

NUEVOS PROCEDIMIENTOS. NUEVOS MATERIALES. EXPERIENCIAS PRÁCTICAS EN ESPAÑA

Ricardo Llago Acero

Director del Departamento de Proyectos de Estructuras Metálicas, Acciona Infraestructuras

Ignacio Calvo Herrera

Director del Departamento de Investigación, Desarrollo e Innovación, Acciona Infraestructuras

Introducción

Los avances logrados durante los últimos años en el diseño y en la construcción de puentes están profundamente ligados a la aparición de nuevos materiales, a la evolución y mejora de las características de los llamados “*materiales tradicionales*” y al desarrollo y puesta a punto de los procedimientos de construcción. Es de esperar que este avance prosiga en los próximos años en todos los aspectos citados, apareciendo nuevos e importantes desarrollos en este campo.

La evolución de las tipologías y de los métodos constructivos tradicionales, así como la incorporación de nuevos materiales, más eficientes, abren un enorme abanico de posibilidades inimaginables para el diseño y la construcción de las estructuras del futuro. La investigación en dichos campos, las nuevas realizaciones y experiencias y su integración en los nuevos desarrollos normativos, hacen que todo ello sea apto para su empleo con plenas garantías en los nuevos diseños estructurales.

El objeto de la presente comunicación es mostrar el avance de los materiales compuestos, sus posibles aplicaciones, las realizaciones de ACCIONA Infraestructuras en España y los retos futuros que plantean.

Materiales estructurales tradicionales

Durante los últimos años la evolución de las características de los materiales de construcción empleados en aplicaciones estructurales ha sido muy importante, afectando a las propiedades de aquéllos que podríamos considerar como tradicionales (hormigón y acero), así como a la aparición de otros nuevos, tales como los llamados materiales compuestos o “*composites*”, a la recuperación de la madera, con la incorporación de los elementos estructurales de madera laminada, o a la llegada de los nuevos materiales cerámicos.

Hormigón

El hormigón, considerado como el material estructural por excelencia, ha evolucionado en los últimos años de una forma extraordinaria, incrementando sus capacidades resistentes a la vez que facilitando su puesta en obra.

Durante los últimos tiempos se han desarrollado los llamados “*hormigones de alta resistencia*”, con capacidades mecánicas muy elevadas, encontrándose disponibles para su empleo en múltiples aplicaciones. Algo parecido ha ocurrido con los “*hormigones ligeros*”, reduciendo el peso de los elementos estructurales de forma considerable y ampliando las posibilidades de aplicación de este material en los rangos de las grandes luces.

Similares consideraciones podrían hacerse con respecto a su puesta en obra, encontrándose a nuestra disposición los denominados “*hormigones autocompactables*”, incrementando la capacidad de los elementos, a la vez que mejorando su durabilidad y permitiendo la ejecución de elementos que, hasta hace poco tiempo, resultaban imposibles de construir.

Aceros estructurales

El acero estructural, otro de los materiales de construcción por excelencia, ha sufrido una importante transformación en los últimos años, incrementando sus propiedades mecánicas, mejorando su tenacidad y su ductilidad, su soldabilidad e, incluso, mejorando sus capacidades frente a la corrosión atmosférica.

Los avances en los procesos de producción, así como en las técnicas metalúrgicas, han dado lugar a productos tales como los “*aceros termomecánicos*”, con valores de su límite elástico cercanos a los 1.000 N/mm², aunque en las aplicaciones comunes no se empleen valores tan elevados. No obstante, este tipo de aceros presenta amplias ventajas, permitiendo una fácil soldabilidad de espesores importantes y, aunque su precio resulta todavía elevado frente a otros aceros convencionales, permiten reducir el coste de la construcción, sobre todo en el rango de las grandes luces, donde la disminución del peso propio y el empleo de medios de elevación de menor capacidad incide de forma importante en el coste total de la obra.

Por otra parte, los avances normativos han permitido un mejor entendimiento y aprovechamiento de este material, eliminando las restricciones derivadas de antiguas concepciones y pudiendo, incluso, llegar a permitir el diseño de elementos “híbridos”, disponiendo aceros con mayores capacidades mecánicas en zonas altamente solicitadas dentro de la sección.

Aceros para armar

Similares consideraciones podrían hacerse con respecto a los aceros para armar, con una mejora de sus capacidades mecánicas, de su ductilidad y de su soldabilidad, desapareciendo del mercado los denominados aceros de dureza natural o estirados en frío y los aceros lisos.

Madera

La aparición de nuevas técnicas de fabricación y tratamiento de la madera han permitido la recuperación de un material tradicional para su empleo en usos estructurales. La mejora de las técnicas de fabricación y el desarrollo de ámbitos normativos en el campo de la madera laminada (*glu-lam*), así como el avance en las técnicas de ejecución y el desarrollo de tipologías específicas para sus uniones, han permitido reconsiderar el empleo de un material de construcción tradicional, aunque aún tenga una mínima implantación en nuestro país. No ocurre lo mismo en el norte de Europa y USA, donde la implantación de programas regionales de desarrollo estructural ha logrado la existencia de múltiples realizaciones en el campo de los puentes y pasarelas. Este material, sólo o conjuntamente con el hormigón y el acero, ha sido empleado con éxito en el rango de las pequeñas luces, llegando en algún caso a penetrar en el rango de las luces medias, con ejemplos que superan los 70 metros.

