

Estudio comparativo de los puentes de la Expo 2008 de Zaragoza

Aurora Lezáun Alcalá, José Manuel Franco Gimeno, Javier Abad Blasco y Luis Lezáun Martínez de Ubago

Comparative study of bridges in the Zaragoza Expo 2008

RESUMEN

Con motivo de la Exposición Internacional de Zaragoza celebrada durante el verano de 2008, se construyeron el puente del Tercer Milenio, el pabellón Puente y la pasarela del Voluntariado, tres obras singulares que han convertido a Zaragoza en un referente en este tipo de construcciones. Los tres poseen una misma tipología estructural en común: el arco. En el caso del puente del Tercer Milenio, realizado en hormigón armado y pretensado, es más evidente su funcionamiento como arco atirantado por el tablero (*bowstring*). En el caso de los otros dos se descubre esta tipología al estudiar su comportamiento estructural. Cabe resaltar que solo el peso del arco del puente del Tercer Milenio es comparable al del pabellón Puente y, a su vez, este tiene un peso 10 veces superior a la pasarela del Voluntariado.

Un análisis de la transmisión de esfuerzos de cada una de estas estructuras de puentes, no sólo una vez terminadas, sino también durante el proceso de su construcción, lleva a realizar una comparación de estas tres obras, atendiendo a diversos aspectos como métodos de construcción, aspectos singulares y usos posteriores.

Recibido: 14 de septiembre de 2010

Aceptado: 14 de marzo de 2011

ABSTRACT

The International Exposition of Zaragoza held during the summer of 2008, saw the construction of the Third Millennium Bridge, the Bridge Pavilion and the Volunteer Gateway. Three unique projects that have made Zaragoza a point of reference in such constructions. All three have the same type of structure in common: the arch. In the case of the Third Millennium Bridge, made of pre-stressed reinforced concrete, its function as a bowstring arch is clear. In the case of the other two this typology is discovered on studying their study their structural behaviour. It should be stressed that only the weight of the arch of the Third Millennium Bridge is comparable to the Bridge Pavilion which, in turn, has a weight ten times higher than the Volunteer Gateway.

An analysis of the transfer of forces from each of these bridge structures, not just once completed, but also during the construction process, leads to a comparison of these three works, in terms of various aspects such as construction methods, unique aspects and future use.

Received: September 14, 2010

Accepted: March 14, 2011

Palabras clave

Puentes, Zaragoza, Expo 2008, construcción, estructuras, arcos

Keywords

Bridges, Zaragoza, Expo 2008, construction, structures, arches



Foto: Pictelia

Puente del Tercer Milenio

El fin de un puente es materializar un medio adecuado para el paso del hombre, es una estructura que salva un obstáculo, en el caso que nos ocupa un río, el Ebro.

El puente del Tercer Milenio permite cerrar el tercer cinturón de circunvalación de Zaragoza. El proyecto de este puente estaba terminado ya en 1991, pero su construcción definitiva, con sus correspondientes modificaciones de diseño y lugar, se terminó justo para la Expo 2008 de Zaragoza, que se desarrolló en el meandro de Ranillas sirviendo durante la Exposición para la llegada rápida al lugar de personalidades a la misma.

Esta obra es fruto de una sostenida investigación sobre el arco como tipo estructural idóneo para construir puentes. El autor del proyecto, Juan José Arenas, ya había trabajado con este tipo de puentes y consideró este un reto para mejorar la estructura e innovar utilizando distintos materiales.

Se trata de un puente de hormigón armado, pretensado y atirantado por el tablero (*bowstring*). El vano es de 216 metros, sin apoyos en el río, y 43 metros de anchura. El gran arco único central cubre una luz de 144 metros entre ejes de nudos.

El capitel resulta necesario para poder recoger todos los esfuerzos que bajan por el pie inclinado y su forma piramidal canaliza las componentes verticales de esa fuerza hasta el aparato de apoyo bajo él situado. La laja, además de poseer una evidente función estructural, también aporta calidad estética en la planta del puente (figura 1).

En la figura 2 puede observarse gráficamente el flujo de cargas a lo largo del puente.

La carga del tablero (flechas amarillas) hace que las dos líneas de cables exteriores o péndolas de suspensión se estiren al máximo. Esta tracción de los cables sujetan el tablero y tira del arco (flechas naranjas), lo que a su vez, produce una compresión en el arco que transmite su carga hacia los apoyos (flechas azules). Esta compresión se bifurca al llegar al vértice de la A (punto de transición), orientándose hacia las lajas de apoyo. Esto genera una tracción en sentido transversal que hay que contrarrestar para que las patas de la A no se abran. Esa es la función de la traviesa (o puntal) de la A, que se tracciona (flechas verdes). Finalmente, al llegar a la laja de amarre, el flujo de compresiones se descompone en: una tracción longitudinal sobre las vigas de borde del tablero que se compensa con

el postensado (flechas violetas), logrando que las vigas de borde del tablero atiendan el arco, y una compresión vertical que se transmite a las pilas de apoyo a través de los cuatro capiteles octogonales. La cimentación soporta la carga de toda la estructura (flechas rojas).

