Adicionalmente, en la Figura 4.13 se presentan los resultados de las vigas a escala real. Hasta el momento en el que el acero alcanza su valor de fluencia (frontera estadios 2º y 3º), los diagramas de las vigas con y sin refuerzo son muy similares, apenas se registra un ligero incremento de la rigidez. Tratándose ahora de vigas de elevado canto (inercia), tal y como se construía en la época, se minimiza en gran medida el efecto del refuerzo de TRM hasta que alcanzándose el estadio plástico, las armaduras aportan menor rigidez al conjunto, estando relacionada la pendiente de la tercera fase con la rigidez del refuerzo.

En estas vigas grandes, sin anclaje, el despegue prematuro del refuerzo es el modo de fallo habitual. Según se aprecia en las vigas S2U y S4U (anclajes), siendo satisfactorio el efecto de los anclajes, no se alcanza, tal y como ocurría en las vigas pequeñas, la rotura del TRM. Es cierto que la delaminación del refuerzo se retrasa, pero los anclajes terminan cediendo a los elevados esfuerzos de rasante transmitidos (se alcanza una gran deformación en un elemento de gran inercia).

4.7. Estudio analítico-numérico del hormigón reforzado

4.7.1. Modelización a tracción del TRM

Este es el paso previo para abordar el estudio en la viga reforzada en su globalidad. Partiendo de los datos de los ensayos de tracción axial anteriores, es posible desarrollar modelos matemáticos sencillos (ecuaciones constitutivas) que reproduzcan el experimento. Tomando como referencia la Figura 4.5, se aborda la simulación de las 3 fases allí indicadas. La Fase I

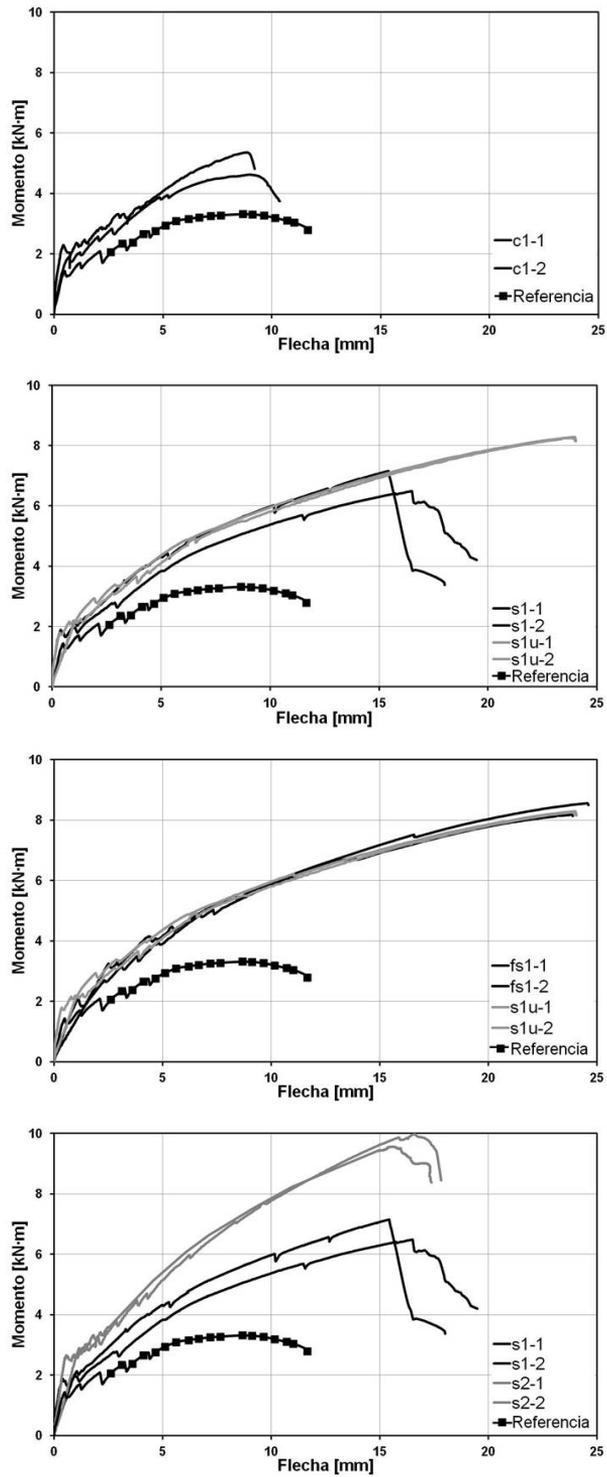


Figura 4.12: Relación momento-flecha en vigas a escala 1/3. Figuras a d de arriba abajo.