Materiales compuestos

Un material compuesto se define como aquél que resulta de la unión de dos o más materiales físicamente distintos unidos químicamente, donde la mezcla se efectúa de tal forma que las proporciones entre ellos puedan hacerse de una forma determinada tal que se obtengan las propiedades óptimas especificadas. El resultado es un nuevo material con propiedades superiores a las que presentarían los componentes originales por separado. Con carácter general se denominan materiales compuestos a aquellos formados por una matriz (cerámica, metálica, orgánica o inorgánica) reforzada por fibras, y dentro de éstos, suelen denominarse “*composites*” a aquellos que se encuentran formados por una matriz termoestable de tipo epoxídica, fenólica o de poliéster, en la que se emplean como fibras de refuerzo el vidrio, el carbono o la aramida (Fig. 1). En este tipo de materiales la matriz confiere rigidez y protección ambiental y química a las fibras, mientras que éstas aportan al material compuesto una alta resistencia a tracción y un elevado módulo de elasticidad.



Fig. 1. Fibra de Carbono y Fibra de Vidrio.

Los materiales compuestos disponen de amplias ventajas con relación a otros productos, aportando numerosas cualidades tales como su ligereza, su resistencia mecánica (comportamiento lineal hasta rotura) y química, su mantenimiento reducido e, incluso, su libertad en la elección de formas. Su empleo permite incrementar la vida útil de ciertos elementos estructurales gracias a sus propiedades mecánicas (rigidez, resistencia a la fatiga) y a sus propiedades químicas (resistencia a la corrosión, estabilidad). Por otra parte, también enriquecen las posibilidades de diseño, permitiendo aligerar el peso de la estructura y ejecutar formas complejas aptas para el desempeño de las funciones previstas.

Una importante ventaja de este tipo de materiales es la posibilidad de disponer las fibras de refuerzo con la orientación y cuantía precisas para la realización de un diseño óptimo de la estructura en función de las solicitaciones existentes.

La forma usual de utilización de este tipo de materiales en la mayoría de las aplicaciones estructurales es el llamado “*laminado*”, formado por varias capas de pequeño espesor. Dependiendo de la orientación de las fibras en cada lámina y de la disposición de las mismas dentro del laminado puede generarse un amplio rango de propiedades mecánicas y físicas.

Su empleo en diversas disciplinas de la ingeniería ha empezado a extenderse, encontrando cada día más aplicaciones:

- **Electrónica:** muchos equipos eléctricos y electrónicos se realizan actualmente empleando materiales compuestos.
- **Automoción:** su empleo en la industria automovilística está muy extendido, puesto que entre la amplia variedad de beneficios que ofrecen estos materiales se encuentra su ligereza, su resistencia a la corrosión y su durabilidad, encontrando aplicaciones en la fabricación de carrocerías, depósitos de combustible, etc.
- **Aeronáutica y naval:** durante las últimas décadas ambas tecnologías han evolucionado de una forma muy significativa, concediéndoles a este tipo de materiales un papel muy importante en su desarrollo, aprovechando la ligereza y capacidades mecánicas que ofrecen. Sus aplicaciones se encuentran en los cascos de buques, alas y fuselajes, etc.
- **Construcción:** La facilidad de montaje y la durabilidad de este tipo de materiales hace que cada día surjan nuevas aplicaciones en este campo.
- **Otros sectores:** Los materiales compuestos son empleados en multitud de sectores industriales debido a la gran diversidad de propiedades que son capaces de aportar, como ocurre en el caso de plataformas para trabajo en altura, tanques de combustible, etc.

Las aplicaciones anteriores son algunas de las más importantes donde los materiales compuestos han encontrado un uso, aunque existen otras en que su consumo es menor. En el sec-

tor de la construcción, y en particular en las obras civiles, pese a la gran demanda de materiales que este sector representa, los materiales compuestos aún suponen un pequeño porcentaje frente a industrias como la aeronáutica o la automoción. Tal vez la razón pueda encontrarse en la necesidad de ser un sector altamente conservador, y en el empleo de materiales tradicionales como el hormigón y el acero, ampliamente contrastados, que ofrecen una fuerte competencia a la entrada y empleo de nuevos materiales. A pesar de ello, los materiales compuestos ofrecen amplias posibilidades, habiendo encontrado aplicación en elementos tales como paneles decorativos, rehabilitación y refuerzo de edificios y estructuras, elementos estructurales, cubiertas, paneles de muros cortina, etc.

Aplicaciones de los materiales compuestos en ingeniería civil

Como se ha indicado anteriormente, el empleo de los materiales compuestos en ingeniería civil ha tenido un uso reducido hasta el momento, empleándose fundamentalmente en el refuerzo de estructuras o en la construcción de elementos estructurales específicos. Otros campos que ofrecen amplias posibilidades se encuentran en las aplicaciones de tipo geotécnico, donde hasta el momento únicamente se han desarrollado pequeñas aplicaciones en elementos de refuerzo de suelos o sistemas de cimentación. Estos materiales son ideales para su uso en la construcción debido a su estabilidad dimensional, su alta durabilidad, su ligereza, su baja inflamabilidad y su elevada resistencia al impacto. Por otra parte, mediante una adecuada elección de resinas y aditivos permiten una elevada flexibilidad en todos aquellos aspectos relacionados con el diseño.

Refuerzo de estructuras existentes mediante adherencia de FRP

España posee un importante inventario de estructuras de obra civil que requieren o requerirán en los próximos años una adecuación a nuevos usos, una reparación debido a la degradación, actualización a nuevas normativas o acciones, cambios de uso, etc. La respuesta a estas exigencias durante un tiempo ha sido el refuerzo mediante el empleo de chapas de acero encoladas, aunque su peso, su colocación dificultosa y su rápido deterioro han limitado el uso de este tipo de soluciones.