Explicar paso a paso toda la transmisión de fuerzas sería muy extenso y, por dicho motivo, nos vamos a limitar a seguir el camino, únicamente, de las fuerzas que transmiten las cuatro patas al tablero, como consecuencia del propio peso del arco.

En la figura 3 se representan en perspectiva las acciones del tablero sobre las patas y en la 4 las reacciones, es decir, las fuerzas transmitidas al tablero con una inclinación que puede visualizarse en el esquema de la figura 5. Continuando con la descomposición de estas fuerzas se podrá entender mejor la tipología del puente de arco atirantado por el tablero.

La fuerza F , que supondremos de 2.250 toneladas de módulo, se proyecta sobre el tablero en dos componentes, una horizontal, Z_1 , y otro vertical que transmite a los apoyos junto con el peso del tablero y las sobrecargas de uso.

Z_1 (figura 6) es la fuerza que la laja de amarre pretensada transmite hasta el eje del nervio de borde.

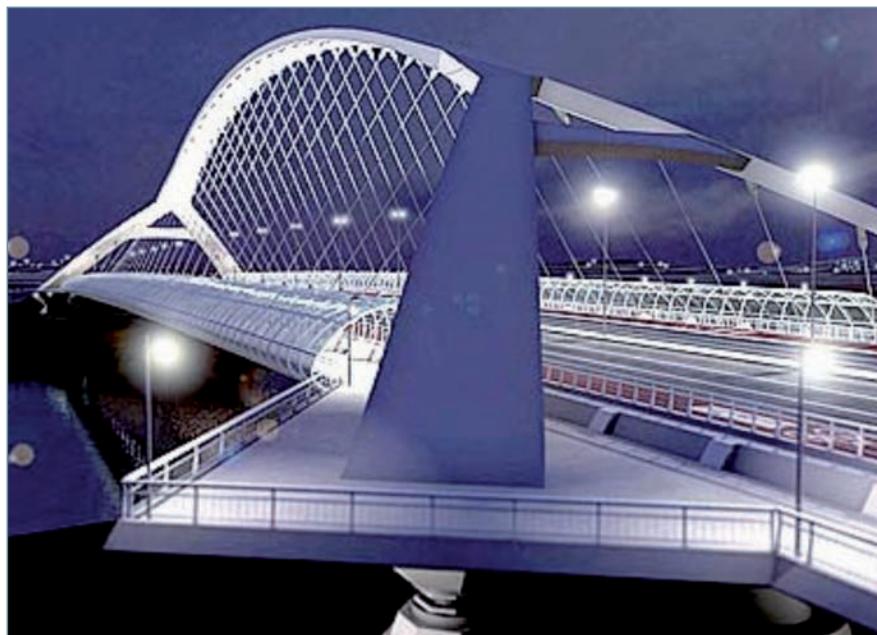


Figura 1. Laja de amarre, apoyada sobre capitel octogonal y que da origen al pie inclinado.

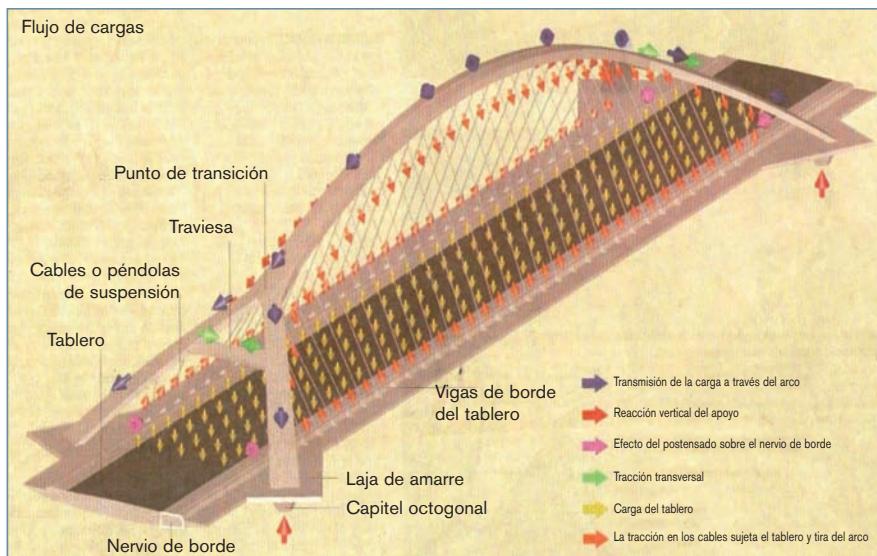


Figura 2. Esquema de fuerzas actuantes sobre el puente.

Figura 3. Arco.



$$Z1 = F \cdot \cos \theta = 2.250 \cdot \cos 33'4^\circ = 1.878'4 \text{ toneladas}$$

Como las lajas de amarre también tienen armaduras activas (pretensadas) en la dirección Z1 el valor obtenido se reduce.

