

Los arcos más grandes del mundo



Santiago Pérez-Fadón
Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.
Director técnico de Ferrovial



Juan José Sánchez Ramírez
Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.
Jefe del departamento de Puentes en la
Dirección Técnica de Ferrovial

Resumen

En los últimos años se han construido en Asia un elevado número de puentes de gran luz, de todas las tipologías. Particularmente en China se han ejecutado una gran cantidad de arcos. Allí están ahora los arcos más grandes del mundo. En este artículo vamos a intentar hacer más conocidas esas lejanas obras orientales.

Palabras clave

Arco, China, gran luz, CFST

Abstract

In recent years, an extensive number of long span bridges with different typologies have been built in Asia. China, in particular, has constructed a great number of arch bridges. The world's largest arch bridges are there now. In this article we will attempt to make better recognized these far eastern infrastructures.

Keywords

Arch, China, long span, CFST

1. Realizaciones en función de la luz

En este apartado vamos a hacer una breve descripción de los siete puentes arcos más grandes del mundo, cinco de los cuales se encuentran en China.

1.1. Puente arco de Chaotianmen

Chaotianmen es un puente de carretera y ferrocarril sobre el río Yangtze, en la populosa ciudad de Chongqing (China). Abierto al tráfico el 29 de abril de 2009, es el puente en arco más grande del mundo por longitud del vano principal

(552 m de luz), relevando en ese puesto al puente Lupu en Shangai que, con 550 m, era hasta esa fecha el de mayor luz. El puente principal es de tres vanos (190 + 552 + 190 m) y cuenta con sendos viaductos de acceso a ambos lados. El arco, una celosía metálica del tipo *bowstring*, cuenta con una relación luz/flecha de 4,3. Tiene dos tableros en dos pisos con un ancho de 36 m y lleva tirantes horizontales para el arco en cada tablero. El piso superior lleva tirantes hasta los estribos y el piso inferior lleva tirantes sólo en la proyección del cordón inferior del arco. El tirante inferior



Fig. 1. Puente arco de Chaotianmen, Chongqing (China)

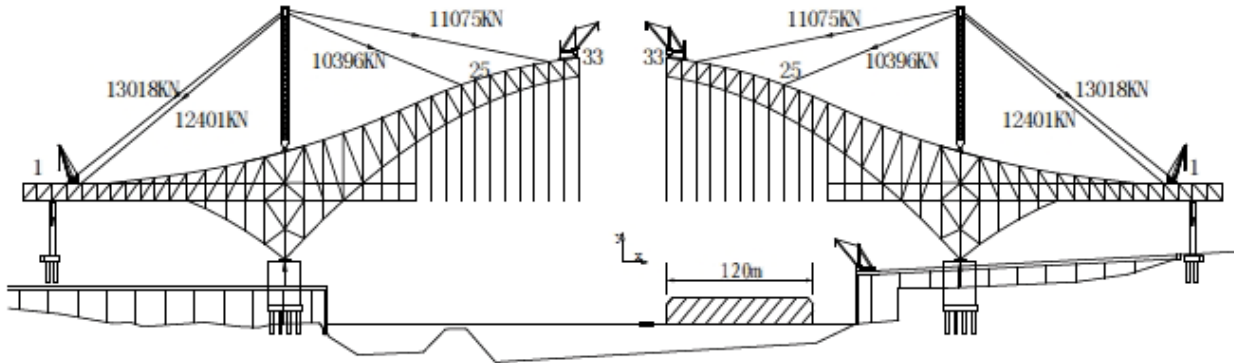


Fig. 2. Construcción del arco de Chaotianmen

toma dos tercios del empuje del arco y el superior sólo el tercio restante.

La configuración de los apoyos responde a la idea del *bowstring* de tablero intermedio, de manera que sólo una pila es fija, se permiten los movimientos en la otra y en los estribos. De esta manera, el conjunto arco-tablero se mueve como un sólido único adaptándose perfectamente a las dilataciones por temperatura.

La construcción del puente se realizó en sus dos mitades. Primero se montaron los vanos laterales, luego se montaron unas torres temporales sobre la pilas para colocar unos tirantes que garantizaran la estabilidad. A continuación, los arcos se fueron montando mediante unas grúas móviles que corrían sobre los mismos y que fueron constituyendo el vano principal.

Después del cierre de la celosía del arco, se colocaron cables temporales horizontales. Finalmente, se usaron como tirantes barras rígidas en ambos tableros, el superior y el inferior, para proceder, seguidamente, a cerrar estos tableros.

