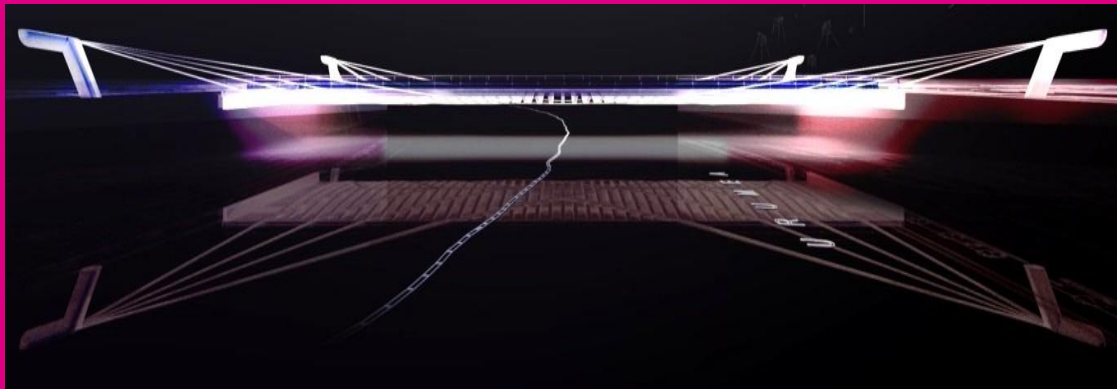


Proyectos de **I+D+i**  
2011-2013



## **Puente autotensado de materiales avanzados**

**Memoria divulgativa de resultados**

Universidad de Granada | Oritia & Boreas



Agencia de Obra Pública de la Junta de Andalucía  
**CONSEJERÍA DE FOMENTO Y VIVIENDA**



**Unión Europea**

Fondo Europeo  
de Desarrollo Regional





# **Puente autotensado de materiales avanzados**

© Agencia de Obra Pública de la Junta de Andalucía. Consejería Fomento y Vivienda. Junta de Andalucía. 2014

Universidad de Granada - Oritia & Boreas

Equipo de investigación: Universidad de Granada y Agencia de Obra Pública de la Junta de Andalucía

Granada, 25-07-2014

## 1. Introducción y antecedentes

El desarrollo de cualquier región está íntimamente relacionado con el desarrollo de sus infraestructuras. Una imagen de modernidad de las mismas tiene el efecto de llamar poderosamente la atención, atrayendo inmediatamente inversión a la zona. El diseño de las infraestructuras es fundamental en esta imagen, aunque con frecuencia, las técnicas y materiales de construcción tradicionales limitan las posibilidades de diseño; y si se abordan, los costes son excesivamente altos. Adicionalmente, la sociedad percibe como graves problemas los incómodos y largos periodos de afección de las obras, y el aspecto masivo e invasivo de las estructuras de hormigón y acero habituales.

La utilización de materiales avanzados de alta eficacia, como los composites de fibra de carbono o vidrio originarios de la industria aeronáutica y aeroespacial, se presenta como alternativa viable en el diseño de estructuras de ingeniería civil en las que las exigencias de ligereza, durabilidad y tiempo de construcción se convierten en aspectos críticos del diseño.

Como fruto de los últimos 10 años de actividad de nuestro grupo de investigación se han conjuntado varios elementos que generan una solución drástica en el caso de puentes, en términos de diseño, tiempos de construcción, impacto ambiental, durabilidad y economía. De un lado, los materiales compuestos (composites de fibra de carbono o vidrio) y de otro, la aplicación de tecnologías de diagnóstico médico basadas en ultrasonidos, han posibilitado la concepción de una nueva tipología estructural para puentes diseñada íntegramente en material compuesto. Dicha tipología se ha denominado "autotensada" por la forma en que la estructura entra en carga una vez construida, y justifica su forma en el hecho de que optimiza el funcionamiento estructural anisótropo característico de los composites de fibra sintética. Esta nueva tipología estructural, supone una nueva forma de concebir las estructuras y a su vez, una nueva estética de mano de un nuevo material (ver Fig. 1 y 2).