La componente Z1 se descompone en Z2 y Z3 (figura 7).

$$\alpha = 30'26^\circ$$

$$Z2 = F \cdot \cos \alpha = 2.250 \cdot 0'86 = 1.935 \text{ toneladas}$$

$$Z3 = F \cdot \sin \alpha = 2.250 \cdot 0'50 = 1.125 \text{ toneladas}$$

Z2 es una fuerza que tracciona el tablero y que debe de ser absorbida por los nervios de borde. Como los nervios de borde tienen armaduras activas este esfuerzo de tracción se ve disminuido.

Z3 es la fuerza de tracción transversal que deberá ser absorbida por los puntales (o riostras) y por las armaduras activas de los diafragmas transversales próximos a las lajas que disponen de un pretensado más importante que el resto de diafragmas.

Los diafragmas de la parte central no necesitan casi armaduras activas porque están sometidas también a la compresión de las péndolas. Las primeras péndolas son más verticales, es decir, tienen menos inclinación y por eso no transmiten casi compresión.

Las fuerzas internas Z2 son las que hacen trabajar al tablero como gran tirante entre los arranques del arco. De ese modo, el diseño del puente del Tercer Milenio sigue la pauta de la tipología *bowstring*.

El conjunto de todas las fuerzas anteriores puede verse en planta en la figura 8.

Z1: componente horizontal del empuje transmitido por el pie inclinado.

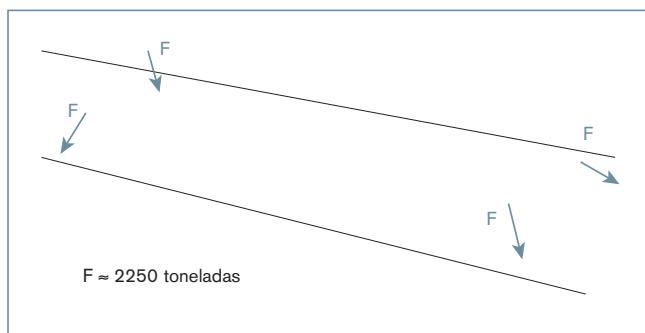


Figura 4. Tablero.

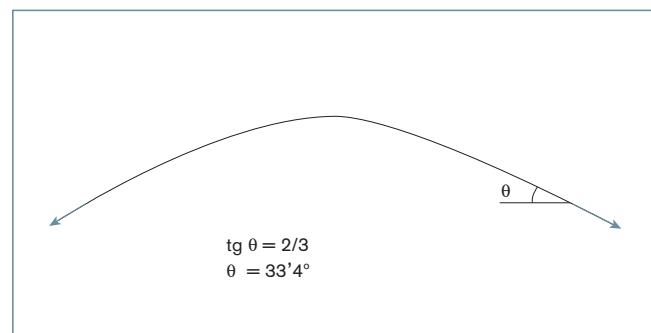


Figura 5. Alzado del arco.

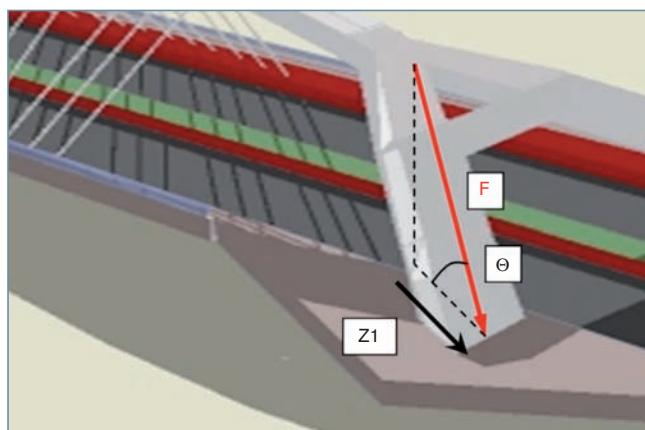


Figura 6. Detalle de la laja.

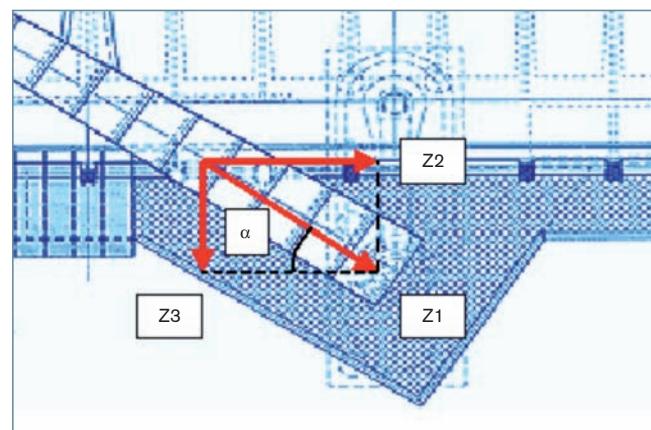


Figura 7. Descomposición de fuerzas.

