

Aplicaciones avanzadas de los materiales compuestos en la obra civil y la edificación

Editor: Marco A. Pérez



OmniaScience

Monographs

Aplicaciones avanzadas de los materiales compuestos en la obra civil y la edificación

Editado por:
Marco A. Pérez

1ª edición © 2014 OmniaScience (Omnia Publisher SL)

www.omniascience.com

DOI: <http://dx.doi.org/10.3926/oms.210>

ISBN: 978-84-941872-9-2

DL: B-12444-2014

Diseño cubierta: OmniaScience

Fotografía cubierta: © arsdigital - Fotolia.com

Prólogo

Este libro presenta una panorámica del estado actual de los materiales compuestos y sus aplicaciones más relevantes en la obra civil y la edificación.

Ciertamente los materiales compuestos han tenido un desarrollo extraordinario en los últimos años, motivado principalmente por la necesidad de fabricar elementos estructurales más ligeros y con buena capacidad resistente en el sector aeronáutico, así como en vehículos terrestres y en las industrias del automóvil y del ferrocarril.

Las aplicaciones de los materiales compuestos en la ingeniería civil y la edificación son más recientes, aunque su utilización crece rápidamente debido a sus excelentes propiedades mecánicas, su resistencia a la corrosión, su menor peso y la flexibilidad de su uso para proyectar nuevas tipologías estructurales y para reparación de estructuras deterioradas.

Pese a esa evidencia, es paradójico que la formación de ingenieros especialistas en el cálculo y proyecto de estructuras con materiales compuestos es baja. La mayor parte de los contenidos de mecánica estructural en cursos de grado se focalizan en materiales más clásicos, como el hormigón y el acero, dejando las materias que tratan los materiales compuestos para cursos de postgrado, tipo Máster o similares. Claramente este déficit formativo tiene que corregirse en los próximos años, con el objetivo de que los graduados en ingeniería civil y en el ámbito de la edificación tengan al menos un conocimiento general y claro de las características básicas de los materiales compuestos, de sus excelentes propiedades mecánicas, de los métodos generales de cálculo y del potencial de su aplicación en el proyecto de nuevas construcciones y edificios, así como en reparación de estructuras.

Por todo lo anterior considero este libro particularmente útil y oportuno. En los diversos capítulos, escritos por especialistas en cada tema, se expone una visión general de las características fundamentales y el potencial de los materiales compuestos más usuales en la obra civil y la edificación.

El texto se inicia con un capítulo sobre la evolución del hormigón, el material compuesto más antiguo y popular de la historia de la construcción, para seguidamente tratar diferentes aspectos de los *Fiber Reinforced Polymers (FRP)* y del *Textile Reinforced Mortar (TRM)*, ambos de gran utilidad para el refuerzo de elementos estructurales (vigas, placas, láminas) y muros de obra de fábrica. Tras ello se presentan dos capítulos en los que se estudia de forma experimental y analítica el comportamiento adherente de los materiales *FRP* como refuerzo estructural del hormigón, y los sistemas de anclaje para tendones de pretensado de *FRP*.

Otro capítulo estudia el comportamiento de vigas híbridas de *Pultruded Fiber Reinforced Polymer (PFRP)*. Finalmente los dos últimos capítulos presentan, respectivamente, una panorámica del cálculo de estructuras de materiales compuestos utilizando la teoría de mezclas y el método de elementos finitos, y un procedimiento para predecir el deterioro en estructuras reforzadas con *FRP* sometidas a acciones estáticas y dinámicas.

El contenido del libro es un balance equilibrado de los aspectos fenomenológicos del comportamiento y propiedades de los materiales compuestos (en particular los basados en *FRP* y *TRM*), de sus aplicaciones en la ingeniería civil y la edificación y de los métodos de cálculo para evaluar la capacidad resistente y el fallo de las estructuras de materiales compuestos.