Como sustitutivo a esta clase de soluciones, aparecieron hace unos 25 años los polímeros reforzados con fibras, FRP (*fiber-reinforced polymer*), con una importante aceptación hoy en día. El atractivo de los refuerzos empleando FRP se encuentra en su elevada resistencia a tracción, en su durabilidad y resistencia a la corrosión, así como en su elevada relación resistencia/peso, lo que facilita y acelera la ejecución de estas labores de refuerzo, evitando en muchos casos una larga interrupción del servicio que proporciona la infraestructura afectada (Fig. 2). Por otra parte, el empleo de este tipo de refuerzos, de forma diferente a otro tipo de opciones, no introduce cargas significativas en la estructura reforzada debido a su ligereza.



Fig. 2. Refuerzo de estructura con fibra de carbono.

Es por las razones anteriormente expuestas por lo que los materiales compuestos han encontrado un rápido campo de aplicación en el refuerzo de estructuras de hormigón, donde estas labores han sido realizadas con éxito. Este tipo de refuerzos se ejecuta de forma muy rápida, con un número muy reducido de operarios y empleando medios auxiliares muy ligeros, todo lo cual minimiza las interrupciones del uso de la estructura y las molestias a los usuarios. La aplicación de este tipo de materiales se traduce en un importante ahorro de mano de obra y medios auxiliares frente a los refuerzos tradicionales, lo que compensa el mayor coste de la materia prima, añadiendo, además, una ausencia de mantenimiento.

Entre sus aplicaciones podrían citarse las siguientes:

- Resolución de patologías.
- Rehabilitación de estructuras.
- Cambios de uso que conlleven incrementos de cargas de explotación.
- Adaptación a nuevas normativas.
- Reparación de estructuras dañadas con pérdida de sección resistente.

Diseño de nuevos puentes

Aunque la aplicación de los materiales compuestos en elementos estructurales de edificación no es demasiado frecuente, no puede decirse lo mismo en obra civil, con algunas aplicaciones en puentes y pasarelas y, como ya se ha indicado, en el refuerzo de estructuras existentes. Tal vez sea en el diseño y construcción de pasarelas y puentes donde, en el ámbito de la construcción, se han realizado mayores avances en la investigación de los materiales compuestos, con algunas aplicaciones relevantes en España.

El empleo de este tipo de materiales en el caso de los puentes y pasarelas proporciona una alta capacidad de carga con un bajo peso del material, lo que podría evitar importantes gastos en elementos auxiliares a la vez que, aprovechando las ventajas de la prefabricación, reducir de forma apreciable los plazos de ejecución de las infraestructuras. Por otra parte, la ventaja añadida de su elevada durabilidad reducirá, en un futuro, los costes de mantenimiento y reposición.

En algunos países, aprovechando las ventajas derivadas de su ligereza, lo que se traduce en una gran facilidad de transporte, manipulación y montaje, han empezado a desarrollarse sistemas modulares para su aplicación en la construcción de puentes o en la rehabilitación y cambio de uso de tableros de estructuras existentes.

Aplicaciones geotécnicas

A diferencia de su empleo en aplicaciones estructurales, tales como refuerzos de estructuras existentes o nuevas estructuras, el desarrollo de los materiales compuestos en aplicaciones geotécnicas no ha sido tan amplio como en aquéllas, pese a que algunos tipos de fibras han sido empleados en el refuerzo de suelos.

Dentro de las aplicaciones más importantes en estos usos se encuentran:

- Pilotes.
- Anclajes.
- Cosido mediante bulones.

El empleo de FRP para el diseño y la fabricación de pilotes ha tenido un desarrollo importante en USA, donde han sido empleados con éxito en ambientes agresivos, como es el caso de los recintos portuarios. Para ello se han utilizado perfiles de pultrusión o camisas de FRP rellenas de hormigón, empleando para ello una matriz polimérica de poliéster reforzada con fibra de vidrio. Los pilotes ejecutados han presentado un buen comportamiento estructural ante cargas verticales y horizontales, así como unas magníficas características ante agentes agresivos.

Otros usos geotécnicos de este tipo de materiales se encuentran en el empleo de barras en anclajes o bulones (“*soil nailing*”) como alternativa a los elementos tradicionales de acero, en algunos casos afectados por graves problemas de corrosión. Sus usos se han orientado principalmente a la estabilización de frentes de excavación en túneles, taludes o anclajes de muros. La técnica empleada para la fabricación de estos elementos ha sido la de pultrusión, utilizando para ello polímeros reforzados con fibra de vidrio o carbono.

Otras aplicaciones en obra civil

Otras aplicaciones que todavía son poco frecuentes en obra civil, son, por ejemplo, el empleo de armaduras de FRP en estructuras de hormigón (Fig. 3), su uso como tendones de pretensado y tirantes y el confinamiento de secciones, como podría ser el caso de pilas.



Fig. 3. Armadura de fibra de vidrio.