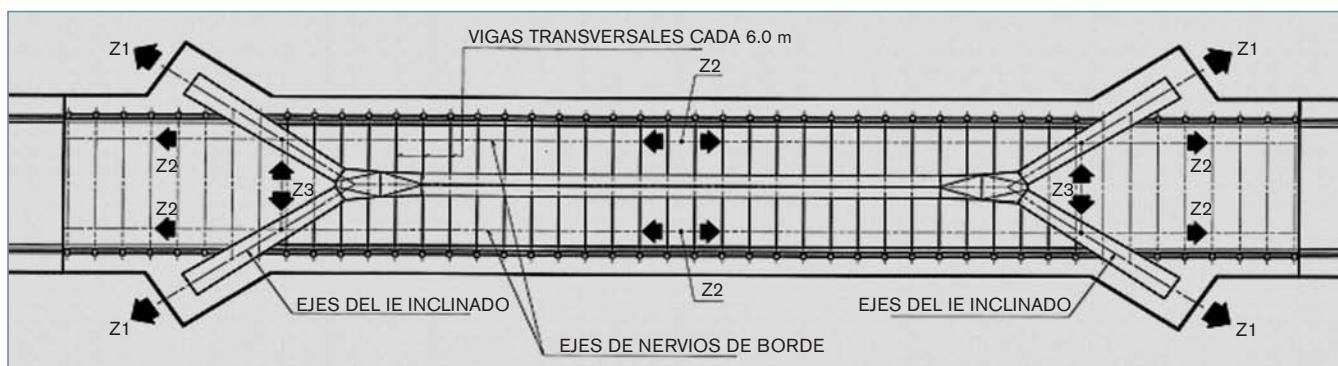


Figura 8. Vista en planta.

Z2: tracción resistida por los nervios de borde.

Z3: tracción resistida por los nervios transversales próximos a la pila.

El pabellón Puente

El pabellón Puente (figura 9) se encuentra situado a escasos 800 metros de la estación de Delicias, a unos 300 metros aguas abajo del puente del Tercer Milenio.

Parece ser que su autora, Zaha Hadid, se inspiró para diseñarlo en su proyecto de fin de carrera para concluir sus estudios de arquitectura en Londres. En esas fechas, mediados de la década de 1970, esta obra no habría podido materializarse

pues hay que resaltar que han sido los métodos numéricos de cálculo y el avance en las técnicas de diseño 3D los que han facilitado su realización práctica.

La obra, de 280 metros de longitud, descansa sobre una cimentación profunda en ambas riberas y sobre una pequeña isleta natural en el centro del cauce, también de cimentación profunda. De esta forma se tiene un puente de dos vanos, uno de 155 metros en la vertiente derecha y otro de 125 en la izquierda.

Se trata de un puente de estructura metálica, cuyos elementos estructurales adoptan la forma geométrica curva que se observa desde el exterior. En planta el ancho del puente varía desde 13 metros

en el lado de la Almozara hasta 30 metros en el lado de Ranillas.

El puente está sectorizado en varios cuerpos, denominados *pods* (figura 10) y dividido a su vez en dos plantas. Estos *pods* se organizan de la siguiente forma:

– *Pod 4:* en el extremo del barrio de la Almozara hay un único tablero que constituyó uno de los accesos peatonales a la Expo 2008. Su función es principalmente de recorrido o paso. Al llegar al pequeño islote este tablero se divide en otros tres.

– *Pod 2:* corresponde al tablero central del puente, que continúa el recorrido peatonal hasta llegar al extremo de Ranillas en la margen izquierda.



Figura 9. Perspectiva del pabellón Puente.

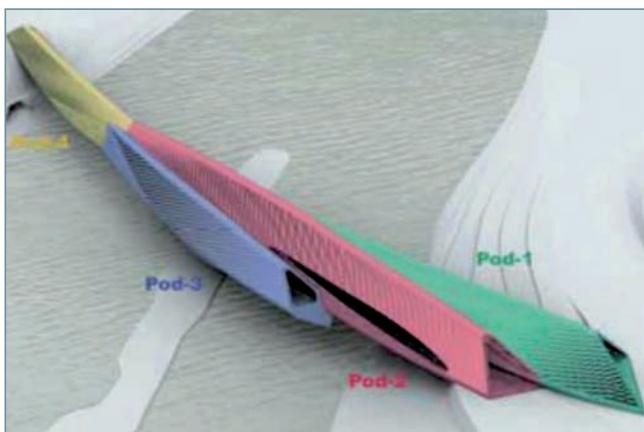


Figura 10. Sistema de pods.



Figura 11. Tipologías básicas.

– *Pod 1*: situado entre el islote central y la margen izquierda al oeste del *pod 2*. Tiene acceso desde esta margen a través de una puerta acristalada. Su contenido será fundamentalmente expositivo. Está formado por dos niveles con rampas que lo comunican. El nivel superior, también de contenido expositivo, continúa por encima del *pod 2* y parte del *pod 3*.

– *Pod 3*: situado al este del *pod 2*, arranca del islote central pero no llega a la margen izquierda. Permite también la colocación de contenido expositivo y tiene vistas hacia el templo del Pilar. Está formado por un único nivel, coincidente con el tablero inferior del puente.

La solución estructural se resuelve mediante una celosía espacial metálica, combinando una serie de tipologías básicas que proporcionan un comportamiento global híbrido.