4 | Refuerzo a flexión de hormigones de bajas prestaciones con TRM

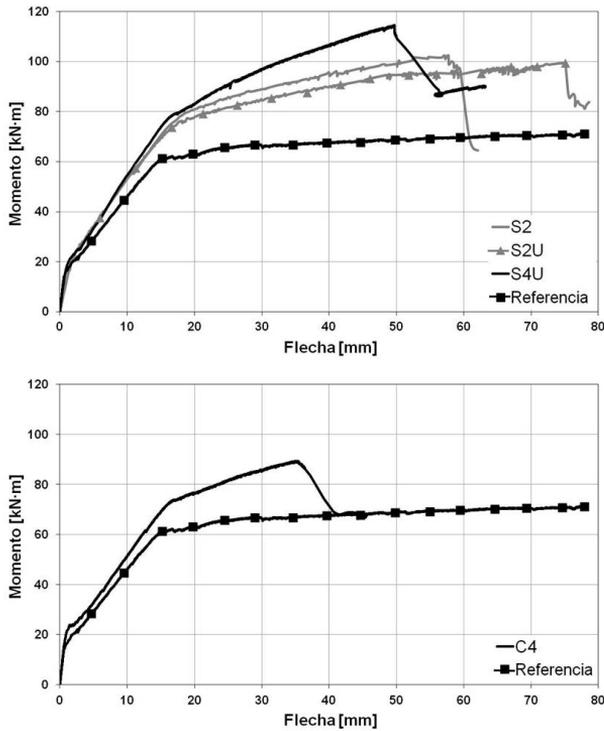


Figura 4.13: Relación momento-flecha en vigas a escala real.

se define utilizando la ley de mezclas que nos dice que el módulo de Young del *TRM* en esta fase E_{c1} depende de la fracción volumétrica del tejido V_f , la del mortero V_m y de los módulos respectivos de las fibras y mortero E_f y E_m , respectivamente:

$$E_{c1} = E_f V_f + E_m V_m \quad (4.1)$$

La Fase II (formación fisuración) se simplifica a una línea horizontal ($E_{c2} = 0$), que se corresponde al comienzo de la fisuración del mortero pudiéndose emplear, de nuevo, la ley de mezclas. Es decir, la tensión media de fisuración del *TRM* (σ_{mc}) se obtiene de la ecuación (la resistencia a tracción pura del mortero σ_{mu} se ha ensayado con anterioridad):

$$\sigma_{mc} = \frac{E_{c1} \sigma_{mu}}{E_m} \quad (4.2)$$

En referencia a la Fase III, por su similitud de comportamiento, se recurre a la expresión del EC2-Parte1³ que permite el control de la fisuración en el hormigón armado [19]. La ecuación 4.3 es el resultado de adaptar esa expresión al *TRM*.

$$\sigma = (\varepsilon - \varepsilon_{mu}) E_f + k_t \frac{\sigma_{mu}}{V_f} (1 + \alpha_e V_f) \quad (4.3)$$

³Eurocódigo.

Siendo:

k_t = factor dependiente de la duración de la carga (empíricamente = 0,2)

α_e = ratio E_f/E_m

$\sigma = \sigma_{mc} = \sigma_{TRM}$

$\varepsilon = \varepsilon_{mc} = \varepsilon_{TRM}$

Es decir, conociendo σ_{mu} puede obtenerse la elongación del *TRM* al final de la fase II (ε_{mc}), según se despeja en la ecuación 4.4:

$$\varepsilon_{mc} = \frac{\sigma_{mc} - k_t \frac{\sigma_{mu}}{V_f} (1 + \alpha_e V_f)}{E_f} + \varepsilon_{mu} \quad (4.4)$$

Con las ecuaciones anteriores, se obtendrían las leyes de modelización frente a las áreas llenas respectivas de las curvas experimentales de la Figura 4.14 donde, únicamente, se incluye el caso del acero por ser el más relevante en cuanto a sus discrepancias con el ensayo.