Felicito al Dr. Marco Antonio Pérez, también autor de un excelente capítulo, por la iniciativa de compilar este libro, que indudablemente será muy bien recibido por estudiantes de grado y postgrado en el ámbito del análisis estructural, así como por los profesionales que trabajan en el proyecto, construcción y mantenimiento de estructuras.

Eugenio Oñate

Catedrático de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras
Universidad Politécnica de Cataluña

Barcelona, Junio de 2014

Prefacio

La tecnología de los materiales compuestos se ha desarrollado extensamente durante las últimas cinco décadas, y su uso ha experimentado un incesante incremento en diversos sectores, entre los que destacan más recientemente la obra civil y la edificación. Las excelentes propiedades mecánicas, como la alta rigidez y resistencia específica, unidas a la resistencia a la corrosión, la trabajabilidad, y, sobretodo, la posibilidad de adaptarlos para satisfacer requerimientos específicos de diseño, los han situado en una posición ventajosa frente a los materiales estructurales convencionales. Los materiales compuestos, en concreto los *Fiber Reinforced Polymers (FRP)*, se están utilizando con éxito tanto en la construcción de nuevas estructuras –generalmente en combinación con el hormigón–, como en el refuerzo o la reparación de construcciones preexistentes. No obstante, el actual marco normativo que regula el uso de la tecnología es ciertamente limitado. Con las nuevas aplicaciones han emergido nuevos problemas. Por consiguiente, se requieren estudios que aporten nuevos conocimientos que permitan estandarizar las metodologías de cálculo, diseño y ejecución, garantizando así un uso apropiado de esta tecnología en constante desarrollo.

El propósito de esta obra es aportar una visión global del estado actual de la técnica y los recientes desarrollos sobre la aplicabilidad de los materiales compuestos en la obra civil y la edificación. El libro recoge una colección de trabajos de investigación de expertos nacionales e internacionales, que abordan los retos actuales y futuros en este campo, proporcionando, a través de una amplia variedad de casos de estudio, una hoja de ruta con las habilidades técnicas y los conocimientos prácticos necesarios para el empleo de materiales compuestos en nuevas aplicaciones. Escrito por profesionales e investigadores con experiencia en este campo, este libro pretende ser un texto de referencia para los no iniciados en la temática y una herramienta de estudio e investigación para lectores de niveles más avanzados.

Los textos son –en la medida de lo posible– autocontenidos en sus partes, permitiendo una lectura acorde al interés particular de cada lector. En ellos se presentan fundamentos técnicos, resultados de investigaciones, y se revisan y compilan referencias bibliográficas actualizadas que complementan y permiten al lector adquirir un conocimiento más profundo de los temas expuestos, encaminándolo hacia posibles futuras líneas de investigación.

El libro está compuesto por once capítulos. Los tres primeros constituyen una introducción en la que inicialmente se presenta una breve reseña histórica acerca de la evolución del hormigón, a continuación se exponen los fundamentos de la mecánica de los materiales com-

puestos y finalmente se introducen los criterios de diseño básicos para el refuerzo en flexión y cortante con *FRP* de acuerdo a los planteamientos de la *FIB (International Federation for Structural Concrete)*. Los siguientes tres capítulos abordan el estudio del uso del *TRM (Textile Reinforced Mortar)* para el refuerzo a flexión y cortante de vigas de hormigón armado, y para el refuerzo de muros de obra de fábrica, respectivamente. En el séptimo capítulo se evalúa experimentalmente el comportamiento adherente del refuerzo de estructuras de hormigón mediante materiales *FRP* insertados en el recubrimiento (*Near-Surface Mounted* o *NSM*). El octavo capítulo se centra en el análisis experimental y analítico de los sistemas de anclaje para tendones de pretensado de *FRP*. En el capítulo nueve se analiza el comportamiento a flexión y cizalladura de vigas híbridas de *PFRP (Pultruded Fiber Reinforced Polymer)* y hormigón armado. Finalmente, los dos últimos capítulos cubren aspectos relacionados con la simulación numérica, como son el análisis no-lineal del material mediante la teoría de mezclas serie-paralelo, y el análisis numérico de la reparación y el refuerzo de estructuras con *FRP*.