En el primer caso, el empleo de armaduras de FRP en sustitución de las tradicionales armaduras de acero, podría presentar importantes ventajas en algunos casos debido a su resistencia a la corrosión y a su mejor comportamiento en ambientes agresivos. Además, tienen un menor peso y una mayor resistencia a la tracción, aunque su módulo de deformación sea menor. Su empleo en estructuras de hormigón ha sido aplicado en USA, Japón y en algunos países europeos, habiéndose desarrollado en algunos de ellos códigos y recomendaciones para su empleo, como es el caso de la normativa americana ACI. Sin embargo, aunque su empleo permite importantes ventajas en ambientes agresivos, no debe olvidarse la dificultad que presenta la materialización de los cercos debido a la imposibilidad de doblado. Igualmente existen aspectos diferenciadores a tener en cuenta respecto al comportamiento de las armaduras convencionales de acero, como es su adherencia, su contribución a cortante o su colaboración en compresión.

Entre los usos estructurales en obra civil podría citarse su empleo como tendones de pretensado, donde se ha empleado la fibra de carbono y la aramida, presentando una baja fluencia y una baja relajación. Las propiedades de estos materiales los hacen aptos para su empleo en sistemas de pretensado exterior. En su uso como cables de atirantamiento su reducido peso hace que aumente su rigidez aparente, ya que las deformaciones verticales debidas a su peso propio son muy reducidas. Presentan, además, un mejor comportamiento a fatiga, aunque los sistemas de anclaje de los mismos resultan complicados.

Otra de las aplicaciones citadas es el confinamiento de secciones, principalmente en pilas y pilares. El principio físico en que se basa esta aplicación consiste en aumentar la resistencia a com-

presión del hormigón limitando para ello la expansión volumétrica producida al actuar un esfuerzo de compresión sobre un elemento. La forma en que se consigue este confinamiento es mediante el recubrimiento de las caras exteriores del elemento comprimido empleando para ello materiales compuestos, de tal forma que el hormigón no sea capaz de expandirse.

Experiencias de ACCIONA Infraestructuras en España

Durante los últimos catorce años ACCIONA Infraestructuras ha dedicado un importante esfuerzo de investigación en todos aquellos aspectos relacionados con las aplicaciones estructurales de los materiales compuestos, incidiendo particularmente en los campos relacionados con el diseño y la ejecución.

Los ejemplos que se muestran a continuación reflejan dichas experiencias prácticas, para lo cual se ha contado con la colaboración inestimable de Administraciones tales como la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento, la Comunidad de Madrid o ADIF. Esta colaboración, como se mostrará a continuación, ha permitido materializar el diseño y la construcción de dos puentes, así como el refuerzo de diversas estructuras mediante las técnicas derivadas de la aplicación de este tipo de materiales.

Refuerzo del Viaducto 4. Arcos de Jalón (Soria)

El Viaducto 4 se encuentra situado en el término municipal de Arcos de Jalón (Fig. 4), en la provincia de Soria, siendo una de las seis estructuras que forman el Subtramo VIII de la línea de Alta Velocidad Madrid - Zaragoza - Barcelona - Frontera Francesa. El viaducto, de 330 metros de longitud, se resuelve mediante el empleo de un cajón monocelular de hormigón pretensado, con un canto de 3,50 metros (Fig. 5) y una anchura total de 14,00 metros. La estructura se encuentra formada por seis vanos de luces $45 + 4 \times 60 + 45$ metros, habiéndose ejecutado mediante la técnica de empuje del tablero.

Durante la construcción del Viaducto 4 se detectó una baja de resistencia en el hormigón correspondiente a las almas de la dovela 3, situada sobre la pila P-1, entre el vano extremo de 45 metros y el primer vano interno de 60 metros. El valor de la resistencia característica obtenida no impedía continuar con el empuje de la estructura, por lo que se decidió esperar a la finalización del proceso y, una vez situada en su posición definitiva, observar la evolución de la resistencia del hormigón y proceder al refuerzo de las almas si así fuera preciso. La resistencia obtenida después de realizar dos se-



Fig. 4. Viaducto 4. Arcos de Jalón (Soria).

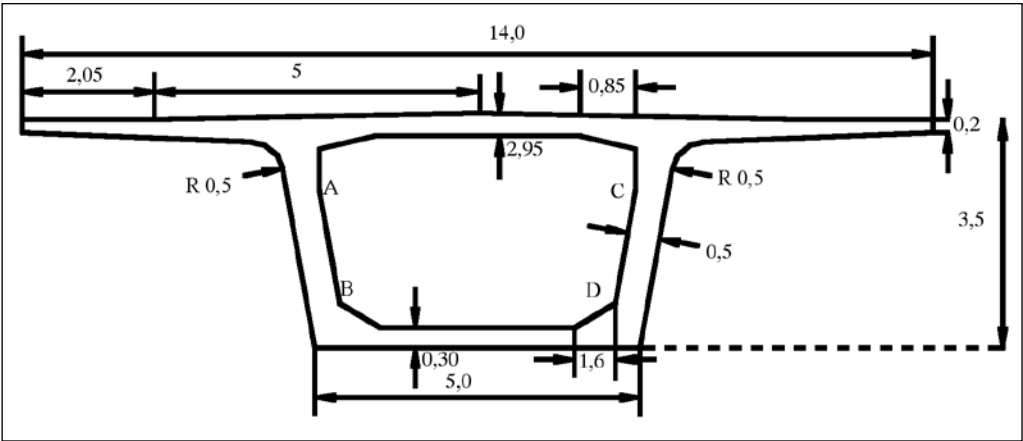


Fig. 5. Sección transversal del viaducto.

ries de probetas a 60 días arrojó un valor de 37 MPa, siendo precisa una resistencia característica mínima de 41 MPa. Esta circunstancia planteaba un descenso de la capacidad de las almas en torno al 23%, lo que resultaba inaceptable.

