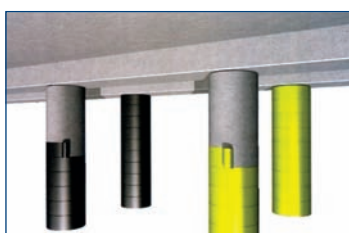


Los materiales compuestos como solución de reparación de puentes existentes de hormigón estructural



The composite materials as a solution for repairing the existing structural concrete bridges

Miguel A. Vicente Cabrera

*Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Profesor Titular de Universidad. Dpto. Ingeniería Civil.
Universidad de Burgos*

Alfonso García Puertas

*Ingeniero especialista en reparación, refuerzo
y protección de estructuras de hormigón.
Director General de EN 1504 Consulting Tres Olivos S.L.*

Resumen

Los materiales compuestos suponen, en la actualidad, una solución muy interesante para el refuerzo de estructuras de hormigón. Sus ventajas son muchas, tanto desde el punto de vista estructural como del coste global de la operación.

Sin embargo, la ausencia de guías y recomendaciones españolas, que ayuden a los ingenieros en el diseño y cálculo de la solución reforzada lleva a que muchos de ellos opten por soluciones de reparación tradicionales (centradas fundamentalmente en el acero), con todos los inconvenientes que ello acarrea.

En el presente documento se expone, de forma muy general, los aspectos más interesantes de los refuerzos de estructuras de hormigón con materiales compuestos, tanto desde el punto de vista del material que constituye el refuerzo, como del cálculo estructural y de los procedimientos de ejecución.

PALABRAS CLAVES: materiales compuestos, FRP, puentes.

Abstract

At present, composite materials represent a very interesting solution for the reinforcement of concrete structures. Its advantages are many, from the structural point of view as well as from the overall cost of the operation.

However, the lack of guidelines and recommendations in Spain, to assist engineers in the design and calculation of reinforced solution means that many of them opt for traditional repair solutions (mainly focused on steel), with all the disadvantages this may entail.

This document presents, in a general sense, the most interesting aspects of the reinforcement of concrete structures with composite materials, from the point of view of the material constituting the reinforcement, and as well as from the structural design and execution procedures.

KEY WORDS: : composite materials, FRP, bridges

1. Introducción

Aunque es bien sabido que las estructuras de hormigón presentan una buena respuesta frente al envejecimiento, no es menos cierto que, durante la vida útil de una estructura, ésta pasa por innumerables situaciones que pueden llevar a la necesidad de realizar algún tipo de intervención o reparación.

Suele ser habitual que, por causas diversas, el proceso de envejecimiento de la estructura se acelere con respecto a lo proyectado en su momento. Es decir, los fenómenos de carbonatación primero y corrosión después puedan provocar, antes de lo previsto, una reducción de la capacidad mecánica de la estructura.

También ocurre, con más frecuencia de lo deseable, el choque de vehículos rodantes contra elementos estructurales, provocando la pérdida parcial de hormigón y, eventualmente de acero; y en consecuencia una brusca reducción de la capacidad portante de la estructura.

Otras veces, los cambios de uso de la estructura (más habitual en edificación, aunque también

puede ocurrir en obra civil) hacen que ciertos elementos estructurales se queden en situación de "fuera de servicio".

En todos estos casos se hace necesario el refuerzo de la solución existente, con el fin de satisfacer nuevamente las demandas asociadas a su uso. En general el refuerzo de estructuras existente es más barato que la demolición y ejecución de una estructura nueva (amén de otras consideraciones relacionadas con su explotación).

Históricamente, los refuerzos en estructuras de hormigón han sido complejos. Los métodos tradicionales de refuerzo son la aplicación de hormigón proyectado con incorporación de armadura supletoria, la incorporación de nuevas armaduras por ranurado del hormigón, el postesado exterior, la colocación de elementos auxiliares de soporte y, principalmente, el pegado de chapas de acero para incrementar la capacidad a cortante y flexión.

La adición de platabandas de acero ha sido ampliamente usada por su relativa sencillez frente a los otros métodos mencionados, pero tiene limitaciones significativas.

Desde hace más de 20 años se llevan aplicando con éxito en todo

el mundo el refuerzo de estructuras de hormigón utilizando materiales compuestos. Los primeros trabajos se llevaron a cabo en Lucerna (Suiza) en el año 1991 (figura 1), en el puente de Ibrach. En este caso se utilizó un refuerzo longitudinal de fibra de carbono. En España, los primeros trabajos son del año 1996 (Puente del Dragón, Barcelona).