Los trabajos de investigación que han dado lugar a los diferentes capítulos que conforman este libro, son fruto del interés mutuo universidad-empresa en el desarrollo de la tecnología y la transferencia del conocimiento a la industria. Por ello, se quiere dejar constancia del agradecimiento por el apoyo recibido de las instituciones públicas y privadas para el desarrollo de los diferentes proyectos de investigación.

Marco A. Pérez

Barcelona, Mayo de 2014

Listado de autores y colaboradores

Alex H. Barbat	Departament de Resistència de Materials i Estructures a l'Enginyeria Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE) Universitat Politècnica de Catalunya - BarcelonaTech, España
Ernest Bernat-Maso	Departament de Resistència de Materials i Estructures a l'Enginyeria Laboratori per a la Innovació Tecnològica d'Estructures i Materials (LITEM) Universitat Politècnica de Catalunya - BarcelonaTech, España
Christian Escrig	Departament de Resistència de Materials i Estructures a l'Enginyeria Laboratori per a la Innovació Tecnològica d'Estructures i Materials (LITEM) Universitat Politècnica de Catalunya - BarcelonaTech, España
Lluís Gil	Departament de Resistència de Materials i Estructures a l'Enginyeria Laboratori per a la Innovació Tecnològica d'Estructures i Materials (LITEM) Universitat Politècnica de Catalunya - BarcelonaTech, España
Pello Larrinaga	Departamento de Construcción Sostenible TECNALIA, Parque Científico y Tecnológico de Bizkaia, España
Ignacio Marcos	Departamento de Ingeniería Mecánica Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Industrial de Bilbao Universidad del País Vasco, España
Xavier Martínez	Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE) Universitat Politècnica de Catalunya - BarcelonaTech, España
Maritzabel Molina	Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola Universidad Nacional de Colombia
Liz Nallim	Universidad Nacional de Salta, Argentina
Catalin Andrei Neagoe	Departament de Resistència de Materials i Estructures a l'Enginyeria Laboratori per a la Innovació Tecnològica d'Estructures i Materials (LITEM) Universitat Politècnica de Catalunya - BarcelonaTech, España Technical University of Civil Engineering Bucarest, Rumanía
Sergio Oller	Departament de Resistència de Materials i Estructures a l'Enginyeria Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE) Universitat Politècnica de Catalunya - BarcelonaTech, España

Marco A. Pérez	Departament de Resistència de Materials i Estructures a l'Enginyeria Laboratori per a la Innovació Tecnològica d'Estructures i Materials (LITEM) Universitat Politècnica de Catalunya - BarcelonaTech, España
Francesc Puigvert	Departament de Resistència de Materials i Estructures a l'Enginyeria Laboratori per a la Innovació Tecnològica d'Estructures i Materials (LITEM) Universitat Politècnica de Catalunya - BarcelonaTech, España
Fernando Rastellini	Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE) Quantech ATZ, Barcelona, España
Carles Romea	Departament de Resistència de Materials i Estructures a l'Enginyeria Universitat Politècnica de Catalunya - BarcelonaTech, España
Montserrat Sánchez	Departament de Resistència de Materials i Estructures a l'Enginyeria Laboratori per a la Innovació Tecnològica d'Estructures i Materials (LITEM) Universitat Politècnica de Catalunya - BarcelonaTech, España
José T. San-José	Departamento de Ingeniería Minera y Metalúrgica y Ciencia de los Materiales Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Bilbao Universidad del País Vasco, España
Ibrahim Sharaky	Anàlisi i Materials Avançats per al Disseny Estructural (AMADE) Escola Politècnica Superior, Universitat de Girona, España Materials Engineering Department, Zagazig University, Egipto
Lluís Torres	Anàlisi i Materials Avançats per al Disseny Estructural (AMADE) Escola Politècnica Superior, Universitat de Girona, España
Juan Carlos Vielma	Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado, Venezuela