1.2. Puente arco de Lupu, Shanghai, China

El arco de Lupu en Shanghai es casi tan grande como el de Chaotianmen pues, con 550 m de luz, sólo tiene 2 m menos que éste. Se trata de un arco de tablero intermedio que, al igual que el arco de Chaotianmen, lleva los empujes del tablero a través del arco y de los vanos laterales hasta los estribos, para desde allí pasar al tirante horizontal del arco. El 28 de junio de 2003 fue abierto al tráfico el puente Lupu ostentando el record de luz en su tipología hasta que se inauguró el puente Chaotianmen que le quitó el récord.



Fig. 3a. El arco de Lupu, finalizado



Fig. 3b. El arco de Lupu, en construcción

El arco de Lupu fue ejecutado con ayuda de sendas torres temporales, pero en este caso hubo una realización singular en relación con los suelos blandos de la zona. Los suelos tienen tan baja capacidad portante, que no aguantaban los empujes del arco ni siquiera mínimamente, así que había que colocar el tirante del arco antes de que se cerrara el mismo. Para ello, se colocaron los cables de extremo a extremo de la figura 4 y se llevaron hasta los estribos. A fin de evitar la catenaria, estos cables se sujetaron de las péndolas del arco.

Como hemos señalado, los suelos de la zona eran muy blandos, por lo que el arco debía ir pilotado en sus tres apoyos. Uno de ellos (una de las dos pilas) es el punto fijo a movimientos horizontales, los otros tres son deslizantes. Con este sistema, las reacciones en las cimentaciones son verticales, ya que todas las fuerzas horizontales se anulan.

1.3. Puente arco de Bosideng

El arco de Bosideng cruza sobre el río Yangtze, en Hejiang, Sichuan (China). Se trata de un *concrete filled steel tubes (CFST) arch*, es decir, un arco de tubos metálicos rellenos de hormigón expansivo. Con un vano de 530 m, es el actual récord del mundo en este tipo de arcos. La dificultad en la fórmula de trabajo de este hormigón radica en el tipo y la cantidad de agente expansivo a emplear, algo que hay que estudiar en cada caso teniendo en cuenta el cemento y los áridos que realmente se vayan a emplear. Hay un par de productos que se pueden utilizar como agentes expansivos, uno se basa en la formación de etringita primaria; el otro, en el óxido de calcio.

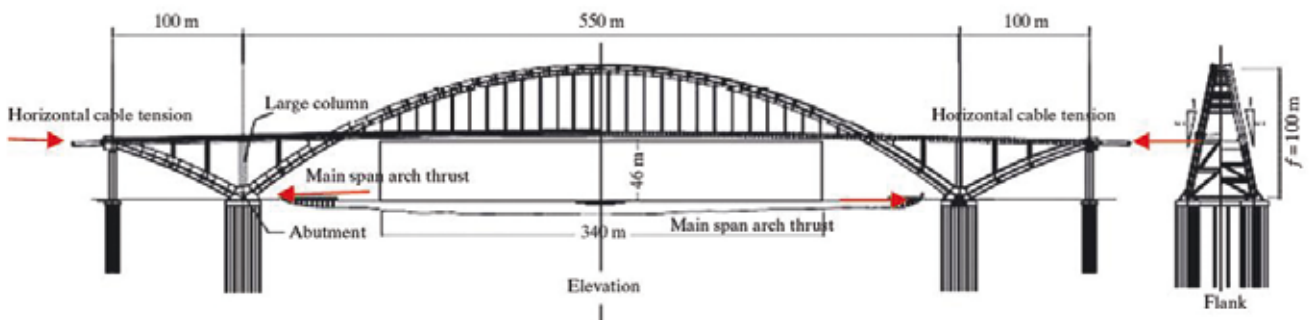


Fig. 4. Esquema estructural. Arco de Lupu, Shanghai (China)



Fig. 5. El arco de Bosideng, río Yangtze, Hejiang, Sichuan (China)

La construcción se realizó con ayuda de dos torres temporales y un blondín. Posteriormente, una vez cerrado el arco, el tablero se montó colgado de las péndolas del arco.

1.4. El puente de New Gorge, West Virginia, EE. UU.

El siguiente puente que encontramos, según el orden por luces, es el puente New River Gorge, en las montañas Apalaches, cerca del condado de Fayette (Virginia Occidental), en el este de los EE. UU. Esta estructura forma parte de la Ruta 19, que conecta el golfo de México con el lago Eire, y, con un tráfico medio de 16.200 vehículos al día, supuso un gran avance en el sistema de comunicaciones de esta área.