Las circunstancias anteriormente citadas hacían necesario proceder al refuerzo de las almas en una zona situada a unos cinco metros de la pila P-1, en el vano interno. Entre las opciones propuestas por ACCIONA Infraestructuras se consideró el refuerzo de las almas mediante el empleo de materiales compuestos, lo que contó con la aprobación de la Dirección de Obra y del Equipo Redactor del Proyecto.

El diseño del refuerzo se realizó teniendo en cuenta el contenido de la Instrucción de Hormigón Estructural EHE. De acuerdo con los análisis efectuados a partir de los datos obtenidos se diseñaron y construyeron unas láminas pre-curadas de matriz polimérica y fibras de carbono (CFRP),



Fig. 6. Proceso de instalación del refuerzo y monitorización en el interior de la dovela.

con una capacidad a tracción de 1.500 MPa. La placa, fijada a las almas en el interior del cajón, se compone de tres capas de tejido, estando en dos de ellas orientadas las fibras a 45°, y a 0° en la otra, dando lugar a un espesor total de 3 mm.

Previamente a la fijación de las placas se procedió a una preparación de la superficie del hormigón mediante chorro de arena y la aplicación de un imprimante, mejorando así las condiciones de adherencia de las placas. Una vez reforzados ambos lados de la dovela se procedió a la colocación de las juntas entre las placas que forman la totalidad del panel. Finalizado el refuerzo se monitorizó éste para comprobar así el porcentaje del esfuerzo cortante absorbido por el material compuesto (Fig. 6).

Puente en la Autovía del Cantábrico (Asturias)

En Diciembre de 2.004, en colaboración con la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento, se finalizó la construcción del puente carretero más largo del mundo realizado con materiales compuestos, con una longitud total de 46,00 metros. Esta estructura da lugar al paso superior del PK 1+640 situado en el Tramo Tamón (Carreño) – Otur (Luarca) de la Autovía del Cantábrico (Fig. 7). El diseño adoptado consistió en una estructura mixta hormigón – materiales poliméricos reforzados con fibra de carbono, de tipo continuo, encontrándose formada por cuatro vanos de luces $10 + 2 \times 13 + 10$ metros.

El tablero se encuentra formado por tres vigas trapezoidales de sección cerrada, realizadas con materiales poliméricos reforzados con fibra de carbono y rellenas de espuma de poliuretano, la cual se emplea como base para la ejecución del laminado. Sobre las vigas se dispone una losa de hormigón armado colaborante en el comportamiento longitudinal de la estructura, desarrollándose una acción mixta entre ambos materiales. La sección transversal de cada una de las vigas trapeziales posee un canto de 0,80 metros, con anchos de 0,80 metros en el ala inferior y de 1,20 metros en el ala superior. Como se ha indicado, sobre dichas vigas se dispone una losa de hormigón armado, de 0,20 metros de espesor, dando lugar a un ancho total del tablero de 8,00 metros.



Fig. 7. Puente en materiales compuestos en la Autovía del Cantábrico.



Fig. 8. Puente en la Autovía del Cantábrico. Proceso constructivo.

Para evitar el uso de encofrados, la losa se ejecutó mediante el empleo de prelosas realizadas en fibra de vidrio, las cuales, a la vez que proporcionan soporte al hormigón fresco de la losa, colaboran en la capacidad portante de la misma.

Las vigas fueron diseñadas como elementos continuos para la longitud total de 46,00 metros, lo que, debido al comportamiento hiperestático de las mismas, llevó a un diseño específico del ala inferior en las zonas de apoyo en pilas, empleando elementos de tipo “core” para incrementar su rigidez y estabilidad. Igualmente las vigas incorporan diafragmas internos en las secciones de apoyo y en secciones intermedias, encontrándose también resueltos mediante el empleo de materiales compuestos.

El canto total de la sección mixta es de 1,00 metros, lo que le proporciona una relación canto/luz de valor 1/13. El paso superior posee un trazado recto en planta, con una pendiente longitudinal constante del 1,5%, descendiendo desde el estribo E-2 al estribo E-1.

Debido a las especiales características de los materiales que componen las vigas, extremadamente ligeros, el montaje de las mismas se llevó a cabo mediante el izado y posicionamiento con una grúa automóvil en varias fases, una vez unidos los subconjuntos hasta lograr la longitud total de 46,00 metros. En la primera fase se procedió al izado y posicionamiento de la viga central de 46,00 metros de longitud y 1,20 metros de ancho. Posteriormente, en la segunda fase se efectuó el izado y posicionamiento de una de las vigas laterales, con sus prelosas ya unidas. Finalmente se procedió a la elevación y posicionamiento de la otra viga lateral, con sus prelosas colocadas (Fig. 8). Una vez finalizada la colocación de las tres vigas, con sus respectivas prelosas de fibra de vidrio, se procedió al armado y hormigonado de la losa de 20 centímetros de espesor.

Esta estructura se encuentra monitorizada desde la finalización de su ejecución, y el conjunto de los datos obtenidos, tras casi cinco años de servicio, está siendo analizado en el momento actual para extraer las conclusiones oportunas sobre su comportamiento. Los resultados de dicha investigación serán puestos a disposición de la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento.

Puente en la carretera M-111 (Madrid)

En Enero de 2.008 finalizó la construcción de dos estructuras gemelas de 34,00 metros de longitud y 20,40 metros de anchura total, situadas en la Variante de Fuente el Saz del Jarama, en la carretera M-111, perteneciente a la Comunidad de Madrid (Fig. 9). Los puentes aquí presentados se encuentran formados por tres vanos simplemente apoyados, con luces de $10 + 14 + 10$ metros.

