

Arcos: Evolución y tendencias futuras*

Arches: Evolution and future tendencies

Santiago Pérez-Fadón Martínez. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Director Técnico Ferrovial-Agromán. *sp.fadon@ferrovial.es*

Resumen: Este artículo trata de establecer las tendencias futuras en el proyecto de puentes arcos, así como de dar una idea de cual es la luz máxima que pueden alcanzar. Se empieza con el estudio de la historia de los puentes en arco. Primero los arcos de piedra: Romanos, medievales y modernos. Los arcos metálicos: de fundición, de hierro y de acero. Primeros arcos de hormigón, evolución y arcos de hormigón modernos. Grandes arcos metálicos de hoy día y arcos de tubos rellenos de hormigón en China. Algunas consideraciones teóricas sobre el proyecto de grandes puentes arcos. Y finalmente algunas predicciones sobre la tipología y máximas luces que se pueden alcanzar con puentes arcos.

Palabras Clave: Arcos, Historia, Tendencias, Hormigón, Acero

Abstract: This article considers future trends in the design of arch bridges and forecasts the maximum spans which may be reached. The author begins by studying the history of arch bridges, ranging from the Roman, Medieval and modern stone bridges, through iron and steel bridges and on to the first concrete bridges and the development of the modern concrete arch bridge and the large steel arch of today or the concrete filled tube arches seen in China. The author provides a number of theoretical considerations on the design of large arch bridges before offering his predictions regarding the type and maximum spans which may be reached by arch bridges.

Keywords: Arches, History, Tendencias, Concrete, Steel

1. Introducción

Los puentes en arco se conocen desde la más remota antigüedad y aparecen restos arqueológicos de puentes arcos de piedras desde de los Sumerios en Mesopotamia, 2000 a.c. Parece haber un cierto consenso en que en Europa fueron los Etruscos en Italia, quienes usaron por primera vez el verdadero arco sobre el año 800 a.c. Por verdadero arco se entiende, aquel en que las dovelas de piedra se orientan radialmente con el mismo (Figura 2) para distinguirlo de las falsas bóvedas/arcos mediante la disposición de piedras o ladrillos en voladizos progresivos (Figura 1.)

En cualquier caso estas realizaciones no tienen una expansión ni generalización en las construcciones de las civili-

zaciones Egipcia y Griega; a pesar de que hay constancia de algunas realizaciones de arcos que prueban que estas civilizaciones lo conocían.

Es con la civilización Romana cuando los arcos de piedra se generalizan y adquieren carácter de construcción habitual que ya no se interrumpirá hasta el siglo XVIII. Así pues, podemos decir que si el final de la prehistoria y el principio de la historia comienza con las culturas mesopotámicas entre el Tigris y el Éufrates, la Historia de los arcos propiamente dicha se retrasa respecto a la historia general ya que no se inicia hasta la aparición de la civilización Romana unos 700 años antes de cristo.

Los puentes arcos de piedra pasan por diferentes etapas: Los puentes romanos (Figura 3: Puente Romano de Mérida),

*Este artículo recoge la conferencia dada por el autor en la apertura de la "IV Internacional Conference on Arch Bridges", en Barcelona, en noviembre 2004.



Fig. 1. Falso arco con piedras en voladizo.



Fig. 2. Arcos de los Sansanidas, 400 a.c.



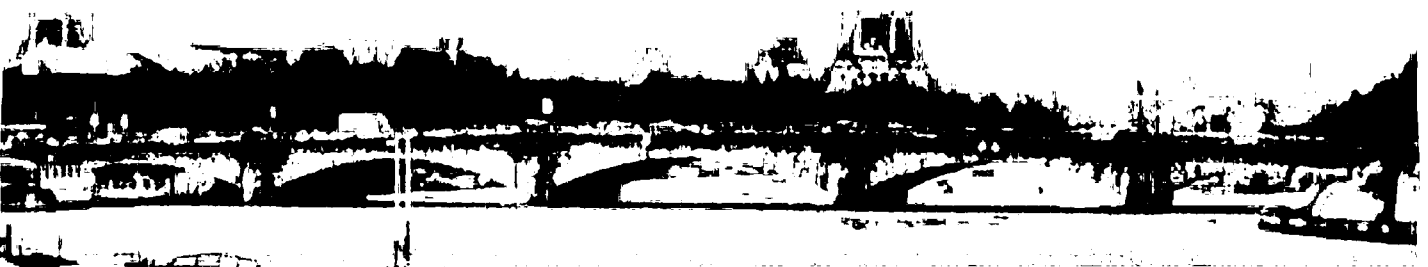
Fig. 3. Puente romano en Mérida. A la dcha. fig 4, puente medieval en Frias (Burgos).