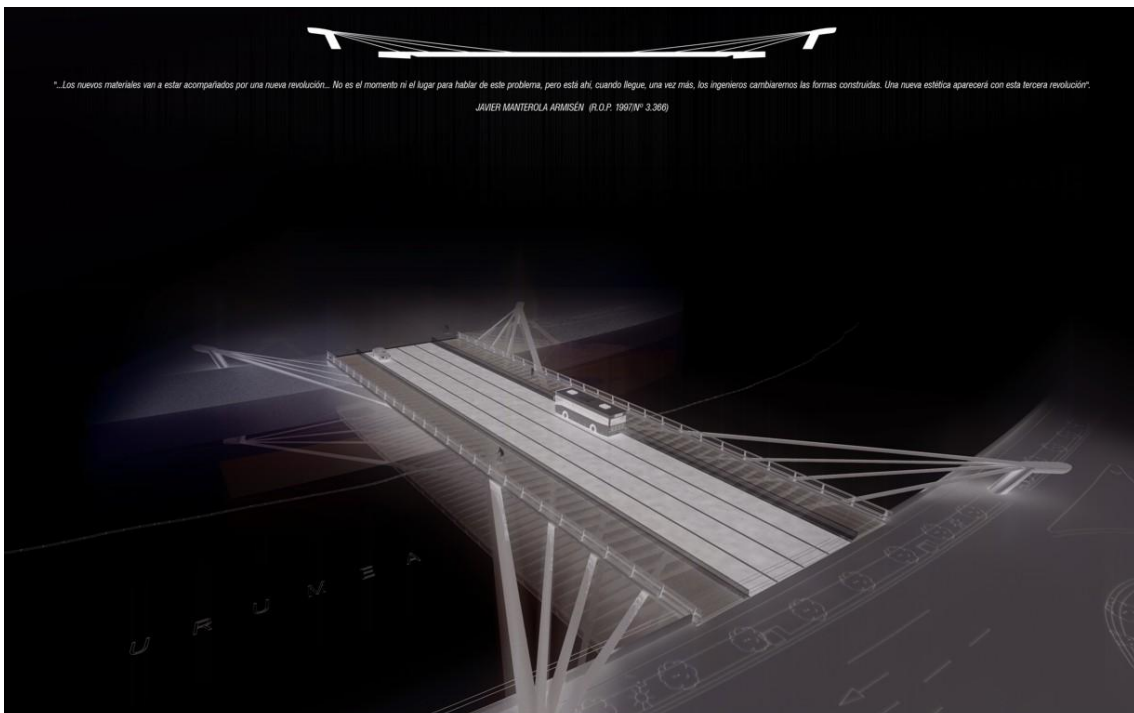


Fig. 1: Diseño conceptual del puente autotensado de materiales compuestos.

## 2. Objetivos perseguidos

El objetivo general de este proyecto ha sido poner a punto un nuevo concepto de puente de tipología autotensada (o sea, capaz de ponerse en carga estructural por sí mismo) aportando nuevo conocimiento en el comportamiento de estructuras "all-composite" y en el desarrollo de metodologías avanzadas de monitorización de salud estructural. De forma concreta, el primer objetivo específico ha sido (1) el desarrollo de un sistema de monitorización estructural para poder corroborar la respuesta estática y dinámica. El segundo objetivo (2) fue la realización de ensayos sobre modelo a escala estático, de cara a garantizar la funcionalidad y seguridad del puente autotensado de materiales avanzados concebido. Ello reforzará el conocimiento sobre su funcionamiento a lo largo de su vida útil, a la vez que se controla en tiempo real su seguridad. El impacto de este diseño novedoso de puente se puede resumir en términos de los siguientes beneficios:

- Una esbeltez y ligereza de varios órdenes de magnitud menores, abriendo unas posibilidades de diseño desconocidas hasta ahora a costes habituales.
- Reducción drástica de los tiempos de construcción, reduciendo en la misma proporción el impacto ambiental.
- Mayor economía a lo largo de la vida útil. Se aporta una tecnología avanzada de gestión del ciclo integral de vida en base a una monitorización de salud en tiempo real.
- Se incorporan las más avanzadas tecnologías en cuanto a materiales y monitorización, dando oportunidades al desarrollo del tejido tecnológico de alta cualificación de Andalucía.

## 3 Resultados obtenidos

En este proyecto de investigación han surgido varios resultados específicos según la planificación inicial, así como otros transversales, típicos del transcurso normal de la investigación. A continuación se enumeran los más destacados en relación a los objetivos iniciales del proyecto, y sobre todo, aquellos con mayor potencial de transferencia a la industria.

- Metodología de simulación y diseño optimizado para estructuras autotensadas. Resultado de optimización conducente a una eficacia estructural de 500/1, entendida como el ratio sobrecarga de uso/ peso propio de la estructura obtenida.
- Modelo numérico avanzado con consideración de degradación por fatiga mecánica. Se ha conseguido incorporar la degradación por fatiga en las simulaciones numéricas con objeto de predecir de antemano su vida útil.
- Metodología para la monitorización por ultrasonidos de las láminas de fibra de carbono . Además, se incorpora un nuevo método de simulación de la señal ultrasónica para detección de daño.
- Metodología para construcción de modelo a escala y producción de elementos resistentes a escala reducida mediante impresoras 3D. Ello reduce drásticamente los costes de experimentación y reduce la incertidumbre para el proceso de ejecución. La reproducción a escala nos ha permitido realizar de forma viable ensayos estáticos, ensayos dinámicos y de monitorización.
- Estudio de cargas aeroestáticas en túnel de viento. Los resultados muestran que la afcción por el viento es mínima en cuanto a presiones, debido a la elevada permeabilidad aeroestática.