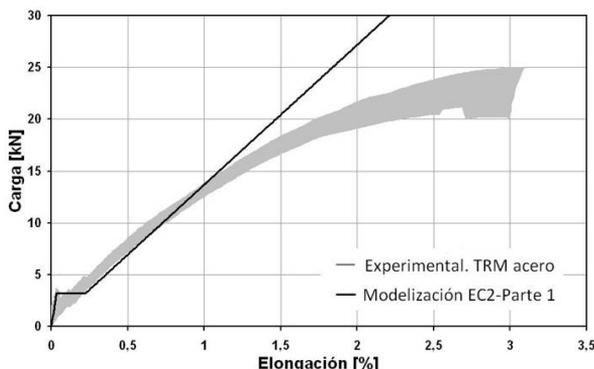


Figura 4.14: TRM tejido de acero: comparativa modelización-experimentación.

Las diferencias entre el modelo y el experimento son despreciables para bajos niveles de deformación. Sin embargo, en estos refuerzos externos, es prioritario controlar el modo de fallo obviando las notables discrepancias que sí se aprecian en el resto de la modelización (divergencia en Fase III). A este respecto, con el fin de mejorar los resultados del modelo propuesto, se introduce la aproximación de Richard y Abbot [29] expresada en la ecuación 4.5, tal y como ya se justifica por los autores en investigaciones anteriores [21]. Con esta corrección, habitual en el caso del hormigón zunchado, se consigue afinar el modelo en la Fase III de fallo, que es el ámbito de fallo del *TRM*, donde la pendiente de las curvas anteriores tiende a cero.

$$f_c = \frac{(E_1 - E_2) \varepsilon_c}{\left[1 + \left(\frac{(E_1 - E_2) \varepsilon_c}{f_0} \right)^n \right]^{\frac{1}{n}}} + E_2 \varepsilon_c \quad (4.5)$$

Las ecuaciones 4.3 y 4.5 se entrelazan para conformar la ecuación 4.6 que ya encaja mucho mejor con los resultados experimentales.

$$\sigma = \frac{(\varepsilon - \varepsilon_{mu}) E_f}{\left[1 + \left(\frac{(\varepsilon_1 - \varepsilon_{mu}) E_f}{f_0} \right)^n \right]^{\frac{1}{n}}} + k_t \frac{\sigma_{mu}}{V_f} (1 + \alpha_e V_f) \quad (4.6)$$

En esta ecuación, para E_1 se asigna el módulo de Young del tejido E_f y se asume que la Fase III tiende a la asíntota horizontal (buen ajuste experimental), por lo que puede fijarse un E_2 nulo. Es decir, f_0 refleja el valor de la ordenada de esa asíntota cuyo dato se establece como la resistencia máxima del TRM a tracción uniaxial en el ensayo anterior: 1865 MPa y 2959 MPa para el acero y carbono, respectivamente. Todo lo cual se concreta en la Figura 4.15 que ya incluye la corrección de Richard y Abbot.

En definitiva, el modelo aquí presentado puede emplearse como una ecuación constitutiva del TRM en tracción, según vías de estudio analítico-numérica para vigas de hormigón armado con este sistema TRM, objeto de desarrollo en el siguiente apartado.

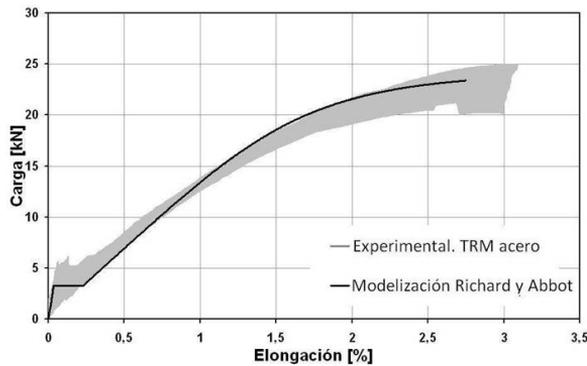


Figura 4.15: TRM tejido de acero: comparativa final modelización-experimentación.

4.7.2. Modelo numérico de vigas de hormigón armado reforzadas a flexión

Siguiendo la vía analítica antes expuesta, se pasa ahora a su integración en el caso de una viga de hormigón armado reforzada con TRM. Los estudios analítico-numéricos, convenientemente desarrollados, pueden llegar a ahorrar notables recursos en las, algunas veces, demasiado extensas campañas experimentales. Ya se da cierto histórico sobre la aplicación de modelos numéricos en refuerzos como es el caso del FRP [32] o el SRP [22], por ejemplo.