Índice general

1. El hormigón: breve reseña histórica de un material milenario	1
1.1. El yeso, un antecedente Mediterráneo	1
1.2. La romanización	2
1.3. El declive medieval	5
1.4. El cemento Portland entra en acción	5
1.5. El hormigón armado comienza su marcha	7
1.6. Época clásica del hormigón: 1910-1940	10
1.7. El hormigón se tensa	12
1.8. Los nuevos hormigones: larga vida al hormigón	13
1.9. Conclusiones	16
1.10. Líneas futuras	17
Bibliografía seleccionada	17
Referencias	18
2. Fundamentos de la mecánica de los materiales compuestos	19
2.1. Introducción	19
2.2. Generalidades sobre las relaciones tensión-deformación	21
2.3. Análisis en la microescala	23
2.4. Análisis en la mesoescala	28
2.4.1. Evaluación de la rigidez de la lámina	29
2.4.2. Efectos higrotérmicos en la lámina	34
2.4.3. Evaluación de la resistencia de la lámina	34
2.5. Análisis en la macroescala	38
2.5.1. Evaluación de la rigidez del laminado	39
2.5.2. Efectos higrotérmicos en el laminado	45
2.5.3. Evaluación de la resistencia del laminado	46
2.6. Conclusiones	47
2.7. Líneas futuras	47
Bibliografía seleccionada	48
Referencias	49
3. El refuerzo de estructuras de hormigón con laminados de FRP según la FIB	51
3.1. Introducción	51

Índice general

3.2. Sistemas de refuerzo <i>FRP</i>	53
3.2.1. Refuerzo con laminados preconformados	53
3.2.2. Refuerzo con tejidos de fibras	54
3.2.3. Refuerzo con perfiles	54
3.2.4. Comparativa de los sistemas de aplicación del refuerzo	54
3.3. Campos de aplicación del refuerzo <i>FRP</i>	55
3.3.1. Refuerzo a flexión	56
3.3.2. Refuerzo a cortante	57
3.4. Ventajas y desventajas del refuerzo <i>FRP</i>	57
3.5. Modos de colapso del refuerzo	59
3.6. Decisión estratégica en el refuerzo de una estructura	60
3.7. Bases de diseño de refuerzo <i>FRP</i> a flexión	62
3.7.1. Generalidades	62
3.7.2. Modos de colapso - Estados Límites Últimos	63
3.7.2.1. Acción compuesta completa	63
3.7.2.2. Pérdida de la acción compuesta	63
3.8. Análisis en Estado Límite Último de flexión	67
3.8.1. Situación inicial	67
3.8.2. Acción compuesta completa	68
3.8.3. Pérdida de la acción compuesta	70
3.9. Análisis en Estado Límite Último de cortante	73
3.10. Conclusiones	76
3.11. Líneas futuras de desarrollo	76
Bibliografía seleccionada	78
Referencias	78
4. Refuerzo a flexión de hormigones de bajas prestaciones con <i>TRM</i>	81
4.1. Introducción	81
4.2. Breve estado de la técnica	83
4.3. Hormigón antiguo, de baja calidad o "pobre"	85
4.4. Soluciones tradicionales y novedosas del refuerzo estructural	86
4.5. Caracterización del <i>TRM</i>	88
4.5.1. Mortero y tejido	89
4.5.2. <i>TRM</i> sometido a tracción pura	91
4.6. Ensayo del refuerzo a flexión con <i>TRM</i>	93
4.6.1. Construcción de las vigas de hormigón armado	93
4.6.2. Refuerzo con <i>TRM</i> de las vigas de hormigón armado	93
4.6.3. Ensayo de las vigas reforzadas	94
4.7. Estudio analítico-numérico del hormigón reforzado	96
4.7.1. Modelización a tracción del <i>TRM</i>	96
4.7.2. Modelo numérico de vigas de hormigón armado reforzadas a flexión	100
4.8. Correspondencia analítico-experimental	101
4.9. Conclusiones	102
4.10. Líneas futuras	103
Bibliografía seleccionada	104