En los siguientes subapartados, se discuten los resultados obtenidos como respuesta a las preguntas de investigación y objetivos perseguidos inicialmente.

### 3.1 . Aspectos innovadores y justificación del proyecto

La aplicación del acero produjo la primera revolución formal en la ingeniería de estructuras a finales del siglo XIX, lo que permitió la construcción y proliferación de grandes rascacielos, puentes colgantes de acero, etc. Posteriormente, durante la primera mitad del siglo XX la aparición de la tecnología del hormigón pretensado produjo una segunda revolución formal gracias a la cual se posibilitó la construcción de puentes de hormigón de gran luz, cubiertas autoportantes de hormigón, etc.

Desde esta segunda revolución no se han experimentado avances significativos en la búsqueda y aplicación de nuevos materiales para la construcción de puentes y otras estructuras de ingeniería civil. Sin embargo, en los últimos años se está asistiendo al inicio de una nueva revolución en la ingeniería de estructuras, con la aplicación a nivel experimental de materiales avanzados de alta eficacia como los compuestos de fibras de carbono y vidrio (CFRP-GFRP) en sustitución de materiales tradicionales como acero u hormigón. Hasta la fecha, estos materiales han sido utilizados de forma intensiva por la industria aeronáutica y aeroespacial, aunque también en menor medida por la industria náutica, la automoción y la industria del deporte. Las excelentes propiedades mecánicas de estos materiales permiten explorar nuevos campos formales en la ingeniería civil, que en otro material serían imposibles o prohibitivos. Además de la alta eficacia<sup>1</sup>, las características que los hacen muy atractivos para aplicaciones civiles son:

- Alta durabilidad, estabilidad térmica y ausencia de corrosión.
- Reducción drástica de los costes de transporte, ensamblaje y ejecución. Con la proliferación de estas tecnologías en Andalucía se facilitará la introducción de mano de obra más especializada y se favorecerá la proliferación de nuevos mercados asociados a estos materiales.

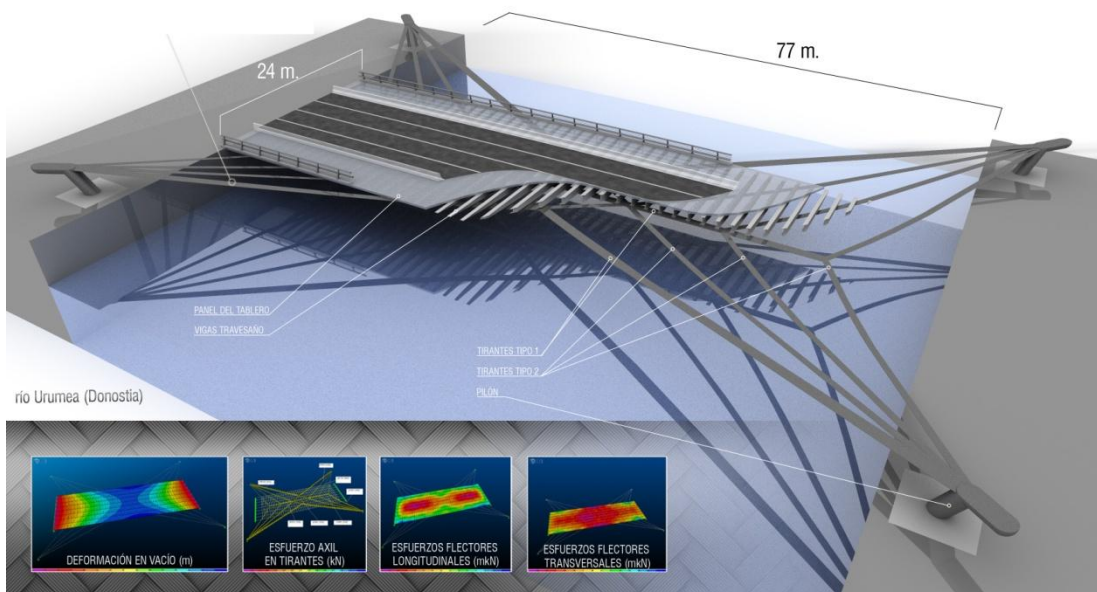


Fig. 2: Modelo diseccionado en el que se muestran los elementos principales de la tipología estructural.

Los resultados obtenidos para la relación resistencia/peso del entorno de 500, nos permiten corroborar que es posible el diseño estructural de puentes usando material compuesto de fibra de carbono, reduciendo drásticamente los costes de transporte de material y puesta en obra, así como los tiempos de ejecución. Además, debido a las características termoquímicas de la resina epoxy así como de las fibras, estos materiales pueden soportar cargas ambientales extremas sin degradación conocida.