los puentes medievales (Figura 4: Puente medieval en Frías Burgos) y los puentes modernos de los siglos XVI al XIX de los que traemos aquí el puente de la Concordia sobre el río Sena en París que fue proyectado por J. R. Perronet a finales del siglo XVIII, se construyó entre 1787 y 1791, fue reforzado y ensanchado en 1932, y sigue en uso hoy día. Representa, el momento histórico en que los arcos de piedra se abordan de una manera más racional y academicista. Aunque se sigan construyendo arcos de piedra todavía durante bastantes años, se nos antoja que la figura de Perronet representa a todos esos puentes de piedra “modernos” que se van a construir a partir de él (Figura 5).

El estudio de la evolución de las diferentes características de los arcos de piedra es demasiado prolijo y por otra parte no ayuda a estudiar las tendencias futuras de los arcos por lo que no es objeto de esta ponencia.

Fig 5. Pont de la Concorde en París, 31 m, 1971, J.R. Perronet.



2. Primeros arcos metálicos

2.1. Arcos de fundición

En el último cuarto del siglo XVIII, con la revolución industrial, aparecen los puentes en arco metálicos. El primero, que data de 1779, fue el Iron Bridge en Coalbrookdale sobre el río Severn (Figura 6). Este puente fue proyectado por Thomas Pritchard para Abraham Darby III, de una familia de metalúrgicos, que fue su propietario y constructor, el vano principal tiene cinco arcos de fundición paralelos en sección transversal de 30.5 m de luz. La fundición y la forja eran materiales y procedimientos conocidos desde la antigüedad; pero la idea de Abraham Darby cuando construyó este puente era mostrar las posibilidades de la nueva industrialización de la producción con la aplicación de fuerza hidráulica.



Fig. 6. Iron Bridge en Coalbrookdale.

lica a las forjas. Como es habitual cuando aparece una nueva tecnología, se copia la tipología anterior de los arcos de piedra; sin embargo la estética del Iron Bridge fue muy aceptada en la época y años después se fabricaron varios puentes similares con luces de hasta 72 m.

En esa misma población, unos años después, 1796, construyó Telford su primer puente metálico, también de fundición. Este puente conocido como Buildwas tiene 39.6 m de luz y la mitad de Kg de cuantía que el Iron Bridge (Figura

Fig. 7. Buidwas Bridge, Coalbrookdale.



7). Siguiendo con lo dicho sobre tipologías, esta inspirado en los puentes de madera inmediatamente anteriores, mezcla de viga de canto variable y arco de tablero intermedio.

2.2. Arcos de hierro

El hierro sustituye a la fundición en la primera mitad del siglo XIX, con la menor fragilidad y mejor resistencia a tracción de este nuevo material, los puentes aumentan espectacularmente sus luces. Los arcos construidos con este material adoptan la tipología de celosías tridimensionales de perfiles.

El viaducto de Garabit de 165 m de luz en el macizo central francés, fue proyectado por Eiffel, terminado en 1884, y es un ejemplo tardío de este tipo de puente (Figura 8). En efecto desde 1856 se habían patentado los convertidores Bessemer y poco después los Siemens y Martins que permitían obtener acero en lugar de hierro. Por otra parte hacía casi 10 años de la construcción del puente de San Luis que tenía sus perfiles principales (tubos) de acero. La pregunta es: ¿por qué construyó Eiffel este puente de hierro y no de acero? Parece ser que en aquella época todavía eran más fiables las características técnicas del hierro que las del acero, y que, además, hasta la bajada del precio del acero en América (1880) su uso no empezó a generalizarse. De modo que cuando Eiffel proyectó el Garabit (hacia 1779) era más barato el hierro que el acero. Este viaducto fue un precedente de la Tour de Eiffel que se construiría años después con una tipología similar pero en acero.

2.3. Arcos de acero

El primer gran puente arco que utilizó parcialmente el acero, fue el puente sobre el río Mississippi en San Luis Missouri (Figuras 9 y 10). El puente tiene tres vanos constituidos por arcos de tubos de acero de 158.5 m de luz. Se construyó entre 1867 y 1874 y se le conoce con el nombre de Eads Bridge en honor de su proyectista, el legendario Capitán James Buchanan Eads. El puente sirve a carretera y ferrocarril en dos niveles, para lo cual se levantan sendos tableros apoyados sobre el arco por medio de una serie de pies derechos muy densos.