Los elementos principales se resumen en la figura 11.

El tablero ortótropo de acero recoge las cargas verticales y actúa como tirante para las componentes horizontales de las partes inclinadas del cordón superior.

La variante estructural del profesor Hugo Corres fue la clave para sacar adelante una estructura tan compleja. Consistía fundamentalmente en sustituir la celosía inferior por una gran viga de canto variable. De esta forma, el *pod 4* pudo ser lanzado desde la margen derecha con garantías de control de los estados resistentes de todos los elementos.

Este proceso de lanzamiento fue una de las operaciones más críticas de su construcción. Para saber más al respecto puede consultarse Lezáun Alcalá.

Es de destacar también la utilización de la célula Osterberg, por primera vez en España. Con los resultados obtenidos de la misma se pudo disminuir la longitud estimada de algunos pilotes de cimentación de 72 a 50 m (Lezáun Alcalá).

Está previsto que en el último cuatrimestre de 2012 el pabellón Puente, además de su uso peatonal, albergue un museo de tecnología en 3D vivo e interactivo.

Pasarela del Voluntariado

Se trata de una pasarela peatonal que conecta los barrios zaragozanos de La Almozara y el Actur a la altura de la calle

de Clara Campoamor, aguas abajo de los otros dos puentes citados.

La pasarela ha sido diseñada por el ingeniero de caminos navarro Javier Manterola, que ya había participado anteriormente en diversas obras en Zaragoza relacionadas con la remodelación de puentes, como el de la Almozara y el del Pilar (más comúnmente conocido como puente de Hierro).

El mástil inclinado de la pasarela del Voluntariado (figura 12), de 90 metros de longitud, sobresale por encima de las casas como un reclamo para los paseantes. Desde el eje del río, el mástil emerge vertical, con 78 metros de altura, alineado con el Pilar y la Torre del Agua.

Desde el mástil 46 cables atirantan el tablero metálico de traza curva que tiene una longitud desarrollada de 235 metros.

El tablero cuelga de la torre por un solo borde, en este caso el exterior. A continuación, se explica, de una forma muy simplificada y sin tener en cuenta todas las variables del problema, por qué la pasarela tiene esta forma curva y a qué se debe su ángulo de inclinación.



Figura 12. Pasarela del Voluntariado.

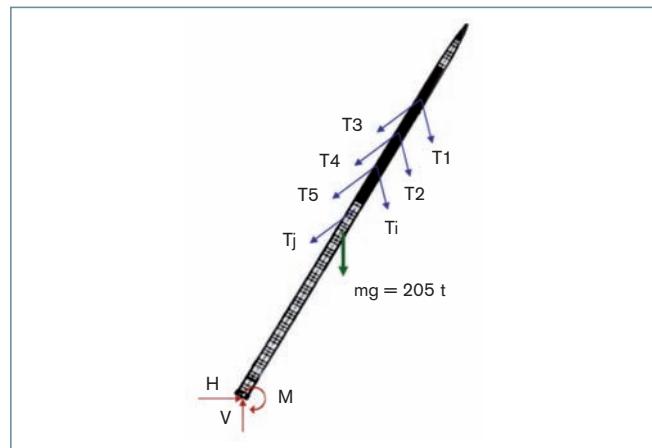


Figura 14. Diagrama de sólido libre del mástil.