<sup>1</sup> Relación entre la capacidad de carga y la cantidad de material necesaria para ello.



*Fig. 3: Modelo a escala reducida en reproducción de la idea inicial de puente montado en túnel de viento.*

### **3.2 Justificación**

Las ventajas procedentes de las elevadas prestaciones de los materiales compuestos están contrarrestadas con el alto precio que actualmente supone el diseño con estos materiales, que heredado de la industria aeronáutica y aeroespacial, está basado prácticamente en experimentación. Además, por la propia incertidumbre de los ensayos experimentales, los coeficientes de seguridad que adoptan habitualmente los estándares de diseño aeronáuticos son aproximadamente de cinco (5); lo que significa que el material trabaja en la situación más desfavorable en torno al 20% de sus capacidades mecánicas.

Las estructuras de ingeniería civil requieren enormes cantidades de material, por tanto para conseguir diseños competitivos con materiales compuestos en ingeniería civil se hace imprescindible:

- Aumentar la eficacia de la estructura mediante la búsqueda de diseños específicos que aprovechen de forma óptima las propiedades nativas de estos materiales.
- Reducir los costes de experimentación para la caracterización y el testeo del material compuesto, mediante el desarrollo de nuevos estándares de diseño basados en técnicas avanzadas de optimización y simulación. Cada una de las técnicas que se pretenden aplicar constituye el estado del arte en su respectivo campo, por lo que no sólo se pretende aplicarlas sino también avanzarlas, aportando nuevos desarrollos teóricos y resultados experimentales que serán difundidos en congresos y revistas de impacto, situándonos en una posición competitiva internacionalmente.



Los modelos numéricos desarrollados en este proyecto de investigación nos han permitido obtener simulaciones de diseños óptimos de puente, esto es, diseños en los que se consigue la máxima eficacia estructural (máxima resistencia y mínima energía de deformación) usando el mínimo material posible. Ello abre las puertas a una metodología de diseño optimizado en el que el coste del material se reduce a lo mínimo estrictamente necesario. Así mismo, la metodología de pronóstico de fatiga, permite obtener predicciones de daño a nivel de laboratorio, lo cual reduce drásticamente el coste de las campañas experimentales que se hacen necesarias cada vez que se plantea el uso de este material para sistemas estructurales.

#### **4. Conclusión**

La metodología de investigación seguida en el presente proyecto ha estado encaminada con el objetivo último de poder demostrar la viabilidad del material compuesto de fibra de carbono como material primario o principal en grandes estructuras de ingeniería civil. Los resultados obtenidos demuestran que, a nivel estático, la mejora estructural que se consigue mediante el uso de composites no tiene precedentes. A nivel dinámico, o sea, en lo concerniente a vibraciones, se ha de remarcar que este tipo de materiales propicia diseños estructurales muy ligeros, y por ende, muy susceptibles de vibraciones. Se ha de indicar que resulta necesaria la evaluación del nivel de vibraciones, sobre todo cuando se trata de pasarelas o estructuras similares, en las que las vibraciones pueden generar incomodidades manifiestas al usuario.

Por otro lado, ha quedado patente la necesidad de considerar la vida útil del material en relación a la fatiga mecánica, como punto clave en el diseño de estructuras con materiales compuestos. Se ha demostrado que un sistema de monitorización mediante sensores unido a un marco de pronóstico estructural adecuado, es la clave para anticipar el daño por degradación por fatiga, y así ser capaces de afinar en la cantidad de material necesaria desde el momento del proyecto.

#### **4. Líneas futuras de investigación**

Tras una primera investigación tecnológica, incluso pudiendo ser suficientemente profunda, quedan indudablemente algunos aspectos técnicos a abordar antes de poder considerarla como una tecnología madura. Sin embargo, proyectos de investigación como el presente sientan las bases y reportan sobre necesidades a considerar para futuras aplicaciones.

En este punto se concluye de forma concisa con una lista de las líneas futuras que son consideradas más viables, no sólo por su cercanía al resultado, sino por el impacto que puedan llegar a tener en la presente investigación.

En particular, se remarcan las siguientes:

- Nuevas formas optimizadas del tablero, que contribuyan a la rigidez del puente, y en particular, a la rigidez torsional.
- Estudio de monitorización estructural integral, usando datos desde diversas fuentes sensoriales, no sólo por ultrasonidos y acelerómetros.
- Sistema de pronóstico en tiempo real a nivel de componente estructural o sistema estructural.

En todos los casos citados, la investigación de partida se ha realizado previamente en este proyecto sin necesidad de validación o confrontar nuevas hipótesis.