El capitán Eads conocía muy bien el Mississippi, no en vano se había pasado navegando treinta años en los barcos fluviales del río. Por eso sabía que el lecho era muy socavable. En una ocasión había buceado con escafandra durante una de las crecidas del río y pudo observar el movimiento de las arenas del fondo. Por eso no dudó en bajar las cimentaciones a gran profundidad por debajo del lecho del río (25 m aproximadamente). Se construyeron con cajones de aire comprimido en una de las primeras aplicaciones de este insalubre método de construcción hoy día prácticamente abandonado. Los arcos se construyeron mediante voladizos sucesivos atirantados desde cada pila y desde los estribos si-

Fig. 8.
Viaducto de
Garabit,
Francia.

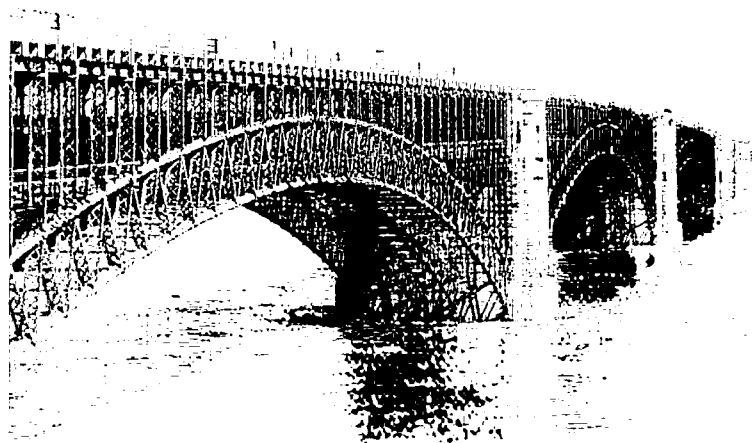
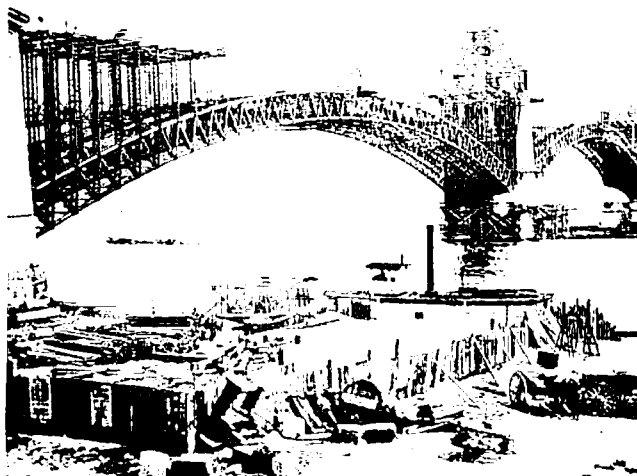
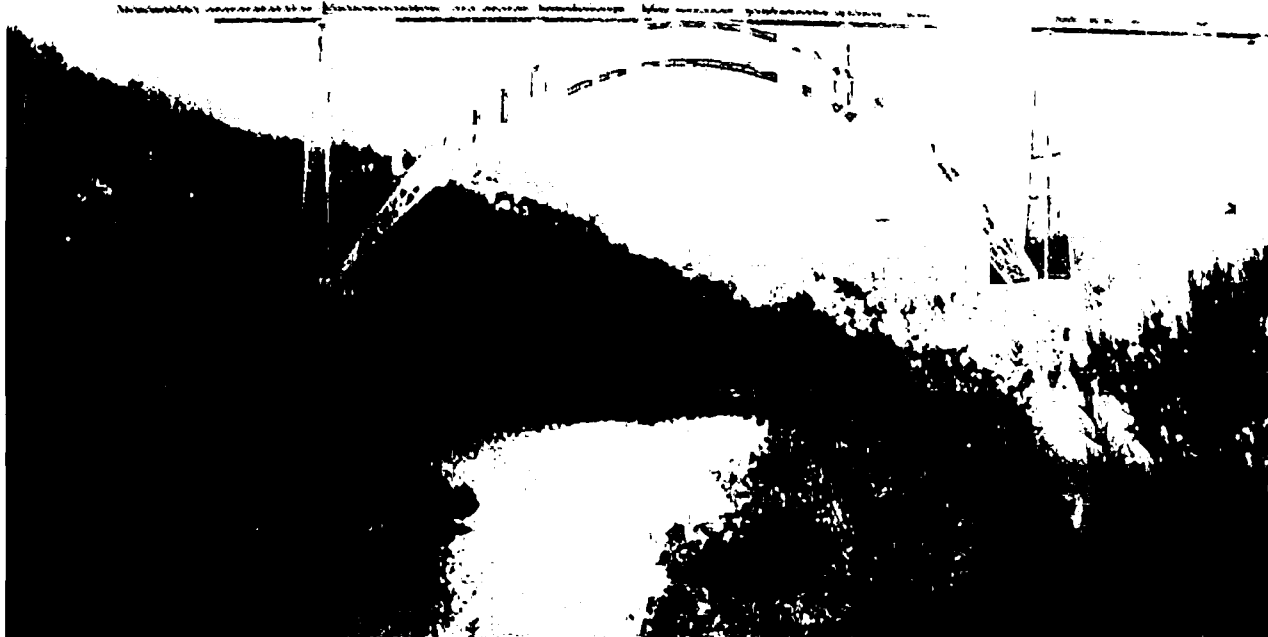