Para el caso del presente capítulo, el modelo de la viga reforzada con TRM se desarrolla en Microsoft[®] Excel y está basado en la discretización, a modo de láminas paralelas a las fibras traccionadas/comprimidas, según niveles de la sección transversal. De modo tal que el hormigón se divide en 52 elementos lámina (rectangulares), tal que la armadura de acero y el refuerzo de TRM se asignan al nivel o lámina en el que geoméricamente estén ubicados.

Para la ecuación constitutiva del hormigón a compresión, se sigue lo indicado en el EC2-Parte 1, mientras que para el acero de las armaduras se adopta el modelo de Park y Pauley

[27] y, finalmente, para modelizar el *TRM* (lamina o nivel traccionado) se emplea el modelo anteriormente desarrollado. Mediante un proceso iterativo, puesto a punto por los autores en colaboración con el Profesor Carlos Chastre de la Universidad Nova de Lisboa [19], el modelo calcula la deformación longitudinal de todos los niveles definidos. Por lo tanto, la carga relacionada con esa deformación (ecuaciones constitutivas) deberá garantizar el equilibrio de la sección.

Dicho lo anterior, empleando el concepto de curvatura (φ), y partiendo de la deformación del nivel superior de la sección (ε_0), se puede obtener la deformación del resto de niveles siguiendo la ecuación 4.7 y la Hipótesis de Bernoulli [17]:

$$\varepsilon^i = \varepsilon_0 + \varphi \cdot y^i \quad (4.7)$$

Donde:

- ε^i = deformación unitaria del nivel correspondiente
- ε_0 = deformación unitario del nivel superior
- φ = curvatura de la sección
- y^i = altura del nivel estudiado

Una vez definidas todas las deformaciones y haciendo uso de las ecuaciones constitutivas, se determinan las tensiones respectivas por lámina/nivel, al objeto de que se garantice el equilibrio (ecuaciones 4.8 y 4.9), obteniéndose así el momento flector resultante.

$$N = \sum_{i=1}^{nc} f_c^i A_c^i + \sum_{i=1}^{ns} f_s^i A_s^i + \sum_{i=1}^{nf} f_f^i A_f^i \quad (4.8)$$

$$M = \sum_{i=1}^{nc} f_c^i A_c^i y_c^i + \sum_{i=1}^{ns} f_s^i A_s^i y_s^i + \sum_{i=1}^{nf} f_f^i A_f^i y_c^i \quad (4.9)$$

Adicionalmente, el cálculo de la flecha se aborda según la EHE-08⁴ [10], siguiendo el método Branson [4], método que quedaría invalidado para flechas que conduzcan a la plastificación del acero. Para estos últimos casos, claves en elementos de hormigón armado a flexión, se adopta una interpretación de la teoría de la rótula plástica adaptada a las vigas ensayadas [19], cuestión ya ajena al presente capítulo.

4.8. Correspondencia analítico-experimental

Una vez aplicada la simulación anteriormente propuesta a las vigas armadas con *TRM* (escaladas y de tamaño real), su adaptación a los ensayos queda patente en la Figura 4.16, correspondiente al caso del *TRM* con alambres de acero, estando recogidos los restantes desarrollos, de similar comportamiento, en la tesis del Dr. Pello Larrinaga [19].

A partir de la observación de las curvas (series "s1" y "s2"), se concluye que el modelo realiza una simulación correcta de los ensayos hasta que se produce el despegue prematuro

⁴Instrucción de hormigón estructural.

del TRM, que no es capaz de predecir. Al objeto de poder avanzar ese despegue, se requeriría un estudio específico del comportamiento de la interfase TRM-hormigón, cuestión ya del todo ajena a los alcances del presente capítulo. En el caso de las vigas con los anclajes "U" [19], el modelo sí acierta a prever, de manera aproximada, el punto de rotura del TRM.