Referencias	104
5. Refuerzo a cortante de vigas de hormigón armado mediante TRM	107
5.1. Introducción	107
5.2. Breve estado de la técnica	108
5.2.1. Contextualización histórica	108
5.2.2. Necesidad de reforzar	109
5.2.3. Soluciones tradicionales de refuerzo a cortante	110
5.2.4. <i>Textile-Reinforced Mortar</i>	115
5.3. Campaña experimental	117
5.3.1. Construcción de las vigas	117
5.3.2. Materiales de refuerzo	118
5.3.3. Aplicación del refuerzo en las vigas de hormigón	120
5.3.4. Ensayos	123
5.3.5. Resultados	124
5.4. Estudio analítico	129
5.5. Conclusiones	132
5.6. Líneas futuras	133
Bibliografía seleccionada	134
Referencias	134
6. Comportamiento estructural de muros de obra de fábrica reforzados con TRM	137
6.1. Introducción	137
6.2. Estado de la técnica	138
6.2.1. ¿Qué es y cómo funciona el TRM?	140
6.2.2. Comparación del TRM con otros métodos de refuerzo	142
6.2.3. Aplicación del TRM en la obra de fábrica, consideraciones y variables de diseño	143
6.3. Aplicaciones del TRM en muros de carga de obra de fábrica	147
6.3.1. Estudio bibliográfico	147
6.3.2. Estudio de muros reforzados con TRM en el CER-LITEM	148
6.4. Conclusiones de aplicabilidad práctica	160
6.5. Líneas futuras de desarrollo	162
Bibliografía seleccionada	163
Referencias	164
7. Estudio de la adherencia de barras NSM FRP como refuerzo de estructuras de hormigón	165
7.1. Introducción	165
7.2. Estado de la técnica	167
7.3. Estudio experimental	167
7.4. Resultados y discusión	169
7.4.1. Barras NSM CFRP	170
7.4.2. Barras NSM GFRP	173
7.4.3. Comparación de resultados	175

Índice general

7.5. Conclusiones	176
7.6. Líneas futuras	179
Bibliografía seleccionada	179
Referencias	180
8. Estructuras pretensadas con tendones de material compuesto	183
8.1. Introducción	183
8.2. Estado de la técnica	185
8.2.1. Anclaje de sujeción mecánica	187
8.2.2. Anclaje de sujeción adhesiva	190
8.3. Estudio de anclajes para tendones de material compuesto	193
8.3.1. Anclajes de sujeción mecánica	193
8.3.2. Anclajes de sujeción adhesiva	196
8.4. Conclusiones	200
8.5. Líneas futuras	202
Bibliografía seleccionada	202
Referencias	203
9. Diseño y análisis de vigas híbridas de PFRP y hormigón	205
9.1. Introducción	205
9.2. Estado de la técnica	206
9.2.1. Perfiles estructurales de PFRP	207
9.2.2. Aplicaciones de perfiles PFRP en ingeniería civil	209
9.3. Estudios experimentales	211
9.3.1. Ensayos preliminares con vigas híbridas a pequeña escala	212
9.3.2. Ensayos con vigas híbridas a escala real	216
9.4. Formulación analítica para el diseño de vigas híbridas	223
9.4.1. Estado límite de servicio	224
9.4.2. Estado límite último	230
9.5. Conclusiones	233
9.6. Líneas futuras	234
Bibliografía seleccionada	234
Referencias	235
10. Análisis no-lineal de materiales compuestos mediante la teoría de mezclas serie-paralelo	237
10.1. Introducción	237
10.2. Breve estado de la técnica	239
10.2.1. Cálculo lineal hasta rotura del compuesto	239
10.2.1.1. Propiedades elásticas del compuesto	239
10.2.1.2. Rotura del material compuesto	240
10.2.2. Breve reseña sobre homogenización	241
10.3. Teoría de mezclas serie-paralelo	243
10.3.1. Condiciones de compatibilidad de la teoría de mezclas SP	245
10.3.2. Algoritmo de resolución	246