Fig. 9.
Construcción
del Puente de
Eads. A la
dcha. fig. 10,
Puente Eads en
San Luis
Missouri.

multáneamente. Después se cerraron los arcos y sobre ellos se elevaron los pies derechos que soportarían los tableros de ferrocarril y carretera.

3. Arcos de hormigón

3.1. Primeros arcos de hormigón

Desde el faro de Edystone (1759) de John Smeaton a la aparición de la industria del cemento a principios del si-

glo XIX (Vicat publicó en 1818: Producción de cemento artificial) se pasan casi 50 años. Y aun deberán pasar otros 50 para la aparición del hormigón armado. Son los tiempos del hormigón en masa que en lo que se refiere a los puentes arcos apenas da lugar a unas pocas realizaciones de hormigón apisonado en Francia y en España de hasta 36 m de luz.

Atribuir la invención del hormigón armado y datarlo tiene, como siempre en la investigación histórica, la dificultad de atribuírselo al primero que hizo algo con hormigón armado o por el contrario a quien lo usó con generalidad

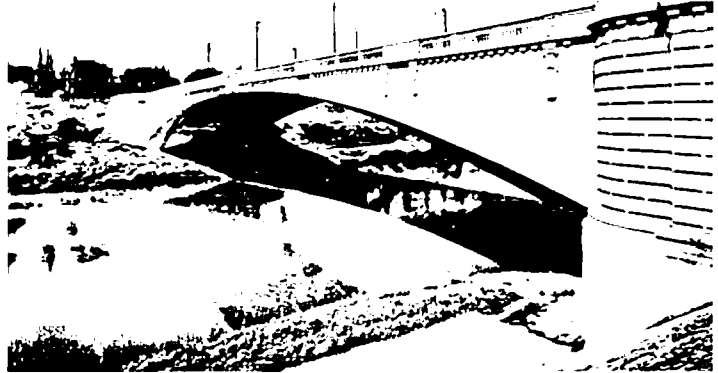


Fig. 11. Puente Tilière de Chatelet. A la dcha. fig. 12, Ponte de Risorgimento en Roma.

y lo implantó en la práctica. La primera patente de 1855 es de Lambot, un guarda bosques que había construido una barca con ese procedimiento. Le sigue el jardinero Monier que registró patentes sucesivas desde 1867 y que tuvo talento comercial para explotar sus inventos. De hecho el primer arco de hormigón armado es de Monier se construyó en 1875 y se trataba de una pasarela para peatones en los jardines del palacio del marques de Tilière de Chazelet en París (Figura 11).

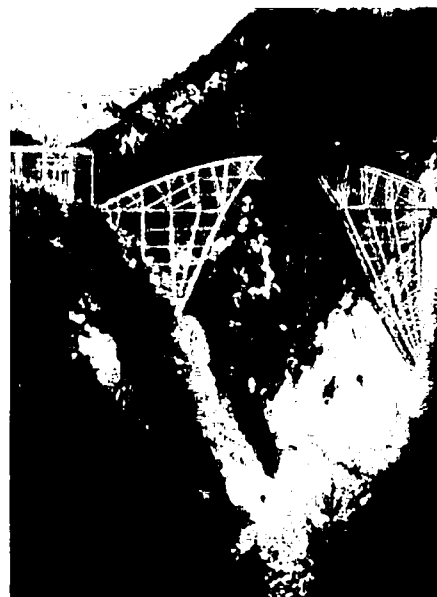
Después de ellos fue Hennebique, ya a finales de siglo XIX, quien, de una forma más industrializada y con un novedoso sistema de franquicias, extendió la práctica del hormigón armado por todo el mundo. Su sistema recibió un premio en la exposición de París de 1.900. Fue precisamente Hennebique quien en 1.904 hizo el puente del Risorgimento en Roma con más de 100 m de luz (Figura 12).