Se trata de un puente en arco de celosía de acero de 518 m de luz que fue, durante muchos años, el puente en arco

de un solo tramo más largo del mundo. Las montañas que forman el cañón sirven de sólidos estribos para el arco que forma el puente. La vía del mismo discurre a 267 m sobre el río New River Gorge, lo que supone sea uno de los puentes para circulación de vehículos más altos del mundo.

Este puente fue pionero en el empleo de acero tipo corten. Durante sus primeros años se utilizaba cloruro sódico como agente de deshielo, lo que provocó que parte de la pátina de óxido de cobre que protegía al acero se deshiciera. Efectivamente, al tener más afinidad con el cobre, la sal forma cloruro de cobre, lo que induce que el acero pierda su protección. A partir de que se detectó, se emplea otro tipo de sales.

1.5. Los puentes de Sídney (Australia), Hell Gate y Bayonne (EE. UU.)

La historia del diseño y construcción de los puentes arcos de Sídney, Hell Gate y Bayonne hace que estén estrechamente ligados entre sí. En efecto, cuando el Dr. John Jacob Crew Bradfield se planteó por primera vez el puente de Sídney tenía una preferencia clara por un puente de voladizos. Pero por aquel entonces se planteó hacer un viaje a Nueva York para estudiar los puentes de Manhattan y fue en aquella visita cuando descubrieron un arco mucho más pequeño que el que ellos iban a construir, pero con unas proporciones que los iba a dejar prendados: era el puente arco Hell Gate, un puente ferroviario de 310 m de luz. A partir de ese momento, sólo hubo sitio para una idea de puente: el puente de Sídney sería un arco similar en todo a Hell Gate.



Fig. 6. Arco de New River Gorge, West Virginia, EE. UU.



Fig. 7. Puente de Hell Gate, New York, EE. UU.



Fig. 7. Arco de Sidney, Australia



Fig. 9. Construcción del arco de Sidney



Fig. 10. Arco de Bayonne, New York (EE. UU.)

Así pues, la construcción del puente arco de la bahía de Sídney comenzó en 1923 y acabó en 1932. Tiene 503 m de luz y sendos arcos de celosía, siendo el inferior el que recibe más carga, ya que el superior, al igual que en el Hell Gate, no llega directamente hasta los apoyos.

Para la construcción del puente de Sídney se prolongó temporalmente el arco superior por sus tangentes, consiguiendo así la estabilidad necesaria para construir los semiarcos en voladizo. Una vez cerrados éstos, se construyó el tablero colgándolo por módulos desde el centro hacia los estribos.

Pero ahí no se terminó la historia, pues los neoyorquinos, celosos porque su arco Hell Gate había sido copiado, le encargaron otro más grande al gran proyectista Othmar Ammann: el arco de Bayonne, de 511 m de luz. Lo hicieron con menor coste y también más rápido, porque empezaron en 1928 y acabaron en 1931. Sin embargo, por dificultades económicas, se vieron obligados a eliminar el revestimiento de piedra de las torres, algo que marca una diferencia estética notable si se le compara con el puente de Sídney a favor de este.

1.6. Wushan Yangtze River Bridge

Este arco cruza el río Yangtze en un paraje muy agreste cerca de Wushan, Chongqing (China), en las proximidades de la nueva y enorme presa de las Tres Gargantas. Terminado en el año 2005, era entonces el arco CFST más grande del mundo, pero ahora, con sus 460 m de luz, se queda comparativamente muy pequeño frente a los 530 m del arco de Bosideng, construido después. De todas formas, su encaje

en el terreno es tan acertado y su cimentación en la roca de las laderas tan potente, que se diría que el valle ha estado esperando este arco durante siglos.

Por otra parte, no se puede dejar de comentar el color. Los chinos son muy aficionados a destacar sus grandes arcos mediante su colorido, bien sea con el rojo de los cordones superior e inferior del arco de Chaotianmeng, o bien con la celosía en rojo del arco de Bosideng, muy parecido en la tonalidad a este de Wushan.

