

# INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN EN PUENTES Y TORRES EÓLICAS PREFABRICADAS DE HORMIGÓN PRETENSADO.

Antonio Marí, Jesús M. Bairán, Eva Oller y Noemí Duarte.

Departamento de Ingeniería de la Construcción, ETSECCPB, UPC

[Antonio.mari@upc.edu](mailto:Antonio.mari@upc.edu), [jesus.miguel.bairan@upc.edu](mailto:jesus.miguel.bairan@upc.edu), [eva.oller@upc.edu](mailto:eva.oller@upc.edu), [noemi.duarte@upc.edu](mailto:noemi.duarte@upc.edu)

**Palabras Clave:** Hormigón pretensado, prefabricación, puentes, torres

**Resumen:** *Se presenta la investigación teórica y experimental realizada por los autores durante los últimos años en colaboración con empresas de prefabricación y de aerogeneradores, que ha dado lugar a nuevos tipos estructurales de puentes y torres eólicas de hormigón pretensado, con excelentes prestaciones estructurales, estéticas, resultando además económicamente competitivas. Se muestran algunas obras realizadas a partir de los conceptos desarrollados, destacando entre ellas puentes prefabricados continuos de medias y grandes luces así como la primera torre eólica prefabricada de hormigón totalmente postensada construida en el mundo, con una altura de 120 m y rotores de 60 m de longitud, para un aerogenerador de alta potencia (5 MW).*

## 1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de hormigones de altas prestaciones, el uso del postensado como sistema de conexión entre piezas prefabricadas, la posibilidad de transportar y manipular grandes masas, la capacidad para realizar ensayos precisos a gran escala y el desarrollo de modelos rigurosos de cálculo, han permitido desarrollar nuevos tipos de estructuras prefabricadas de hormigón pretensado con grandes prestaciones estructurales y estéticas, competitivas económicamente.

## 2. PUENTES PREFABRICADOS CON CONTINUIDAD ESTRUCTURAL

En el ámbito de los puentes, los autores han colaborado con Structural Research SL, en el desarrollo de nuevos tipos de puentes prefabricados que aúnan las ventajas de la prefabricación con las de los puentes construidos “in situ”. Por una parte, la prefabricación permite trabajar con hormigones de altas prestaciones, reducir espesores, homogeneizar la calidad, mejorar los acabados, reducir la afectación al tráfico durante la ejecución, aumentar la velocidad de construcción y reducir los riesgos laborales. Sin embargo sus puntos débiles son el transporte, la manipulación y, sobre todo la solución de uniones entre elementos y los apoyos, que ha dado lugar a estructuras casi exclusivamente isostáticas.

En los casos que se presentan, se ha resuelto adecuadamente la unión de elementos prefabricados mediante postensado, dando lugar a estructuras continuas en sentido longitudinal, con las consiguientes ventajas estructurales en cuanto a rigidez y redundancia. Así mismo se logran tableros de gran anchura uniendo transversalmente las almas de vigas adosadas o tableros de gran canto, adecuados para cubrir grandes luces, conectando verticalmente las almas de piezas a través de juntas longitudinales. Se prefabrican así mismo elementos de canto variable, de planta recta o curva, con jабalcones longitudinales o transversales y puentes de tipos diversos, tales como tableros en viga continua, arcos, puentes pórtico o atirantados. Se trata, por tanto, de soluciones que estéticamente y estructuralmente son

totalmente comparables a las construidas in situ, con todas las ventajas de la prefabricación, tal como se indica en la figura 1 que corresponde a puentes construidos con este sistema en cuyo análisis estructural han participado algunos autores de esta ponencia.



Figura 1. Puentes prefabricados continuos de hormigón postensado de medias y grandes luces

En el Departamento de Ingeniería de la Construcción se han desarrollado modelos de análisis estructural no lineal en el tiempo capaces de simular las fases constructivas y el comportamiento no lineal instantáneo y diferido de los materiales. Estos modelos, basados en el MEF utilizan elementos unidimensionales con la sección transversal idealizada mediante fibras, sometidas a un estado uniaxial de tensiones, incorporando ecuaciones constitutivas no lineales de los materiales. La estructuración en etapas constructivas, pasos de tiempo, escalones de carga e iteraciones de equilibrio permiten tener en cuenta el carácter marcadamente evolutivo de la construcción, así como evaluar la seguridad y la respuesta en servicio de estas estructuras a corto y a largo plazo.