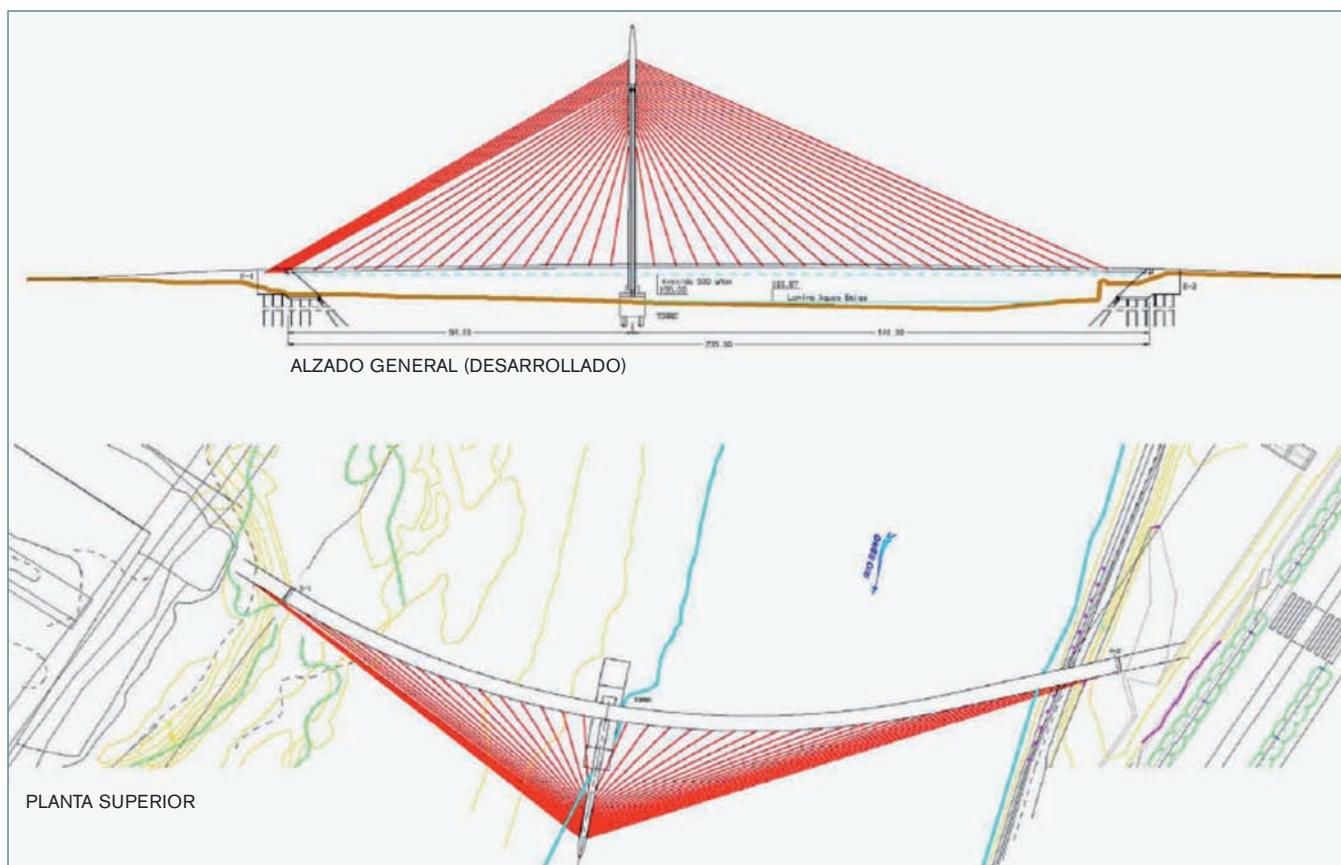


Figura 13. Alzado y planta de la pasarela.

En la figura 13 aparece el alzado y la planta de la pasarela que ayudan a visualizar y comprender el reparto de fuerzas.

En la figura 14 se indica el diagrama de sólido libre del mástil.

La geometría de los cables (ángulos que forman cada uno en el espacio con los tres ejes coordenados) y el valor de la tensión aplicada a cada uno son tales que al plantear las ecuaciones de equilibrio de la estática la resultante de las acciones (la tensión en los 46 cables más el peso del mástil) lleva la dirección del eje del mástil (figura 15).

Para comprender mejor lo afirmado anteriormente y considerando, para simplificar, una situación plana, esto se traduce en:

$$V_T = m \cdot g + \sum_{i=1}^n T_i \cdot \cos \alpha_i$$

$$H_T = \sum_{i=1}^n T_i \cdot \sin \alpha_i$$

$$T_k = \sqrt{V_T^2 + H_T^2}$$

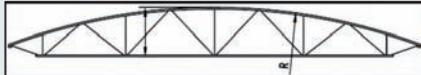
$$\operatorname{tg} \theta = \frac{V_T}{H_T}$$

Se obtendría aproximadamente $\theta = 30^\circ$

Con lo anterior se consigue, en teoría, que el mástil trabaje únicamente a compresión y no a flexión, por lo que el momento fletor es nulo.

En la figura 16 se presenta una sección cualquiera de la pasarela y el cable que tira de ella con una cierta inclinación.

En la figura 17 se observa la planta de la pasarela y las proyecciones horizontales de las tensiones de todos los cables. Además, se ha dibujado, esquemáticamente, la terminación de la pasarela y sus amarres a los estribos. Estos amarres, en

	Puente del Tercer Milenio	Pabellón Puente	Pasarela del Voluntariado
Tipología	Puente de arco atirantado	Puente mixto. Arco atirantado y celosía espacial. Edificio horizontal	Puente atirantado
Las tres estructuras poseen una tipología estructural común: la de arco. En el caso de del pabellón Puente y el puente del Tercer Milenio se trataría de <i>bowstring</i> (arco atirantado por el tablero). En el caso del puente del Tercer Milenio es muy evidente, pero en el pabellón Puente nos encontramos con una estructura compuesta por varios pods, que a su vez, se comportan como arcos atirantados unidos al tablero mediante celosía tridimensional. La pasarela, como ya se ha explicado antes, se comporta como un arco biarticulado, pero en el plano horizontal			
			