La construcción de este arco se hizo por avance en voladizo mediante tirantes. Los tirantes iban a unas torres que a su vez se ventearon a la roca de la ladera. Para colocar las piezas



Fig. 11. Arco de Wushan, Chongqing (China)

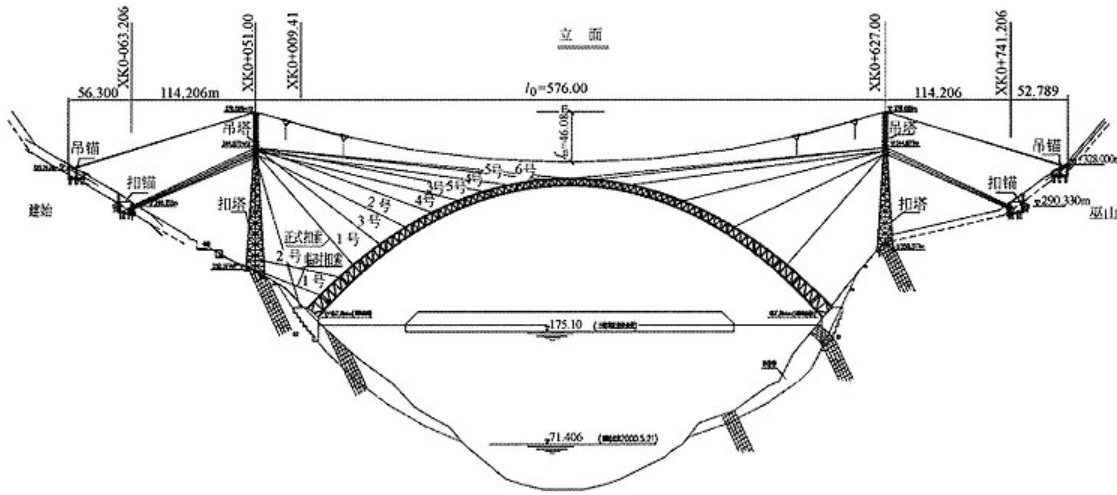


Fig. 12. Construcción del arco de Wushan, Chongqing, China

de acero se utilizó un blondín que se apoyaba un poco más alto en las mismas torres. (Ver la figura 12)

1.7. El arco de Wanxian

Terminado en 1997, el arco de Wanxian se encuentra en las proximidades de la Presa de la Tres Gargantas, en Chongqing (China). Con sus 420 m de luz es el arco de hormigón más grande del mundo, aunque cabría objetar que es un arco mixto de hormigón y acero, ya que se montó con una cimbra perdida de celosía de tubos metálicos construida con un blondín. Una vez cerrada la cimbra en el centro del arco, los tubos metálicos fueron rellenos de hormigón. Después, se procedió a hormigonar el arco por roscas, dejando la cimbra perdida. De hecho, está inspirado en el arco de ferrocarril (1942) de Martin Gil que, con sus 210 m de luz, fue record del mundo en su día.



Fig. 13. Arco de Wanxian, Chongqing, China

2. Evolución de los puentes arco en China

China cuenta con una larga historia en la construcción de puentes arco. Durante el pasado siglo XX, esta tipología se empleó con bastante frecuencia por su gran versatilidad para salvar grandes luces. De hecho, un estudio estadístico muestra que hasta 1990 casi un 30 % de estos puentes se resolvieron con arcos. En los últimos 30 años, a pesar del avance de los puentes colgantes, atirantados o de tableros de cajón postesados, como soluciones para puentes de grandes luces, el puente de arco sigue siendo un tipo estructural de gran actualidad y aplicación en la construcción moderna en China.

2.1. Puentes arco de piedra

A lo largo de la historia, China ha construido miles de puentes. Entre ellos, algunos puentes arco de piedra aún se con-

servan hasta nuestros días, como es el caso del puente de Zhaozhou, de unos 50 m de longitud, 7,3 m de altura, 9 m de ancho y un arco central de 37 metros. Situado en la provincia de Hebei, es el puente más antiguo de toda China, de hecho, su construcción se atribuye al artesano Li Chun entre los años 595 y 605 de la dinastía Sui.

Los arcos de piedra fueron un recurso ampliamente utilizado en la construcción de puentes de carreteras entre los años 1950 y 1970. Incluso en la actualidad también se utilizan en zonas montañosas de difícil acceso. Así, por ejemplo, el nuevo puente Danhe, situado en la provincia de Shanxi y abierto al tráfico en el año 2000, ¡con una luz de 146 m! y un



Fig. 14. Puente arco de piedra en Zhaozhou (izquierda) y nuevo puente Danhe (derecha)

tablero de 24,8 m de ancho, es el puente de arco de piedra más grande del mundo.