En la actualidad existe ya gran experiencia, tanto nacional como internacional (figura 2), en la utilización de materiales compuestos para el refuerzo de puentes de hormigón, lo que convierte a esta tecnología en una solución consolidada. Además, existe gran número de normas y publicaciones internacionales [1 a 9] que avalan su uso y definen los protocolos de cálculo.

Sin embargo en España su uso no está todo lo extendido que debería, comparativamente con los países de nuestro entorno. Una de las causas es la ausencia de guías de aplicación editadas en español, que ayuden a los ingenieros encargados de los proyectos de reparación en su utilización.

2. El refuerzo con materiales compuestos

El material compuesto es todo sistema o combinación de materiales constituido a partir de una unión de dos o más componentes, que da lugar a uno nuevo con propiedades características específicas, no siendo estas nuevas propiedades ninguna de las anteriores. Desde el punto de vista que nos ocupa, el objetivo del nuevo compuesto estructural es conseguir un sistema material cuyo comportamiento mecánico y propiedades sean superiores a los materiales que lo constituyen cuando actúan independientemente.

En el material compuesto se pueden distinguir dos fases: una continua, constituida por la matriz, y otra fase discontinua, denominada



Figura 1. Puente de Ibrach, en Lucerna.



Figura 2. Ejemplo de refuerzo con materiales compuestos.



Figura 3. Formatos realizados en materiales compuestos.

refuerzo. Los componentes de un material compuesto no deben disolverse ni fusionarse completamente unos con otros. La identificación de los materiales y la de su interfase debe ser posible de distinguir por medios físicos.

Las propiedades del nuevo material compuesto dependen, de las características de los componentes, propiedades geometría y distribución de las fases.

Los materiales utilizados para la matriz son muy variados, distinguiendo tres grandes grupos: matrices metálicas, matrices cerámicas y matrices poliméricas. Asimismo, dentro de cada grupo, el número de materiales a emplear puede ser muy numeroso. La matriz que más habitualmente se emplea para la generación de los materiales compuestos es la matriz polimérica y dentro de este grupo las resinas epoxi son las más comunes.

Por su parte, el refuerzo puede ser con fibra continua, con fibra discontinua o con partículas. Los materiales que constituyen el refuerzo pueden ser muy variados. Además, es posible desarrollar materiales compuestos en los que se combinen más de una familia de refuerzos (por ejemplo, refuerzo con fibras y con partículas, etc). Las fibras que habitualmente se emplean como sistema de refuerzo de los materiales compuestos son la fibras de carbono en la mayoría de los casos de refuerzo de estructuras de hor-

migón y puntualmente las fibras de aramida para resolver problemas puntuales sobre de origen sísmico o explosivo.

Obviamente, la multitud de combinaciones posibles de matriz y refuerzo dota a los materiales compuestos de una versatilidad de la que carece cualquier otra solución de refuerzo (figura 3). En función de las necesidades específicas requeridas, es posible encontrar una combinación matriz – refuerzo que la satisfaga. Esta es, sin duda, una de sus mayores ventajas a la hora de utilizarla como solución de refuerzo y reparación de estructuras.

Otra de sus ventajas competitivas es el coste. Si bien el coste de material suele ser muy superior al de otra solución de refuerzo, el coste global de la reparación suele ser significativamente menor. Para ello es necesario tener en cuenta, dentro de los costes de reparación, los siguientes aspectos:

1. Coste de material. Aunque el coste unitario suele ser mayor en los materiales compuestos que en las soluciones convencionales, habrá que valorar la eficiencia estructural de una y otra solución y, en consecuencia, la cantidad de material necesario en uno u otro caso.
2. Coste de ejecución, que incluye el coste de los equipos auxiliares, etc. En general, los materiales compuestos suelen ser más ligeros que los refuerzos

convencionales (con chapa de acero, por ejemplo), por lo que los equipos auxiliares suelen ser menores y, en consecuencia, más baratos.

3. Tiempo de ejecución, que se traduce directamente en coste. En general, las reparaciones con materiales compuestos suele ser más rápidas.
4. Interferencia en el uso de la infraestructura. En ciertas situaciones el refuerzo con materiales compuestos permite mantener en servicio la estructura, con todas las implicaciones para el usuario que ello conlleva.