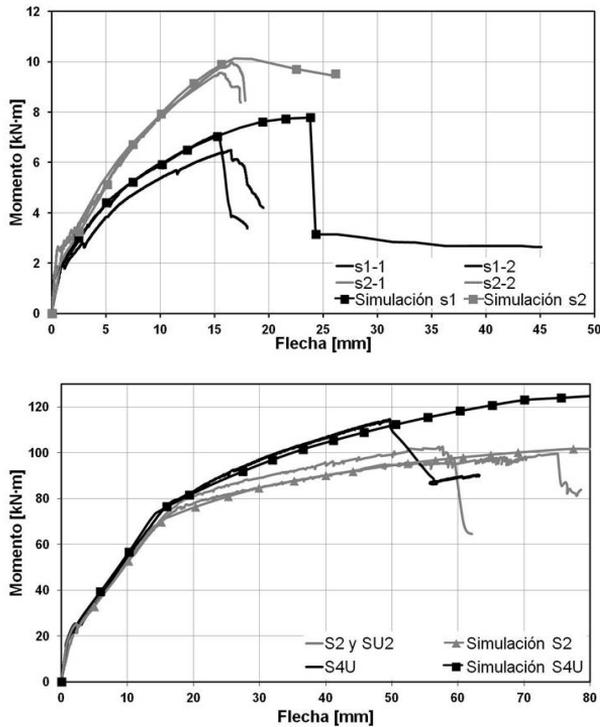


Figura 4.16: Correspondencia simulación-experimento en vigas 1/3 (arriba) y reales (abajo).

Finalmente, en la misma figura anterior se comprueba cómo la correspondencia analítico-experimental de las vigas a escala real tiene un compromiso más que óptimo, aunque tampoco reproduce adecuadamente el desprendimiento prematuro del TRM. Tarea esta última de estudio para abordarla en líneas futuras de investigación.

4.9. Conclusiones

El presente capítulo detalla los resultados del ensayo de doce vigas escaladas a 1/3 y otras cinco a escala real, reforzadas todas ellas a flexión mediante la solución de materiales compuestos denominada TRM (matriz de mortero y tejido de refuerzo). Los resultados del estudio estructural, sobre los casos aquí analizados de hormigones de bajas resistencia (antiguos), han sido plenamente satisfactorios aportándose, además, un completo estudio numérico que desarrolla las ecuaciones constitutivas del TRM en tracción uni-axial, así como del refuerzo de las vigas.

Sometidas a un estado de cargas de flexión, todas las vigas reforzadas han incrementado su capacidad portante y su deformabilidad. De igual modo, se han observado distintas tipologías de fallo con unos mecanismos que se relacionan con la pérdida de la acción reforzante, debido a un despegue prematuro, eficazmente contrarrestado con el uso de anclajes (en U). Este tipo de fallo es causado por la gran fuerza de rasante transmitida en la interfase hormigón-refuerzo.

Para tratar de obviar el despegue prematuro, se hace necesario optimizar el comportamiento del *TRM*. Como enfoques posibles a seguir para poder realizar este cometido, destacar el empleo de morteros modificados, geometrías de tejidos que logren una completa impregnación, o recubrimientos de mechones que confieran un comportamiento monolítico al conjunto de las fibras.

El *TRM* ha sido simulado correctamente mediante un modelo basado en el cálculo de fisuras incluido en el Eurocódigo 2. La sencillez del modelo permite su uso como ecuación constituyente, en análisis numéricos que reproduzcan su efecto como material de refuerzo. A este respecto, el estudio a tracción pura del *TRM* ha sido de gran interés al objeto de implementar el modelo propuesto.

El empleo del Método de los Elementos Finitos para el presente capítulo, no ha sido considerado adecuado por parte de los autores. La razón no es otra que, para el caso particular de refuerzo aquí presentado, podrían resultar excesivamente consumidores de tiempo de computación, con unos resultados no siempre acordes a las salidas de la experimentación. Es por este motivo por lo que en el presente capítulo se ha empleado un análisis numérico *ad hoc*, que siendo sencillo ha resultado en unos valores bastante aproximados frente a la realidad experimental aquí constatada.

4.10. Líneas futuras

Con los trabajos presentados en este capítulo los autores han constatado la necesidad a futuro de optimizar aún más el comportamiento resistente del material compuesto *TRM*. A este respecto, se sugiere abundar en el diseño de nuevas matrices (morteros modificados), otras geometrías de celdilla de los tejidos técnicos, o capas de imprimación sobre las fibras para mejorar su adherencia con las diferentes matrices. Podrían también plantearse otros materiales para las fibras, como pudieran ser los de origen natural (vegetales y pelo animal), más acordes (precio, sostenibilidad ambiental, etc.) con los entornos culturales y de oficio constructivo considerado para el refuerzo.