2.2. Puentes arco de acero

La producción de acero en China fue muy escasa hasta finales del siglo XX, razón por la cual, hasta 1980, sólo se construyeron unos pocos puentes arco en acero. Sin embargo, durante el periodo de transición al siglo XXI, los puentes arco de acero y mixtos comenzaron a desarrollarse muy rápidamente. Desde la finalización del puente Lupu, se han construido varios puentes arco de acero de gran luz, y hay algunos más que aún están en construcción o en licitación.

El puente arco de acero más grande en construcción es el puente Xiangxi, que cruza el río Yangtze, aguas abajo del embalse de las Tres Gargantas. En este caso, los ingenieros han optado por un espectacular arco similar al puente de

Wushan. La estructura principal consiste en un puente arco de tablero intermedio de 498 m de luz. Se estima que la obra esté concluida en 2018.

El puente Xijiang, en Zhaoqing (Guangdong), pertenece a la línea de alta velocidad Nanning-Guangzhou. Con sus 450 m de luz, batirá el record que tiene en la actualidad el puente de Dashengguan.

El puente Mingzhou, en Ningbo (Zhejiang), de 450 m de luz, se abrió al tráfico el 5 de mayo de 2011. Se trata de sendos arcos de acero en cada borde, referidos entre sí. Con una típica configuración de tablero intermedio, que sirve de tirante horizontal para los arcos, más dos planos de tirantes, uno para cada arco.

El puente Xinguang, inaugurado en 2008, cruza el río de la Perla en la ciudad de Guangzhou. Con un paso principal



Fig. 15. Puente Xiangxi (izquierda) y puente Xijiang (derecha)



Fig. 16. Puente Mingzhou (izquierda) y puente Xinguang (derecha)



Fig. 17. Puente Caiyuanba (izquierda) y puente Daninghe (derecha)

sobre el río que se resuelve mediante tres arcos, con una luz de 428 m para el arco central. El arco es una celosía de acero de canto variable desde los 12 metros en su conexión con los pórticos triangulares, hasta los 7.5 m en clave.

El puente de Caiyuanba, sobre el río Yangtze, en Chongqing, es un puente urbano cuya estructura principal es un puente arco de 420 m de luz. El esquema estructural es de tipo *bowstring* intermedio, con un tablero doble mixto en celosía tipo Warren, y un arco de acero de sección rectangular sobre el tablero, y de hormigón postesado bajo el mismo. Fue abierto al tráfico el 29 de octubre de 2007.

El puente Daninghe sobre el río Daning en Wuxia, se inauguró el 10 de octubre de 2009. Se trata de un arco de tablero superior de 400 m de luz, con celosía de 10 metros de canto constante. Su proceso constructivo fue el de avance en voladizo con atirantamiento provisional.

2.3. Puentes arco de hormigón

En China también se han construido muchos arcos de hormigón armado. En las décadas de los sesenta y setenta, debido a la carestía de materias primas, cemento y acero principalmente, se hicieron muy populares los arcos aligerados y los de doble curvatura. El mayor de éstos es el puente Qianhe, de 150 m de luz, construido en 1968 en la provincia de Henan.

El puente arco Jiangjiehe, sobre el río Wujiang (afluente del Yangtze), en la provincia de Guizhou, fue inaugurado en 1995 y es uno de los arcos de celosías de hormigón armado y pretensado que hay en China. Construido mediante avance en voladizo, cuenta con 330 m de luz y 256 m de altura, por lo que está considerado como uno de los arcos de hormigón más grandes y más altos del mundo.

El empleo de cimbras de acero como armadura de los arcos de hormigón armado se usó por primera vez en 1983 en el puente Yibin Xiaonanmen, de 240 metros de luz. El 7 de

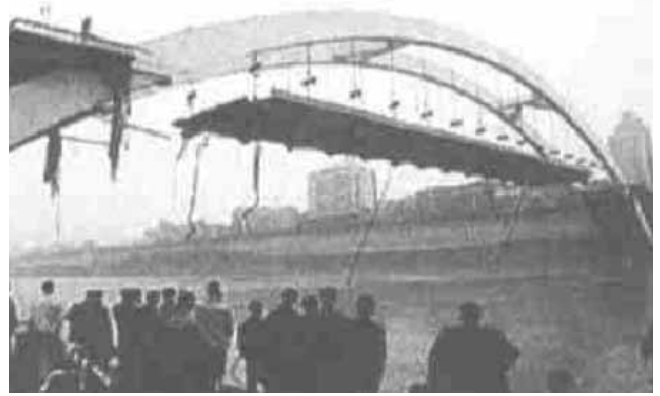
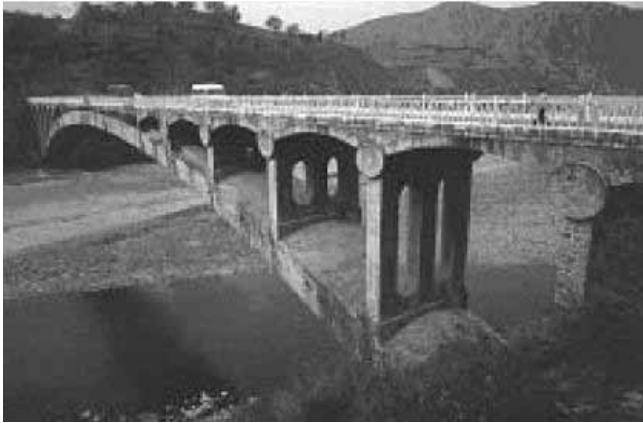