La sección transversal, de 20,40 metros de anchura, se encuentra formada por cuatro vigas, dos por cada sentido de circulación, sobre las que se dispone una losa de hormigón armado de 0,30 metros de espesor. Este elemento colabora en el comportamiento longitudinal de la estructura, desarrollándose una acción mixta entre las vigas de material compuesto y la losa. El canto total de la sección mixta resultante es de 1,50 metros, lo que proporciona una relación canto/luz de valor $1/9$, aproximadamente.

Para las vigas se adopta una sección transversal en cajón. Estos elementos se fabrican a partir de una sección abierta en omega invertida, la cual se cierra posteriormente al nivel del ala superior en toda su longitud mediante un panel sándwich. Este panel se encuentra formado por un núcleo interior de poliuretano de alta densidad sobre el que se disponen en ambas caras laminados de fibra de vidrio. Como resultado de esta disposición durante el hormigonado el panel sándwich forma parte del ala superior de la viga cajón, a la vez que sirve de encofrado para la losa, soportando el peso del hormigón fresco. Una vez que el hormigón ha endurecido las vigas formadas por materiales compuestos y la losa desarrollan un comportamiento mixto mediante el empleo de pernos conectores metálicos, de tipo “stud”, unidos a las alas superiores de las vigas.



Fig. 9. Puente en materiales compuestos en la M-111 (Madrid).



Fig. 10. Puente en la M-111 (Madrid). Proceso constructivo.

Las alas inferiores de las vigas están formadas por laminados híbridos de fibra de vidrio y fibra de carbono, con un gran número de las fibras orientadas según la dirección del eje de la viga. Las almas han sido diseñadas como paneles sándwich, con un núcleo de poliuretano de alta densidad y laminados de fibra de vidrio. Los diafragmas transversales dispuestos a lo largo de las vigas han sido resueltos igualmente mediante paneles tipo sándwich.

La fracción en volumen de fibras, tanto de las pieles del sándwich como del laminado, es igual al 40%, y este porcentaje ha venido determinado esencialmente por el proceso de fabricación de las vigas. El espesor de las alas inferiores y de las pieles de los paneles sándwich varían según la distribución de esfuerzos a lo largo de los diferentes elementos. Así, las pieles de los paneles correspondientes a las almas han incrementado su espesor en la cercanía de los apoyos, como corresponde a la distribución de esfuerzos cortantes. El canto y el número de vigas adoptados en la sección transversal han venido dados por un detallado estudio de optimización del coste global de la estructura.

Una vez finalizada la colocación de las vigas con sus respectivas prelosas de fibra de vidrio (Fig. 10), se procedió al armado de la losa del tablero, de 30 centímetros de espesor, y al hormigonado posterior de la misma.

Nuevos procedimientos

Las experiencias adquiridas en el diseño y la construcción de dos puentes con materiales compuestos en España han permitido una evolución en diferentes aspectos del comportamiento estructural y de la ejecución, lo cual ha hecho que se desarrollen nuevos procedimientos de diseño y ejecución más acordes con el material empleado, permitiendo así un avance en las técnicas que deberán emplearse en futuras realizaciones.

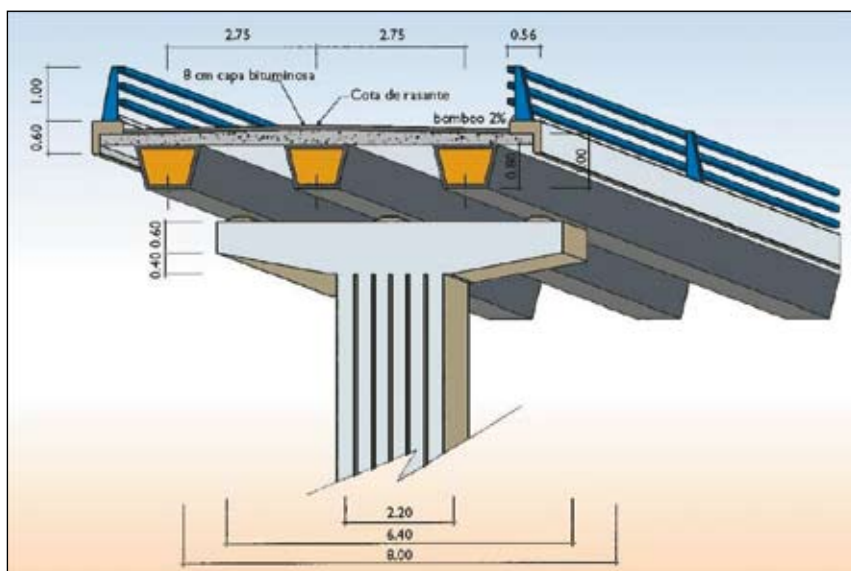


Fig. 11. Puente sobre la Autovía del Cantábrico. Sección transversal.

Evolución de las secciones transversales

Resulta interesante observar la evolución producida en el diseño de las secciones transversales correspondientes a ambos puentes, fundamentalmente provocada por un avance y mejora de los procesos de fabricación empleados.