Quizá uno de sus puntos débiles, al menos hasta la fecha, es la ausencia de guías específicas en español para el cálculo y la ejecución de refuerzos con materiales compuestos. A nivel internacional existe abundante normativa y guías de aplicación. Sin embargo en España no es todo lo habitual que sería deseable la utilización de normativa o guías internacionales (mayoritariamente en inglés) cuando existen lagunas nacionales.

En este sentido, en los últimos años, la Asociación Técnica de la Carretera, a través del Grupo de Trabajo de Materiales Compuestos, perteneciente al Comité de Puentes ha llevado a cabo un trabajo intenso de recogida de toda la amplia información internacional existente, así como de síntesis, armonización y adaptación de la

misma a la normativa nacional, con objeto de desarrollar una guía de utilización de los materiales compuestos como solución de reparación de los puentes existentes de hormigón.

El objetivo de la citada guía, que será publicada en breve por Asociación Técnica de la Carretera, tiene por objeto servir de documento de referencia en España para el diseño y cálculo de proyectos de reparación de puentes de hormigón mediante la utilización de materiales compuestos.

3. El cálculo de la solución reforzada

El cálculo de la solución reforzada tiene por objeto comprobar que, bajo la nueva configuración estructural, la solución cumple con los coeficientes de seguridad recogidos en la normativa.

En este sentido cabe destacar que, la presencia del refuerzo en la estructura no modifica su naturaleza estructural esencial, y, en consecuencia, la normativa de referencia para ella. Es decir, la comprobación de la seguridad estructural de un puente de hormigón reforzado con materiales compuestos seguirá, en esencia, la misma normativa (con los matices que veremos a continuación) que un puente de hormigón estructural no reforzado, es decir:

1. La estimación de las cargas y sus combinaciones de acciones se realizará acorde con la normativa general de acciones en vigor (IAP, IAPF, Eurocódigo 1, etc)
2. La estimación de la seguridad estructural se realizará siguiendo el guion general de la normativa específica de hormigón (EHE, Eurocódigo 2, etc).

Obviamente, la presencia de un nuevo elemento resistente, como es el material compuesto, introduce unas correcciones en la formulación que es necesario conocer.

BASES GENERALES DE CÁLCULO

Se reconoce el Método de los Estados Límite como único protocolo válido para comprobar la seguridad estructural de las estructuras reforzadas con materiales compuestos.

Se define Estado Límite como aquella situación frontera tal que si se supera, puede considerarse que la estructura no cumple alguna de las funciones para las que ha sido proyectada. Esencialmente, esos “no cumplimientos de función” pueden atender a tres naturalezas diferentes:

1. Falta de equilibrio o colapso de todo o parte de la estructura.
2. Fallos en la funcionalidad, apariencia, confort, etc.
3. Envejecimiento prematuro.

En este sentido, los Estados Límite se clasifican en tres grandes grupos:

1. Estados Límite Últimos. Se definen como aquellas situaciones frontera tal que si se supera, puede considerarse que la estructura pierde el equilibrio o bien se produce una rotura, total o parcial.
2. Estados Límite de Servicio. Se definen como aquellas situaciones frontera tal que si se supera, puede considerarse que la estructura presenta deficiencias en términos de funcionalidad (fisuración inasumible, deformación excesiva, vibraciones inadecuadas, etc).
3. Estado Límite de Durabilidad. Hace referencia a aquellas situaciones tal que si se incumple, no se alcanza la vida útil de proyecto.

Para el caso de las estructuras de hormigón reforzadas con materiales compuestos, los estados límite últimos a considerar son todos los recogidos en la normativa específica de estructuras de hormigón (EHE, Eurocódigo 2, etc), más dos siguientes estados límite últimos adicionales:

1. Estado Límite Último de agotamiento por Deslaminación.
2. Estado Límite Último de Confinamiento.

Para este mismo caso, los estados límite de servicio a considerar son todos los recogidos en la normativa específica de estructuras de hormigón.

Desde el punto de vista de cálculo, en algunos de los estados límite últimos no existe diferencia entre una estructura de hormigón y una estructura de hormigón reforzada con materiales compuestos; y por el contrario, existen otros estados límite últimos en los que las diferencias son muy notables.

En la guía de aplicación anteriormente mencionada se hace un repaso profundo a todos los estados límite recogidos en la normativa, analizando para cada uno de ellos las modificaciones que introduce la presencia del refuerzo.

Desde el punto de vista de la estrategia de cálculo, si bien la normativa obliga a cumplir todos los estados límite, no todos ellos son igual de restrictivos, desde el punto de vista de diseño de la solución. Esto también ocurre en hormigón estructural no reforzado (y así, por ejemplo, en hormigón armado los cálculos se inician por los estados límite últimos y se concluyen por los estados límite de servicio; mientras que en hormigón postesado el proceso de cálculo es al revés).