Fig. 18. Puente Qianhe (izquierda) y colapso puente Yibin Xiaonanmen (derecha)



Fig. 19. Puente Jiangjiehe



Fig. 20. Puente Yongjiang

noviembre de 2002, este puente colapsó debido a la rotura de las péndolas más cortas (ver figura 18 derecha).

En 1996 se concluyó el puente Yongjiang, de 312 m luz. Se trata de un puente arco de tablero intermedio que empleó una cimbra perdida de CFST. Como hemos comentado antes, el puente Wanxian también se construyó con esta técnica.

Sobre el río Beipanjiang, al norte de la ciudad de Qinglong, se está construyendo el puente Beipanjiang, que no será sólo el puente ferroviario más alto del mundo (283 m sobre el cauce), sino que, con una luz de 445 m, será también el arco de hormigón más grande jamás construido, batiendo el actual record de Wanxian (410 m).

El arco tiene una flecha de 100 m, con lo que se obtiene una relación luz/flecha de 4,45. La sección transversal del

arco es un cajón tricelular de canto constante de 9 metros, con ancho variable de 18 metros en clave a 28 metros en arranques. El procedimiento constructivo es similar al del puente de Wanxian, con una celosía tubular a modo de cimbra perdida. Su construcción se completará en 2016.

El puente ferroviario Beipanjiang es gemelo del Nanpanjiang, que está cerca de Qiubei (Yunnan). Ambos puentes han sido proyectados por los mismos equipos de ingeniería, con similares diseños y métodos de construcción. Cuando concluya su construcción, en 2015, el puente de ferrocarril Nanpanjiang, con 416 m de luz, será el tercero más grande del mundo.

Una estadística reciente muestra que en las últimas dos décadas se han construido en China 8 arcos de hormigón armado con luces mayores de 200 m, de los cuales, sólo 2 de ellos corresponden a la última década. Parece que esto



Fig. 21. Puente Beipanjiang (infografía)



Fig. 22. Puente Beipanjiang (izquierda) y puente Nanpanjiang (derecha)

quiere decir que ha bajado la competitividad de este tipo de estructuras frente a otras como los puentes colgantes o los puentes atirantados, e incluso si se recurre a un arco, lo más habitual hoy en día es que sean de acero o CFST.

2.4. Puentes arco de CFST

La tendencia al alza en el uso de acero en construcción, unido al descenso de la mano de obra que ha experimentado China desde 1990, ha provocado que los puentes arcos de tubos de acero rellenos de hormigón o CFST se hayan convertido

en una alternativa francamente competitiva para lograr un equilibrio entre los arcos de hormigón y los de acero. El primer puente arco CFST construido en China fue el puente Wanchang, de 110 m de luz, terminado en 1990. Desde entonces, se han construido más de 200 puentes de esta tipología, de los cuales 16 de ellos tienen luces mayores de 250 m.

El puente Yajisha, localizado en la ciudad de Guangzhou, es un puente arco CFST de 360 m de luz, terminado en junio del 2000. Fue el puente más grande de China hasta que se



Fig. 23. Puente Lianxiang (izquierda) y puente Yajisha (derecha)

concluyó el Wushan (ver figura 11), que superó en más de 100 metros la luz del Yajisha. Cada arco está compuesto por una celosía de 6 tubos de 750 mm de diámetro, rellenos de hormigón C60. Esta celosía presenta ancho constante de 3,45 m y canto variable de 8 metros en arranques a 4 metros en clave.

El puente Lianxiang, en Xiangtan (Hunan), es un puente con un vano principal de 400 m. El vano principal tiene una tipología muy particular que lo hace único en el mundo, ya que consiste en un puente arco de tubos de acero rellenos de hormigón, que además se atiranta, integrando de esta manera dos tipologías. Se abrió al tráfico el 12 de julio de 2007.