Luz (distancia entre apoyos)	Un solo vano de 216 m	Dos vanos, uno de 155 m y otro de 125 m	Dos vanos, uno de 94 m y otro de 141 m
Longitud del tablero	270 m	280 m	235 m
Anchura del tablero	43 m (48 m entre ejes de pies inclinados)	13 m lado Almozara - 30 m lado Ranillas	4,5 metros
Pendiente	2,70% en los arranques y 1,35% de media	≈ 0%	1,1% de media
Pesos	Incluyendo tablero, arco y péndolas tiene un peso aproximado de 30.000 toneladas. Es de destacar que sólo el arco con sus péndolas tiene un peso comparable al del pabellón Puente, lo que, a su vez, supone unas 14 veces más que el tablero de la pasarela del Voluntariado	El peso total de la estructura, incluyendo los acabados, está próximo a las 7.000 toneladas	El elemento más pesado de esta estructura es su tablero, de unas 500 toneladas, aproximadamente. A esto hay que añadir el peso del mástil y los cables, unas 207 toneladas
Material	Hormigón blanco autocompactable de alta resistencia y acero	Fundamentalmente acero, además de aluminio y hormigón reforzado con fibra de vidrio (GRC).	Fundamentalmente acero
Penínsulas de tierra provisionales	Además de los 60.000 m ³ de grava, es importante destacar las pilonas de hormigón ancladas de forma provisional al cauce y que hubo que retirar cortándolas con hilo de diamante	Fue necesario hacer una península grande en la margen izquierda para llegar hasta la isla natural en medio del cauce. Esta gran península sirvió, además de para ejecutar la cimentación del lado de Ranillas y de la isla natural, para construir in situ los pods 1, 2 y 3. Además, se construyó una pequeña península para ejecutar la cimentación del lado de la Almozara. En total se depositaron 40.000 m ³ de gravas	La península creada para colocar el tablero, que se desplazaba de orilla, según se colocaba éste, supuso un acopio de tierra de 60.000 m ³ de gravas. Se construyeron penínsulas en las dos márgenes del río
Tipo de cimentación	Cimentación profunda con pilotes de gran diámetro, llegando a unos 45 m	Cimentación profunda con pilotes de gran diámetro. Utilización, por primera vez en España, de la célula Osterberg	Micropilotes con una profundidad máxima de 30 m
Pilotes provisionales	Se tuvieron que instalar grandes pilotes en el cauce para soportar las dovelas que se iban empujando para formar el tablero	No se colocaron pilas provisionales en el cauce del río ya que los pods se construyeron in situ sobre una península artificial (pods 1, 2 y 3) o bien en tierra firme (pod 4) y luego lanzándolo sobre el río	Se colocaron ocho apoyos provisionales sobre el cauce del río para recibir in situ los tramos del tablero que se descargaban del camión de transporte sobre las penínsulas provisionales, primero en la margen izquierda y luego en la derecha
Construcción del tablero	Se fabricó en la margen derecha, en el parque de dovelas, y luego éstas fueron empujadas sobre apoyos provisionales hasta alcanzar su posición sobre el río	Parte del mismo se construyó in situ en la margen izquierda, la correspondiente a los pods 1, 2 y 3. El resto se montó en la margen derecha y luego se lanzó sobre el río (pod 4)	Se fabricó en taller y se transportó en trozos más manejables en camiones. Los distintos tramos se colocaron por medio de grúas sobre los apeos provisionales y se soldaron in situ
Utilización de gatos	Se han utilizado tanto en el empuje de las dovelas como en la apertura en clave del arco	Se han utilizado en la fase de lanzamiento del pod 2 tanto para su traslación como para el tiro desde la torre metálica. Además, también se utilizaron dentro de la célula Osterberg	No se han utilizado
Consideraciones dinámicas	No se instalaron amortiguadores ya que el hormigón absorbe bien las vibraciones	Se dejaron huecos para colocar amortiguadores de masas sintonizadas por si fueran necesarios	Se colocó un amortiguador viscoso para limitar la amplitud de las oscilaciones
Métodos de cálculo numérico	Se han utilizado	Se han utilizado más exhaustivamente	Se han utilizado
Creadores de la obra	Juan José Arenas	Zaha Hadid	Javier Manterola

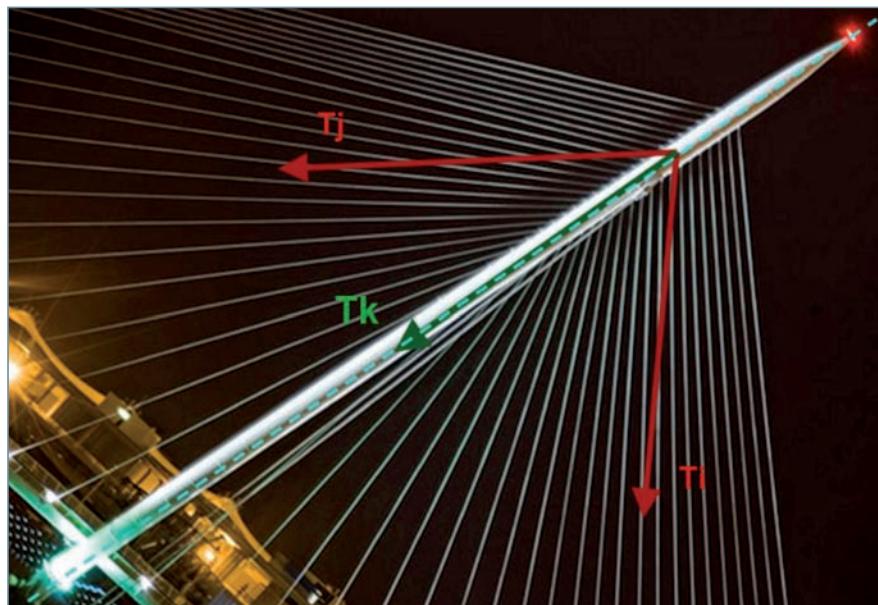


Figura 15. Fuerzas resultantes de la tensión de los cables.