10.3.2.1. Cálculo no lineal del material compuesto	248
10.3.3. Implementación en un código de elementos finitos	248
10.4. Ejemplos de aplicación	249
10.4.1. Simulación de un compuesto de resinas	250
10.4.2. Delaminación de materiales compuestos	252
10.4.2.1. Descripción del ensayo y del modelo de cálculo	253
10.4.2.2. Comparación de los resultados numéricos y experimentales	254
10.5. Conclusiones	256
10.6. Líneas futuras	257
Bibliografía seleccionada	258
Referencias	259
11. Análisis numérico de la reparación y refuerzo de estructuras con FRP	261
11.1. Introducción al comportamiento no lineal de las estructuras y valoración del estado de daño	261
11.2. Introducción a la simulación numérica de estructuras de hormigón armado. Enfoque conceptual	262
11.3. Ecuación de equilibrio dinámico y linealización del problema no lineal	265
11.4. Problemas estáticos y dinámicos no lineales	268
11.5. Daño estructural. Caso sísmico teniendo en cuenta las curvas de capacidad y la demanda estructural	272
11.5.1. Daño global en función de la rigidez estructural	274
11.5.2. Daño estructural objetivo	275
11.6. Simulación numérica de estructuras reforzadas con FRP y valoración del daño	278
11.6.1. Simulación del comportamiento de los materiales compuestos	279
11.6.2. Simulación numérica de un pórtico de hormigón armado reforzado con CFRP	280
11.6.2.1. Geometría y configuraciones del refuerzo	280
11.6.2.2. Descripción de los modelos constitutivos aplicados a los materiales	282
11.6.2.3. Análisis del comportamiento de los modelos de hormigón en masa y de hormigón armado reforzado	282
11.7. Conclusiones	287
11.8. Líneas futuras	288
Bibliografía seleccionada	289
Referencias	289

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

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.

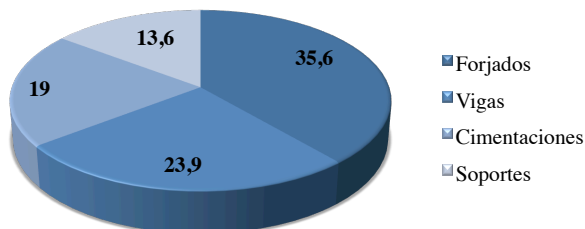


Figura 4.1: Fallos estructurales del hormigón en España [35].

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.*

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.

El propósito de esta obra es aportar una visión global del estado actual de la técnica y los recientes desarrollos sobre la aplicabilidad de los materiales compuestos en la obra civil y la edificación. El libro recoge una colección de trabajos de investigación de expertos nacionales e internacionales, que abordan los retos actuales y futuros en este campo, proporcionando, a través de una amplia variedad de casos de estudio, una hoja de ruta con las habilidades técnicas y los conocimientos prácticos necesarios para el empleo de materiales compuestos en nuevas aplicaciones. Los textos son autocontenidos en sus partes, permitiendo una lectura acorde al interés particular de cada lector. En ellos se presentan fundamentos técnicos, resultados de investigaciones, y se revisan y compilan referencias bibliográficas actualizadas que complementan y permiten al lector adquirir un conocimiento más profundo de los temas expuestos, encaminándolo hacia posibles futuras líneas de investigación. Escrito por profesionales e investigadores con experiencia en este campo, este libro pretende ser un texto de referencia para los no iniciados en la temática y una herramienta de estudio e investigación para lectores de niveles más avanzados.

Marco A. Pérez, Universitat Politècnica de Catalunya