Localizado a unos 80 km al sur de la garganta del río Yangtze, en la montañosa provincia de Hubei, se encuentra el puente sobre el río Zhijinghe, que es el puente arco más alto hasta la fecha. Inaugurado el 28 de noviembre de 2009, supera el puente de ferrocarril Beipanjiang por 12 metros y al New River Gorge Bridge, de Virginia Occidental, en 27 metros.

La estructura principal consiste en un arco en doble celosía CFST de canto variable de 430 m de luz con una relación luz/ flecha de 5,5. Cada celosía está formada por 4 tubos de 1.200 mm de diámetro y 35 mm de espesor, rellenos de hormigón C50.

3. Evolución futura de los arcos

De todo lo anterior se pueden sacar algunas conclusiones para el futuro próximo, ya que el futuro a largo plazo es imprevisible. En primer lugar parece fácil predecir que se



Fig. 24. Puente Zhijinghe

van a seguir construyendo arcos de hormigón de luces medias entre 125 y 250 m, dado que los tres métodos actuales de construcción sin cimbras (atirantamiento, diagonales temporales y rotación) los hacen muy competitivos en este rango de luces frente a otras tipologías.

El problema es económico, por las dificultades de construcción y la posibilidad de emplear otras tipologías. ¿Dónde están los límites de construcción en voladizo de las cimbras? ¿Desde qué luces empiezan a ser más competitivas otras tipologías? O, dicho de otro modo, ¿cuáles son las ventajas e inconvenientes competitivos esenciales de estas tipologías respecto de los arcos? Si fijamos el rango de luces actual para los atirantados entre 200 y 1.000 m,

y las de los colgantes entre 750 y 3.500 m, tendríamos las siguientes comparaciones conceptuales:

1. En comparación con los atirantados: para grandes luces las torres de un atirantado están en torno al 20 % de la luz, lo cual penaliza el coste de estos puentes. En el caso de los arcos, para las luces máximas, habría que adoptar la tipología de tablero intermedio como en el puente Lupu, ya que para un arco de tablero superior se necesitaría un valle muy profundo y cruzarlo a mucha altura.

2. En cuanto a materiales, parece que los hormigones de altas resistencias, y los hormigones superfluidificados y autocompactables, serán los más utilizados. En el caso de arcos habría que ir a arcos de hormigón ejecutados sobre cimbra metálica perdida o de CFST también perdida.

3. Para lograr la estabilidad fuera de su plano, se puede conseguir mediante parejas de arcos separados y arriostrados el uno contra el otro. La estabilidad en su plano es más fácil de conseguir con la colaboración de las pilas o de los cables.

En estas condiciones parece que un puente en arco de hormigón de alta resistencia, mixto o con cimbra metálica o de CFST perdida, de tablero intermedio con relaciones

luz flecha en torno a 7, y con un buen cimiento para absorber la reacción horizontal de arco, podría competir con los atirantados hasta cerca de 600 m de luz.

Así pues, en lo que a luces se refiere, el rango medio de luces, o sea, las luces óptimas o rango de luces en que los arcos de hormigón serán más competitivos, serán del orden del doble de las actuales, en torno a los 300 o 400 m.

En cuanto a las luces máximas en arcos de acero, parece que el campo actual (hasta 552 m de luz) puede avanzar en las realizaciones más punteras hasta cerca de 1000 m; lo cual quiere decir que el campo que se nos ofrece a la imaginación de los ingenieros estructurales es todavía muy grande en este particular asunto de los arcos.

A modo de ejemplo, Jean Muller y Alain Spielmann presentaron una solución en arco de hormigón de 602 m de luz en el concurso del viaducto de Millau, en Francia.

Actualmente, está en fase de licitación el Sheikh Rashid bin Saeed Crossing, en Al Jaddaf (Dubai). En realidad, se trata de dos estructuras en arco, uno de 610 m luz y 190 m de flecha, y otro de 380 m de luz y 75 m de flecha, con lo que se convertirá en el arco más grande del mundo. **ROP**