El comportamiento de pilas de gran altura, en las que los efectos de segundo orden pueden ser importantes, se reproduce adecuadamente gracias a la consideración en el cálculo de la no linealidad geométrica mediante una formulación Lagrangiana actualizada. Uno de los aspectos más relevantes del modelo es que permite tener en cuenta la interacción entre el comportamiento no lineal de los materiales, los efectos de segundo orden, el comportamiento diferido y el proceso constructivo evolutivo, tal como ocurre en la realidad a lo largo de la vida útil de las estructuras. Fenómenos como la fisuración diferida o las redistribuciones de esfuerzos en el tiempo en estructuras construidas evolutivamente pueden ser simulados así como sus efectos en la rigidez y la resistencia.

Recientemente se han incorporado, así mismo, los efectos del deterioro por la acción ambiental sobre la respuesta estructural, por ejemplo los efectos estructurales de la reducción del área de acero de las armaduras por corrosión, la pérdida de recubrimiento o la rotura súbita de algún alambre de pretensado debido a la corrosión bajo tensión. Igualmente se han incorporado en el modelo, de forma natural y como un paso más en su carácter evolutivo, los efectos de cualquier intervención, tanto para adecuar la geometría, el esquema estructural o los apoyos a nuevas condiciones viales o de tráfico, como para repararlo o reforzarlo.

También se han llevado a cabo ensayos a gran escala en el Laboratorio de Tecnología de Estructuras, para verificar experimentalmente los modelos teóricos e identificar algunos aspectos del comportamiento estructural no abordados por aquéllos.

### 3. TORRES EOLICAS PREFABRICADAS POSTENSADAS DE GRAN ALTURA.

En el ámbito de las torres eólicas, se ha colaborado con Gamesa y NORTEN Eólica en el desarrollo de un tipo de torre prefabricada híbrida de hormigón postensado y metálica, para aerogeneradores de medias y altas potencias, que requieren torres de gran altura y diámetro en la base, las cuales, no pudiendo ser transportadas enteras por carretera deben ser fabricadas en segmentos y ensambladas en obra. Los elementos prefabricados, resultantes de dividir un tronco de cono mediante cortes verticales y horizontales, están compuestos por una lámina delgada de hormigón armado, nervada en dos direcciones. Los nervios sirven para, además de rigidizar la lámina, albergar los tendones de postensado que permiten mediante compresión de las juntas, unir monólicamente las piezas. El espesor medio resultante es de 19 cm, lo cual conduce a un reducido consumo de materiales y de peso, facilitando el transporte y montaje.

El número de nervios verticales puede cambiar en función de las dimensiones de la torre, especialmente del diámetro máximo en la base, y se plantea constante en toda la altura de la torre. En una primera opción se han planteado 12 nervios verticales, lo que permite fabricar “tejas” dividiendo el anillo nervado en 2, 3, 4 ó 6 partes, cubriendo ángulos de 180°, 120°, 90° o 60°, respectivamente. El montaje se realiza evitando dar continuidad a la junta vertical a lo largo de toda la torre, pero manteniendo la continuidad en los nervios verticales. El número de nervios horizontales depende de las necesidades de arriostramiento de la lámina y de pretensado horizontal de la junta vertical

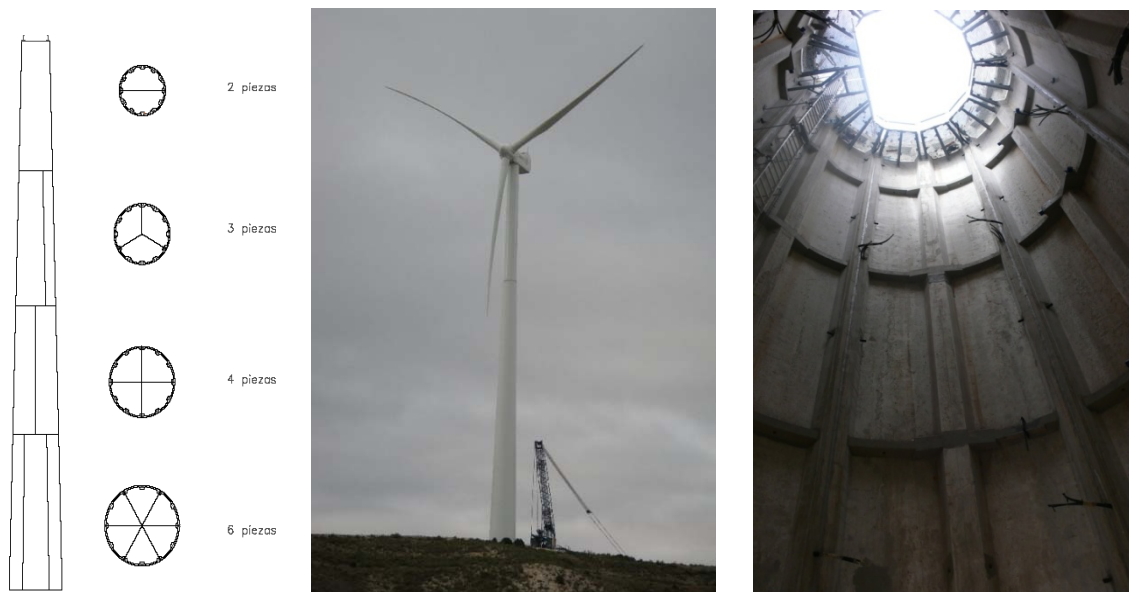


Figura 2. Torre eólica prefabricada de hormigón postensado, de 120 m de altura y 4,5 MW