Vistas las cuestiones del despegue sustrato-refuerzo, parece necesario abordar a futuro también estudios sobre la adherencia a simple o doble solape. Estudio, por otro lado, muy sensible a las condiciones de contorno y ejecutoria del refuerzo, con lo que nunca debería perderse de vista que estos ensayos debieran complementarse con otros de mayor escala, y más próximos a las situaciones reales de trabajo de la estructura, pocas veces bajo estados tan puros de carga (solo adherencia).

Todas estas cuestiones, también podrían complementarse con estudios sobre la durabilidad de estos novedosos sistemas de refuerzo, según algunas condiciones ambientales, críticas, de trabajo.

Agradecimientos Los autores desean agradecer el apoyo financiero de la Diputación Foral de Bizkaia (DFB-7/12/TK/2009/10), del Gobierno Vasco (IT781-13) y, finalmente, de la Fundación Iñaki Goenaga por su programa de becas predoctorales.

Bibliografía seleccionada

De cara a detallar todo lo relativo al *TRM* y su aplicación en el hormigón, la tesis doctoral de uno de los autores resulta de gran apoyo [19]:

- LARRINAGA P. *Flexural Strengthening of Low Grade Concrete Through the Use of New Cement-Based Composite Materials*. PhD Tesis. Universidad del País Vasco (2011).

En este documento se parte de los principios básicos del material *TRM* por un lado y hormigón pobre o antiguo por el otro, llegando a todo lo tratado en el presente capítulo con mucho más detalle y precisión.

Adicionalmente, en el congreso FRPRCS-8 fue donde por primera vez se presenta el *TRM* a escala mundial y es en sus libros de actas donde también puede encontrarse una completa información de base para el presente capítulo.

- *8th International Symposium on Fiber Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures - FRPRCS-8*. FRPRCS8 Proceedings Ed. Prof. T.C. Triantafillou, University of Patras (2007). ISBN 978-960-89691-0-0.

Referencias

- [1] BOSC, J.L., CHAUVEAU, J.M. AND CLÉMENT, J. *Joseph Monier et la naissance du ciment armé*. Éditions du Linteau. Paris, 2001.
- [2] 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.
- [3] BRAMESHUBER, W. *Textile Reinforce Concrete. State-of-the-art*. Report of RILEM Technical Committee TC 201-TRC. Ibac-RWTH Aachen University, Aachen, 2006.
- [4] BRANSON, D.E. *Deformation of Concrete Structures*. McGraw-Hill, 1971.
- [5] BROWN, J.P. *Study in the history of Civil Engineering*. Newby F. London, 2001.
- [6] BURGOS-NÚÑEZ, A. El desastre del tercer depósito, cien años después. *Revista de Obras Públicas* 3458 (2005), 25–48.
- [7] COLBY, A.L. *Reinforced concrete in Europe*. The Chemical Publishing Company. Easton, 1909.
- [8] CUYPERS, H., AND WASTIELS, J. A. Stochastic cracking theory for the introduction of matrix multiple cracking in textile reinforced concrete under tensile loading. *Proceedings of the 1st International RILEM Symposium. RILEM Technical Committee 201-TRC. Aachen* 34, 2 (2006), 107 – 118.
- [9] DI TOMMASO, A., FOCACCI, F., MANTEGAZZA, G., GATTI, A. *FRCM versus FRP Composites to Strengthen RC Beams: a Comparative Analysis*. Proceedings of the 8th Fiber-Reinforced-Polymer Reinforcement to Concrete Structures, FRPRCS-8. Patras, 2008.