Para el caso de las soluciones de hormigón reforzadas, el cálculo debe comenzar, necesariamente, por la verificación de la situación accidental. De acuerdo con la normativa internacional, se ha de considerar una combinación de cargas accidental que deberá ser resistida, necesariamente, por la estructura no reforzada. Esta hipótesis de cálculo tiene por objeto preservar a la estructura de cualquier accidente o sabotaje que pueda sufrir durante su vida útil y que tenga como consecuencia una rotura o un despegue del refuerzo.

En el caso de que la estructura sin reforzar no supere esta primera situación de cálculo, la solución de refuerzo con material compuesto no es viable.

A continuación se procederá a evaluar los estados límite de servicio. En este punto nos podemos encontrar con dos situaciones.

1. La estructura sin reforzar cumpla con los estados límite de servicio. En este caso, se pasa al punto siguiente.
2. La estructura necesita refuerzo para superar algún estado límite de servicio. En estos estados la efectividad del refuerzo suele ser baja, por lo que la cuantía de refuerzo será elevada.

Finalmente se procederá a evaluar los estados límite últimos. En muchos casos, los pasos anteriores no han requerido refuerzo con material compuesto, por lo que son los estados límite últimos los que condicionan el refuerzo. Pero en otros casos, del paso anterior ya se ha requerido refuerzo con material compuesto. En estas situaciones, en general, los requerimientos en estado límite último suelen ser menores.

Mención aparte requiere el Estado Límite Último de Confinamiento (figura 4). En realidad no se trata de un estado límite último sino de una solución estructural (aunque toda la bibliografía lo trata como estado límite último). El objetivo estructural es mejorar la capacidad mecánica a compresión de aquellos elementos sometidos a esfuerzos dominantes de compresión, mediante el zunchado perimetral con material compuesto.

4. Recomendaciones constructivas

En general, desde el punto de vista de ejecución, la técnica de refuerzo consiste en el pegado del material compuesto a la estructura existente mediante la adhesión química del mismo al soporte a reforzar, previa la preparación del soporte para garantizar la perfecta adherencia entre la superficie y el material compuesto diseñado para la operación de refuerzo de la estructura de hormigón.

Actualmente, los formatos más comunes de las fibras de carbono o de aramida son los llamados laminados y las hojas o tejidos de fibras. Dentro de los laminados se emplean dos sistemas de aplicación, el tradicional mediante el encolado (figura 5) y el más vanguardista y en proceso de investigación el NearSurfaceMounted (NSM) o Cut-In (figura 6), que consiste en la inserción del laminado en una roza lineal adherida mediante un adhesivo epoxi. Por otra parte los sistemas de aplicación de refuerzo con hojas o tejidos (figura 7) tienen el mismo fundamento que los sistemas de encolado con laminados, con la singularidad de ejecutar “in situ” la matriz del material compuesto, generalmente con resinas epoxi y con la particularidad de su capacidad para adaptarse a las diferentes formas geométricas de la estructura.

El proceso de ejecución del sistema del laminado por encolado (figura 8), el sistema de hojas o tejidos de fibras (figura 9) y el NSM son relativamente sencillos. Sin embargo, cabe destacar que la solución diseñada es altamente sensible al proceso de ejecución, de tal modo que si la ejecución no es correcta, la solución proyectada puede no funcionar.

Durante el cálculo de la solución reforzada se asumen un buen número de hipótesis que es necesario garantizar en obra. Por ejemplo, la correcta ubicación geométrica del refuerzo, su orientación, la adherencia con la estructura existente, etc.

Se trata de una problemática análoga a lo que ocurre con las soldaduras en elementos metálicos, o con el postesado en elementos de hormigón estructural. Es sabido que una incorrecta ejecución de una soldadura puede llevar al colapso a una metálica; y lo mismo ocurre con un postesado incorrectamente ejecutado.

En los casos anteriormente citados, las empresas que llevan a cabo



Figura 4. Confinamiento de un pilar.

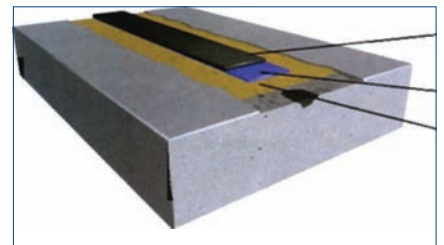


Figura 5. Refuerzos con laminados.