En el primer caso, en el puente sobre la Autovía del Cantábrico (Fig. 11), la sección transversal adoptada es cerrada, fruto de la facilidad de construcción que suponía el empleo de un relleno de espuma de poliuretano para lograr la forma final. Sin embargo, aunque la presencia de este

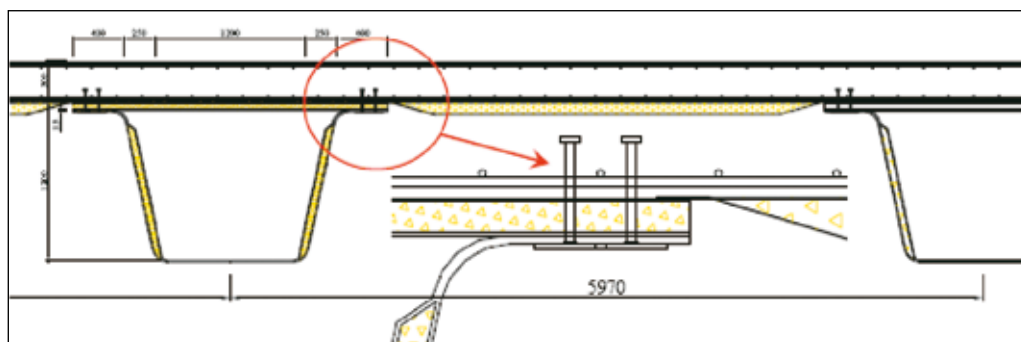


Fig. 12. Puente sobre la M-111 (Madrid). Sección transversal.

elemento simplificaba la ejecución del laminado de las vigas, la incorporación de elementos transversales, como es el caso de los diafragmas, exigía un gran esfuerzo. La evolución hacia la sección abierta utilizada en el puente sobre la M-111 (Fig. 12) surge como respuesta a esta necesidad constructiva, empleando para la ejecución de la sección un molde metálico que permite lograr las formas buscadas.

Otras diferencias que pueden apreciarse entre ambas secciones es el empleo de híbridos de fibra de vidrio y fibra de carbono en el segundo caso, frente al empleo de fibra de carbono en el primero. El incremento de rigidez en las almas para asegurar su estabilidad se ha logrado mediante el empleo de paneles sándwich, lo cual ha permitido incrementar la distancia de los elementos de rigidización transversal, cuya construcción se ha facilitado mediante la adopción de una sección abierta.

Estos ejemplos de evolución en la sección transversal se encuentran relacionados directamente con la simplificación de los procesos de producción y con un mayor aprovechamiento de los materiales empleados, lo que parece indicar que estos aspectos pueden conducir a la aparición de tipologías propias de los materiales compuestos que tengan en cuenta sus procesos de fabricación y aporten soluciones propias a los comportamientos estructurales. A este respecto merece la pena destacar las soluciones adoptadas para incrementar la estabilidad de alas y almas, basadas en el empleo de paneles sándwich, con una mayor rigidez, en lugar del empleo de elementos de rigidización longitudinal y transversal.

Conectores

Las conclusiones extraídas de los diseños efectuados han permitido reconsiderar la forma en que se efectúa la transferencia del esfuerzo rasante entre la losa y la sección de las vigas de materiales compuestos, modificando los elementos empleados para ello. Inicialmente se emplearon perfiles en doble T pultrusionados, unidos mediante adhesivos al ala superior de la viga. Aunque su comportamiento resulta correcto, como mostraron los ensayos efectuados, su presencia plantea problemas de ejecución al dificultar la colocación de las armaduras de la losa del tablero.

La transferencia de tecnología desde otros materiales, como es el caso de las estructuras mixtas acero – hormigón, ha permitido simplificar el diseño de la conexión, empleando para ello pernos tipo “stud”, una solución habitual en aquellas estructuras. Este es un ejemplo del aprovechamiento deseable de tecnologías y soluciones estructurales existentes en otros materiales, y que pueden ser válidas en el desarrollo de la tecnología propia de los materiales compuestos.

Prelosas y encofrado perdido

Otro de los aspectos que resulta interesante es la diferencia entre los elementos empleados como encofrado de la losa entre ambas realizaciones. En el primer ejemplo, en el puente sobre la Autovía del Cantábrico, se adoptó una solución de prelosa colaborante, empleando para ello fibra

de vidrio y perfiles pultrusionados. Estos últimos elementos aportaban la rigidez necesaria a la vez que desarrollaban el mecanismo de transmisión del esfuerzo rasante entre la fibra de vidrio y el hormigón de la losa. Sin embargo, como ocurría con la conexión de las vigas, estos elementos dificultaban la colocación de las armaduras de la losa en obra.

La solución adoptada en el puente sobre la M-111 ha sido el empleo de paneles sándwich de fibra de vidrio y núcleo de poliestireno expandido, lo cual ha aportado una buena rigidez al sistema sin necesidad de emplear elementos que interfieran con la armadura. No obstante la solución empleada en este caso únicamente ha sido utilizada como encofrado perdido, permitiendo así una simplificación de las labores de ejecución en obra. Sin embargo, aunque la ejecución se ha simplificado, se ha abandonado un mecanismo de colaboración entre materiales, por lo que resulta necesario seguir profundizando en su diseño para lograr una continuidad en sus juntas y establecer un mecanismo adecuado de transferencia del esfuerzo rasante que permita su participación en la capacidad resistente de la losa del tablero.

Retos futuros

La presente comunicación ha tratado de establecer una panorámica en la evolución de las aplicaciones de los nuevos materiales compuestos en el campo estructural, y, en particular, en el diseño y construcción de puentes. No cabe duda que las transformaciones que se están produciendo en el diseño y la construcción de estructuras han venido de la mano de la evolución de los materiales tradicionales, de la aparición de nuevos materiales, más eficientes, y de la transformación y puesta al día de los procesos constructivos.