- [10] 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.
- [11] ESCRIBANO, J. *Siniestralidad Arquitectónica en el Estado Español desde 1984 a 1987*. PhD thesis, Universidad del País Vasco, 1992.
- [12] FRANCE COMMISSION DU CIMENT ARMÉ. *The properties and design of reinforced concrete*. D Van Nostrad Company. New York, 1912.
- [13] GARCÍA, D., SAN-JOSÉ, J. T., GARMENDIA, L., AND LARRINAGA, P. Comparison between experimental values and standards on natural stone masonry mechanical properties. *Construction and Building Materials* 28, 1 (2012), 444 – 449.
- [14] GARMENDIA, L., SAN-JOSÉ, J. T., GARCÍA, D., AND LARRINAGA, P. Rehabilitation of masonry arches with compatible advanced composite material. *Construction and Building Materials* 25, 12 (2011), 4374 – 4385.
- [15] HEGGER, J., AND VOSS, S. Investigations on the bearing behaviour and application potential of textile reinforced concrete. *Engineering Structures* 30, 7 (2008), 2050 – 2056.
- [16] HÄUBLER-COMBE, U., AND HARTIG, J. Bond and failure mechanisms of textile reinforced concrete (TRC) under uniaxial tensile loading. *Cement and Concrete Composites* 29, 4 (2007), 279 – 289.
- [17] JIMENEZ, P., GARCÍA, A., MORÁN, F. *Hormigón Armado. 14a Edición Basada en la EHE*. Gustavo Gili Editorial S.A., 2000.
- [18] KURRER, K. E. *The History of the Theory of Structures. From Arch Analysis to Computational Mechanics*. Ernst & Sohn. Berlin, 2008.
- [19] LARRINAGA, P. *Flexural Strengthening of Low Grade Concrete Through the Use of New Cement-Based Composite Materials*. PhD thesis, Universidad del País Vasco, 2011.
- [20] LARRINAGA, P., CHASTRE, C., SAN-JOSÉ, J.T., GARMENDIA, L. Non-linear analytical model of composites based on basalt textile reinforced mortar under uniaxial tension. *Composites Part B: Engineering. In press* (2013), 93–103.
- [21] LARRINAGA, P., SAN-JOSÉ, J.T., GARCÍA, D., GARMENDIA, L. Refuerzo a flexión de hormigón de bajas prestaciones mediante materiales compuestos de matriz inorgánica. *Hormigón y Acero* 63, 266 (2012), 79–93.
- [22] LOPEZ, A., GALATI, N., ALKHRDAJI, T., AND NANNI, A. Strengthening of a reinforced concrete bridge with externally bonded steel reinforced polymer (SRP). *Composites Part B: Engineering* 38, 4 (2007), 429 – 436.
- [23] MARCOS, I., SAN-MATEOS, R., LASARTE, N. *Conception and Design of Reinforced Concrete Structures in the Early Twentieth Century: Considerations for Analysis*. Universidad de Cantabria. Santander, 2012.
- [24] MARSH, C. F. *Reinforced Concrete*. D Van Nostrad Company. New York, 1904.
- [25] MONTENEGRO, M. Muelles de fábrica sobre terrenos de escasa resistencia. *Revista de Obras Públicas* 1909 (1912), 203.
- [26] PAPANICOLAOU, C. G., AND PAPANTONIOU, I. C. Mechanical Behaviour of Textile Reinforced Concrete (TRC) / Concrete Composite Elements. *Journal of Advanced Concrete Technology* 8, 1 (2009), 35–47.
- [27] PARK, R., AND PAULAY, T. *Reinforced Concrete Structures*. John Wiley & Sons, 1975.
- [28] 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.
- [29] RICHARD, R., AND ABBOT, B. Versatile elástico-plastic stress-strain formula. *Journal of Engineering Mechanics* 4 (1975), 511–515.

4 | Referencias

- [30] SAN-JOSÉ, J.T., GARCÍA, D., GARAY, A., CASTILLO, J. *Novelty FRP strengthening systems applied to different substrates: analysis of the anchorage behaviour. FRPRCS-8*. Editor Prof. T.C. Triantafillou, University of Patras, Patras, 2007.
- [31] SIMONNET, C. *Hormigón. Historia de un material. Economía, técnica, arquitectura*. Editorial Nerea, San Sebastián, 2009.
- [32] TOUTANJI, H., ZHAO, L., AND ZHANG, Y. Flexural behavior of reinforced concrete beams externally strengthened with CFRP sheets bonded with an inorganic matrix. *Engineering Structures* 28, 4 (2006), 557 – 566.
- [33] 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.
- [34] VALLUZZI, M.R. *et. al.* Round robin test for composite-to-brick shear bond characterization. *Materials and Structures* 45, 12 (2012), 1761–1791.
- [35] VIETEZ, J.A. *Patología estructural. Aspectos Químicos, Normativa y Estadística*. PhD thesis, Universidad del País Vasco, 1984.