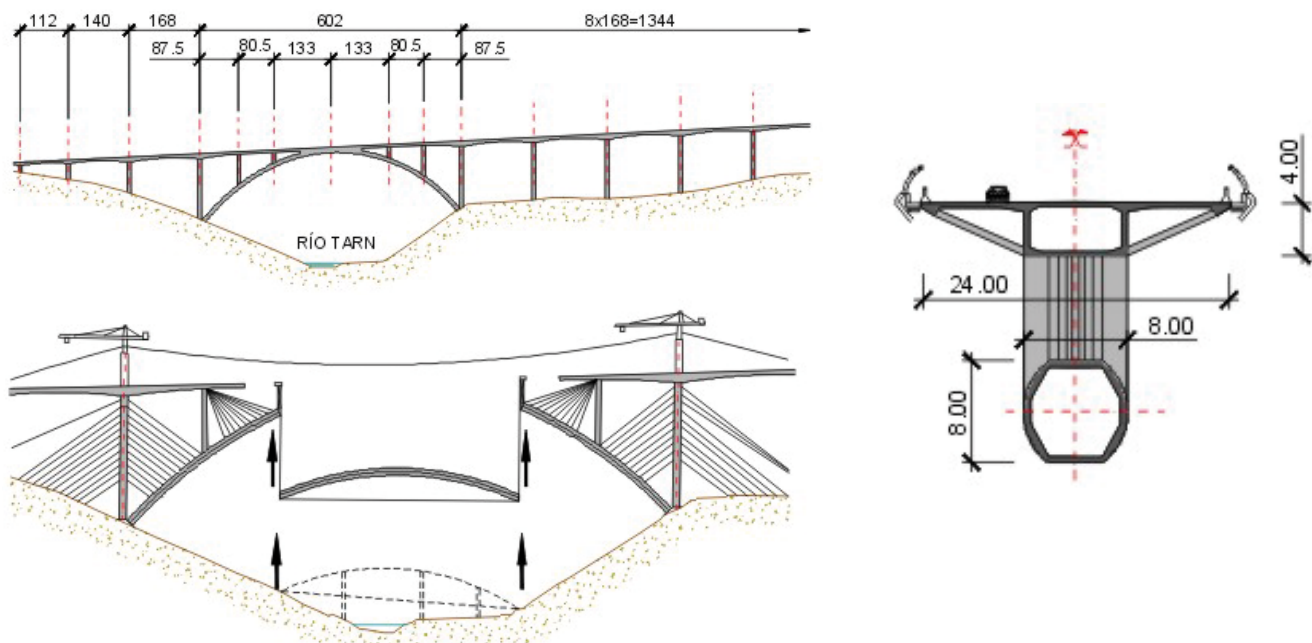
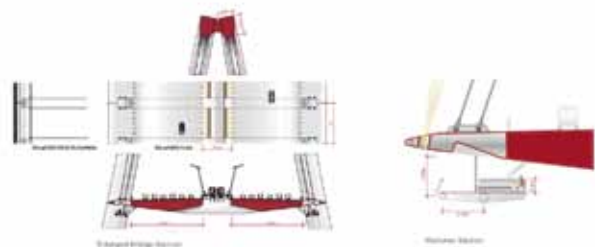


Fig. 25. Arco de Millau. Plano general y construcción



Referencias

- "A Survey of Steel Arch Bridges in China"; Sep. 2011, Volumen 5, pp. 799-808, Journal of Civil Engineering and Architecture.
- "New development of long span CFST arch bridges in china"; Baochun CHEN, College of Civil Engineering, Fuzhou University.
- "Recent development of arch bridges in China", Maorun Feng, Ministry of Transportation of China, Beijing, China.
- "An overview of concrete and CFST arch bridges in China", B. Chen, College off Civil Engineering, Fuzhou University.

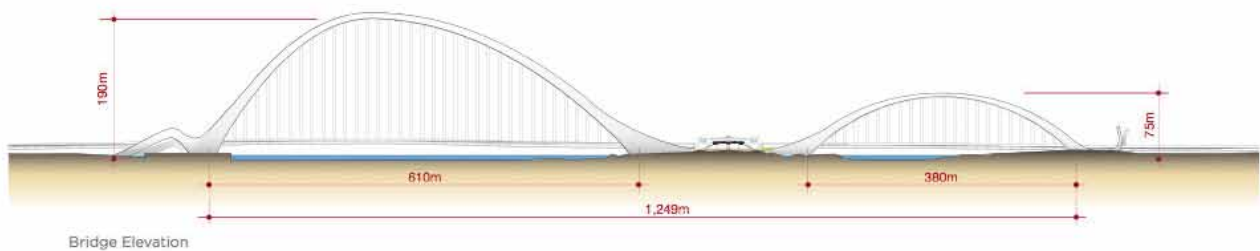


Fig. 26. Sheikh Rashid bin Saeed Crossing