En España fue Eugenio Ribera quien, a principios del siglo XX, introdujo la práctica del hormigón armado y diseñó arcos de hormigón armado que finalmente constituirían la colección oficial de arcos para puentes de carreteras.

3.2. Desarrollo de los arcos de hormigón

Maillard y Freyssinet continúan el desarrollo de los arcos de hormigón. Siendo el segundo conocido además por la invención del hormigón pretensado. El puente más conocido de Maillard es el arco triarticulado de Salginatobel de 1930 y con una luz de 90 m (Figura 13). En este arco, al contrario que en el puente del Risorgimento de Hennebique y de otras realizaciones de Maillard anteriores (puente sobre el Tour de 1904), abandonó las paredes laminares, y vació parcialmente los tímpanos que se sustituyen por pilas sobre el propio arco. Después, en otras realizaciones posteriores, planteó el arco sin tímpanos y adelantó la tipología que sería la clásica para los arcos de hormigón de tablero superior.

Pero, tal vez, lo más importante de este arco fue la dificultad del montaje de su cimbra. En el desarrollo de los arcos de hormigón armado las cimbras jugaron un papel determinante por su dificultad y consecuente coste. La cimbra del Salginatobel fue proyectada y construida por el Ingeniero Coray (Figura 14). Se trataba de una cimbra clásica de



A la izda, fig. 13, Arco de Sanginatobel, Suiza. A la dcha. fig 14, cimbra de Sanginatobel.

Fig. 15. Cimbra del Ammer en Echelsbach.



recogida, así llamadas por que recogían sus pies derechos inclinándolos ligeramente hacia unas cimentaciones concentradas en puntos de las laderas que daban menor altura de cimbrado. No es de extrañar que a mediados del siglo XX los arcos de hormigón sufran una desaparición temporal debido precisamente al coste que suponían estas cimbras durante su construcción.

En este sentido hay que mencionar los procedimientos de montaje de autocimbras perdidas que se pusieron en marcha para evitar estas dificultades. Tal vez uno de los pri-

meros (1898) fue el procedimiento del ingeniero Melan que consistía en montar por voladizos una autocimbra que era una celosía de cordones, montantes y diagonales. El cordón inferior era la cimbra propiamente dicha. El arco más conocido construido por este procedimiento fue el Ammer Brücken en Echelsbach Alemania, del año 1929 (Figura 15). Sin embargo el procedimiento no se estableció plenamente en Europa porque los costes del montaje y el material de la propia cimbra eran más caros que el arco propiamente dicho; Sin embargo en EE.UU. el procedimiento se extendió e incluso se fundó una constructora que se especializó en montajes con este sistema.

Freyssinet hizo una serie de arcos en la primera mitad del siglo XX que fueron una contribución esencial al desarrollo de los mismos. En 1910 construyó el Arco de Villeneuve sur Lot un arco de 100 m de luz tan ligeramente armado que algunos autores lo consideran dentro de los puentes de hormigón en masa. En 1925 construyó el arco de Plougastel (Figuras 16 y 17) de tres vanos de 180 m de luz. Lo más notable de estos arcos fue la cimbra que se construyó para ser desplazada a flote de unos vanos a otros.

Las dificultades con las cimbras persistían y por ello Freyssinet tuvo que imaginar procedimientos ingeniosos a fin de abaratar la estructura resultante. En este sentido los arcos de la Güaira (Figura 18) de 152 m de luz construidos en 1952

Fig. 16. Arco de Plougastel. A la dcha. fig. 17. Cimbra del arco de Plougastel.



Fig. 18. Uno de los arcos de la Güaira. A la dcha. fig 19. Cimbra de los arcos de la Güaira.