Se han resuelto multitud de aspectos teóricos y prácticos, tales como el comportamiento a fatiga, la conexión a la cimentación, la conexión entre el fuste de hormigón y el metálico, el comportamiento de las juntas entre elementos, los efectos de la posible fisuración en el comportamiento dinámico, las deformaciones instantáneas y diferidas durante acopio, transporte y montaje y otros.

Se han diseñado, construido, instrumentado y validado experimentalmente tres prototipos de torre de 120 m de altura con diámetro de 8,50 m en la base, para un aerogenerador de 4,5 MW, que son las primeras torres prefabricadas totalmente postensadas construidas.

Así mismo se han realizado ensayos tanto para caracterizar los materiales y del rozamiento entre vaina y tendones como del comportamiento de las juntas verticales dentadas,

confinadas y rellenas de mortero de alta resistencia (figura 3). Se han realizado dos series de 6 ensayos, cada una con diferente resistencia del mortero, bajo tensiones transversales nominales de 0,25 MPa, 0,50 MPa and 0,75 MPa. Se midieron, la carga aplicada, la abertura de la junta, el deslizamiento vertical y la evolución de la fuerza transversal. Los resultados del ensayo permitieron obtener valores del coeficiente de rozamiento y de la cohesión, detectándose la influencia de la resistencia del mortero en el incremento de tracción de las barras de pretensado, y por tanto en la movilización del mecanismo cortante-fricción. Se midieron aperturas de junta despreciables en servicio y de 0,6 mm en rotura, y se verificó la capacidad resistente de la junta a los esfuerzos rasantes de cálculo.

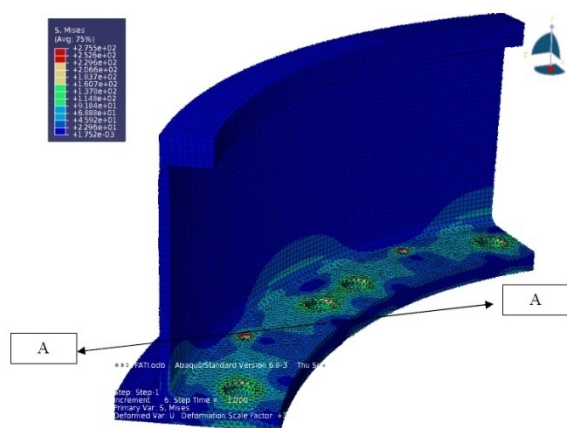


Figura 3. Estudio por EF de la brida conexión

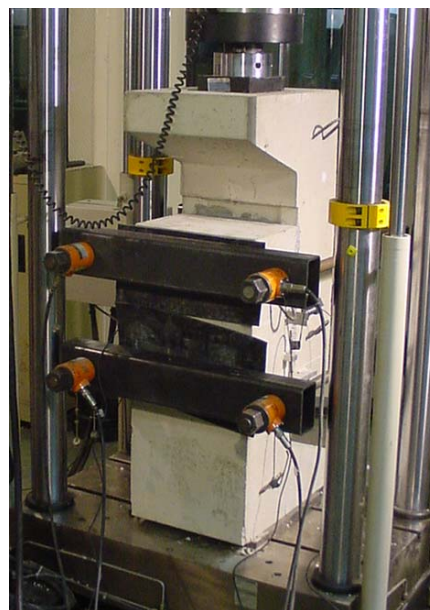


Figura 4. Ensayo a cortante de la junta

La torre y su cimentación se monitorizaron siguiendo un proyecto de instrumentación diseñado por los autores para determinar aceleraciones, desplazamientos, deformaciones en el hormigón y el acero, rotaciones de la cimentación y movimientos relativos en juntas, entre otros parámetros. En este momento se está realizando la validación de la torre por comparación de los resultados teóricos y los medidos con la instrumentación dispuesta.

## REFERENCIAS

- [1] Marí, A., "Numerical Simulation of the Segmental Construction of Three Dimensional Concrete Frames", Engineering Structures, No. 6 , Vol. 22, pp 585-596, June 2000.
- [2] Montaner, J., Marí, A., Bairán, J., "Remando al viento. Torre SCS para generadores eólicos". V Congreso Internacional de Estructuras, ACHE, Barcelona, Octubre 25-27, 2011.