En el caso de los materiales compuestos nos encontramos al inicio de la aplicación de un nuevo material a un campo bien establecido, y eso plantea nuevos retos y la necesidad de desarrollar nuevas tecnologías específicas del nuevo material que, como es lógico, tendrán que venir acompañadas de la sensatez y el equilibrio que siempre han caracterizado a la ingeniería estructural. Por todo ello la ingeniería estructural deberá efectuar un importante esfuerzo para comprender las posibilidades que ofrecen los nuevos materiales, y así poder aprovecharlas y ampliar su potencialidad a través de nuevos diseños y concepciones.

Tipologías

Como ha ocurrido con otros materiales a lo largo de la historia de la construcción, la aparición de un nuevo material toma a otro existente como referencia, adoptando las tipologías habitualmente utilizadas en la aplicación del primero. Algo similar ha ocurrido con las primeras aplicaciones estructurales de los materiales compuestos, en los que su comportamiento elástico lineal y sus reducidos espesores han tomado como material de referencia al acero, adoptando sus tipologías y sus diseños. Es de desear que en un futuro breve se desarrollen tipologías propias de este material, que aprovechen al máximo su comportamiento y que tengan en cuenta sus diferentes procesos de ejecución.

Procesos de fabricación

Es razonable pensar que las grandes estructuras que se desarrollen en el futuro en el campo de los materiales compuestos lo harán empleando laminados, ya que son estos elementos los que pueden aportar más versatilidad de formas, diseños y espesores y elección en la orientación de fibras. No quiere ello decir que los diseños que empleen elementos pultrusionados no en-



Fig. 13. Estructura formada por perfiles de pultrusión y uniones mecánicas.

cuentren su lugar, sino que, como en el caso de los perfiles laminados en las estructuras metálicas, encontrarán más limitaciones (Fig. 13).

Aceptando que el desarrollo futuro pasará por el empleo de laminados, resulta imprescindible reducir la duración del proceso de ejecución, por lo que será preciso avanzar en aquellas técnicas de producción que sistematicen los procesos, introduciendo todas las ventajas que la industrialización ha aportado a otros sectores productivos. Resulta importante, por tanto, prestar una especial aten-

ción a los avances tecnológicos que se producen en relación a este tipo de materiales en otros sectores de la industria, permitiendo así un diseño óptimo de la fabricación y reduciendo los costes de elaboración, hoy en día excesivamente artesanal.

Desarrollo de uniones mecánicas

Si bien se han adaptado los procesos de ejecución al propio material, permitiendo la prefabricación de elementos estructurales en taller, su ensamblaje en obra para formar conjuntos de mayor entidad no se encuentra resuelto de una forma satisfactoria, lo que impide en el momento actual avanzar hacia realizaciones de mayor entidad que las aquí presentadas. La aplicación de las técnicas de unión en obra, tal y como se realizan en taller, mediante procesos de tipo químico, resulta complicada en el caso de estructuras ejecutadas mediante laminado, lo cual impide o, al menos dificulta, la materialización de otras tipologías o de estructuras más complejas, con comportamientos hiperestáticos y procesos constructivos evolutivos.

Resulta deseable, por tanto, avanzar en la forma de elaborar conjuntos de mayor volumen partiendo de elementos transportables, y ello debe hacerse a través de uniones sencillas y fiables que sean fácilmente ejecutables y controlables en obra. Dichas uniones deberán basarse en elementos mecánicos, tales como las uniones de tipo atornillado empleadas en las estructuras metálicas, por lo que un importante reto es el desarrollo desde el punto de vista teórico y de ejecución de este tipo de uniones, así como sus posibles tolerancias, su durabilidad, su comporta-

miento estructural y su materialización física. Tal vez el desarrollo de este tipo de uniones, como ha ocurrido en otros materiales, dé lugar a tipologías propias de este material, e influya en los procesos de fabricación y ejecución de las nuevas estructuras.

Nuevas aplicaciones

Se ha efectuado un repaso de las aplicaciones que estos nuevos materiales han encontrado en el campo de la obra civil. Sin embargo no puede considerarse que el número de aplicaciones de estos nuevos materiales se encuentre cerrado, y es posible que en un futuro aparezcan nuevos usos, como ocurre en el campo de la geotecnia, o en las aplicaciones en armaduras activas y pasivas o sistemas de atirantamiento, donde, como en el caso de las uniones estructurales, resulta preciso avanzar en los sistemas de anclaje de estos materiales.

Estructuras mixtas

La búsqueda de la máxima eficiencia de los materiales en el comportamiento estructural conducirá, sin duda, a un incremento de la presencia de estructuras mixtas, consideradas éstas en su sentido más amplio, apareciendo diferentes hormigones combinados en la estructura, hormigón y acero, o acero y hormigón con materiales compuestos, disponiéndose de tal forma que cada material trabaje de la manera más idónea de acuerdo con su capacidad y comportamiento.

Así, la presencia del hormigón en las estructuras mixtas hormigón – materiales compuestos permite controlar las consecuencias catastróficas que podrían producirse por la posible inestabilidad de las zonas comprimidas, sin posibilidad alguna de desarrollo de mecanismos postcríticos debido al comportamiento lineal elástico del material en el fallo.

Por otra parte estos materiales permiten el desarrollo de otros materiales mixtos, como es el caso de la madera laminada, donde se están llevando a cabo investigaciones para introducir FRP en su fabricación, lo que permitiría incrementar la capacidad de este material de una forma muy considerable, o, incluso, los hormigones reforzados con fibra de vidrio.