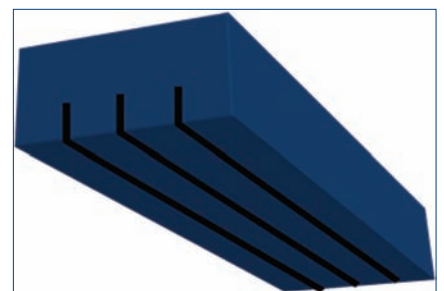


Figura 6. Refuerzo NSM o Cut-it.

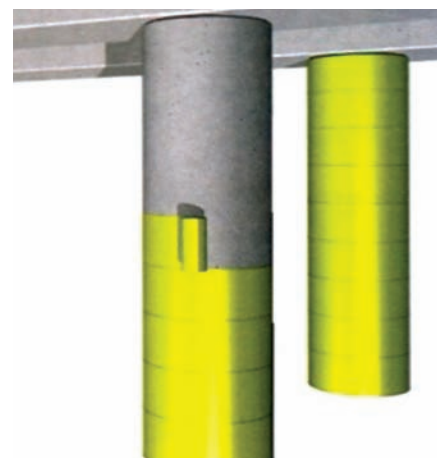


Figura 7. Refuerzo con hojas o tejidos.



Figura 8. Refuerzo con laminados.



Figura 9. Refuerzo con hojas o tejidos.

dichas operaciones están acreditadas y sus técnicos y operarios homologados a nivel individual para llevar a cabo las tareas encomendadas.

En ese sentido, entendemos que es muy importante que las empresas que se dedican a las operaciones de refuerzo con material compuesto estén acreditadas según ISO-EN-UNE 17024, por una empresa externa que certifique que aquellas personas (técnicos y operarios) que participen en el proceso de ejecución del refuerzo estén formados y tengan los conocimientos suficientes para realizar el trabajo de forma correcta.

Las inversiones económicas necesitan de profesionales, ya sean técnicos o trabajadores, que conviertan en procesos y procedimientos de trabajo los planes de inversión con un riesgo mínimo para las mismas. A mayor experiencia y formación, menor incertidumbre. Este es el fin último de la certificación de personas en sistemas de refuerzo, conseguir que las personas incrementen sus conocimientos, destrezas y actitudes ante la ejecución de unos trabajos de tanta responsabilidad como es el refuerzo de estructuras mediante materiales compuestos.

Por otra parte, las empresas dedicadas a la supervisión de los trabajos (asistencias técnicas a la dirección de obra) deben tener conocimientos su-

ficientes en este campo, de tal forma que deben ser capaces de discernir que tolerancias de ejecución son asumibles y cuales no. En consecuencia entendemos que la formación también para estas empresas es altamente recomendable y necesaria.

5. Agradecimientos

Se quiere agradecer sinceramente, a todos los miembros del Grupo de Trabajo de Materiales Compuestos, por su encomiable esfuerzo y dedicación en la redacción de la guía anteriormente mencionada. Agradecer también al Comité de Puentes, por la confianza depositada en todos nosotros.

6. Referencias Bibliográficas

- [1] FIB - Bulletin 14 (2001). Externally bonded FRP reinforcement for RC structures. Technical Report, International Federation for Structural Concrete.
- [2] UNE EN 1504. Norma europea de reparación y protección del Hormigón
- [3] ACI 440.2R-02 (2002). Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures. American Concrete Institute.
- [4] JCSE (2001). Recommendations

for upgrading of concrete structures with use of continuous fiber sheets. Concrete Engineering Series 41, Japan Society of Civil Engineers.

- [5] JBDPA (1999). Seismic retrofit design and construction guidelines for existing reinforced concrete buildings and steel encased reinforced concrete buildings using continuous fiber reinforced materials. Japan Building Disaster Prevention Association.
- [6] TR55 (2000). Design guidance for strengthening concrete structures using fiber composite materials. Technical Report No. 55 of the Concrete Society, UK.
- [7] TR57 (2003). Strengthening concrete structures with fiber composite materials: acceptance, inspection and monitoring. Technical Report No. 57 of the Concrete Society, UK.
- [8] ICE (2001). FRP composites – Life extension and strengthening of metallic structures. Design and practice guide of the Institution of Civil Engineers, UK.
- [9] ICBO (1997). Acceptance criteria for concrete and reinforced and unreinforced masonry strengthening using fiber-reinforced composite systems. International Conference of Building Officials Evaluation Service, Inc. ❖