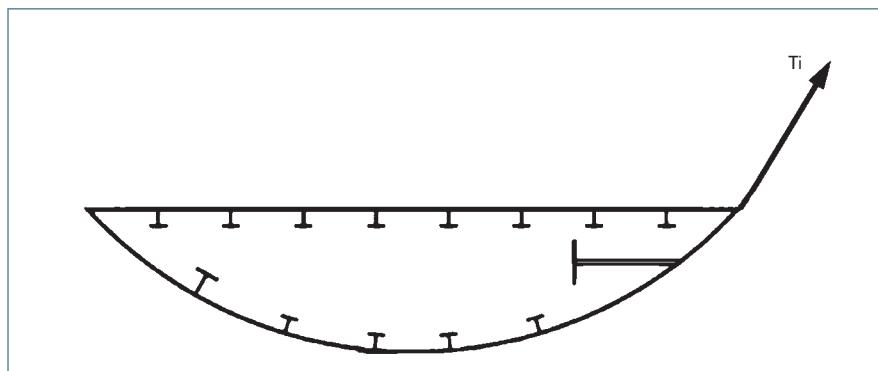


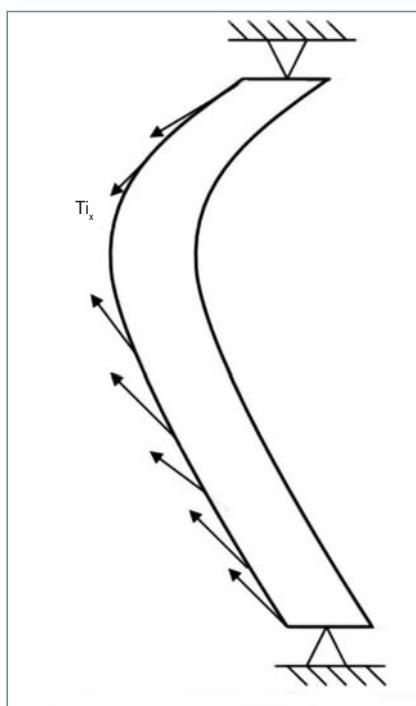
Figura 16. Sección de la pasarela

el plano horizontal, se comportan como rótulas.

El giro respecto al eje vertical queda libre gracias a esas rótulas, que son necesarias porque la curva en planta del dintel es traccionada por el conjunto de tirantes actuando como cargas exteriores. De esta forma el comportamiento estructural es como el de un arco biaxialmente articulado.

A su vez, la tensión (proyección horizontal) de los tirantes produce en el arco una flexión horizontal que minimiza la torsión del tablero producida por el tiro de los cables, para conseguir este fenómeno, era necesaria la planta curva del dintel. El giro torsional de cualquier sección produce, por la curvatura en planta del dintel, desplazamientos verticales en el conjunto de tirantes, y estos lo contrarrestan incrementando su tensión y, por tanto, la flexión lateral. Por eso, es necesario disponer almas horizontales en el dintel para rigidizarlo más.

Figura 17. Planta de la pasarela.



Bibliografía

- Aguiló M (2008). Puentes para una exposición. Zaragoza 2008. Abada, Madrid. ISBN 978-84-96795-32-9.
- Arenas de Pablo JJ (2002). Caminos en el aire. Los Puentes. Colegio de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos, Madrid. ISBN 84-380-0224-2.
- Burbano Juana G, Juárez Millán F (2007). Cimentación con pilotes de gran diámetro y gran longitud en los puentes del Tercer Milenio y del Pabellón Puente de la Expo 2008 de Zaragoza. Ensayo de carga estática de 4000 t sobre un pilote mediante célula Osterberg. Ingeniería Civil 147:5-25.
- Lezáun Alcalá A (2009). Proyecto de fin de carrera presentado en la Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Industrial de la Universidad de Zaragoza.
- Merino Agüeros C, Rueda Merino FJ (2007). Grandes avances en la ingeniería hacen un sueño realidad. *Ingeniería y Territorio* 77:74-81.

Aurora Lezáun Alcalá
Ingeniera técnica industrial, especialidad mecánica, por la Universidad de Zaragoza.

José Manuel Franco Gimeno
jfranco@unizar.es
Ingeniero técnico industrial e ingeniero industrial. Profesor titular de la Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Industrial de la Universidad de Zaragoza.

Javier Abad Blasco
javabad@unizar.es
Ingeniero técnico industrial y doctor ingeniero industrial. Profesor titular de la Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Industrial de la Universidad de Zaragoza.

Luis Lezáun Martínez de Ubago
llezaun@unizar.es
Doctor ingeniero industrial. Catedrático de la Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Industrial de la Universidad de Zaragoza.