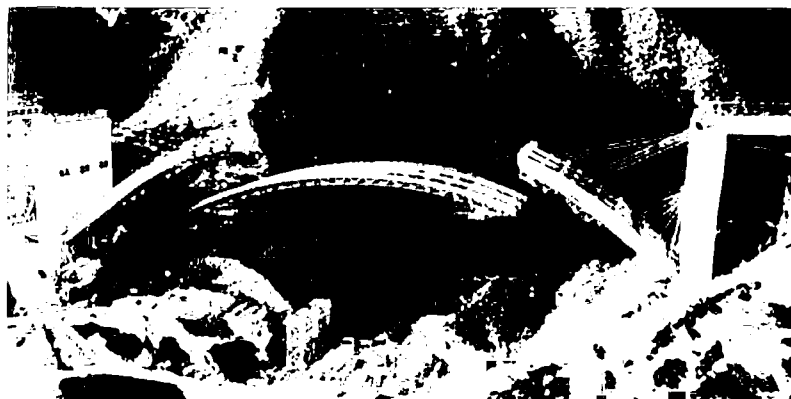




Fig. 20. Cimbra de Sandö. A la dcha. fig 21, Arco de Sandö, Suecia.

en Venezuela, en la autopista que va desde Caracas al aeropuerto de la Guaira, supusieron un gran avance y un precedente de uno de los procedimientos constructivos actuales.

La forma de construcción (Figura 19) consistió en avanzar desde los estribos con una cimbra de madera. Esta cimbra se atirantaba a la pila de estribo que a su vez se venteaba hacia atrás contra los viaductos de acceso. De este modo se volaban unos 36 m desde cada lado quedando aun un vano en medio de 80 m. A continuación se hormigonaban los arranques de los arcos. Sobre estas cimbras se hormigonaban algunas roscas del arco y desde sus extremos se elevaba una cimbra de madera para los 80 m centrales que incorporaba un tirante para mantener su forma durante la elevación. La elevación del tramo central, que pesaba unas 200 Tn, se hizo con unos cabrestantes eléctricos. Finalmente se hormigonaban por roscas estos 80 m centrales y el resto de roscas de los laterales. A partir de aquí se podían retirar los tirantes.

El puente arco de Sandö (Figura 20) de 264 m de luz inició su construcción en 1938 con una cimbra similar a la de Plougastel (Figura 21). Pero durante la construcción la cimbra se hundió y perecieron 17 personas. Durante el hor-

migonado la carga no es el funicular del arco y probablemente la cimbra no tuvo suficiente resistencia a flexión. La nueva cimbra fue mucho más conservadora mediante múltiples apoyos en palizada que cerraron provisionalmente el tráfico. El Puente se terminó en 1942 y fue record del mundo hasta la construcción del puente de la Arrabida en Porto.

El puente de la Arrabida de 270 m de luz, inaugurado en 1963, es un doble arco, cada uno de ellos con sección en cajón bicelular de hormigón armado (Figura 22). Además los dos cajones están unidos por un arriostramiento de cruces de San Andrés también de hormigón armado. El autor del proyecto fue Edgar Cardoso. El puente se construyó con una cimbra metálica autoportante para uno sólo de los arcos y para la totalidad de la luz. La cimbra estaba constituida por tres vigas de alma llena arriostradas entre si en planos horizontales y transversales. El montaje de la cimbra recuerda en todo el procedimiento del montaje de la cimbra de la Guaira (aunque con metal en lugar de madera). En efecto: primero se montaron los arranques del arco que se apoyaron en una palizada y en tirantes desde la pila del arranque (Figura 23). Después, desde los extremos de estos

Fig. 22. Cimbra de Arrabida. Tramo central. A la dcha. fig 23, Cimbra de arrabida, posición 2º arco.

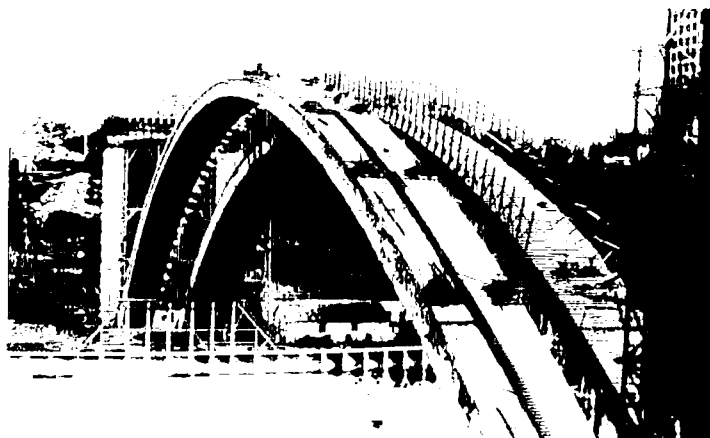
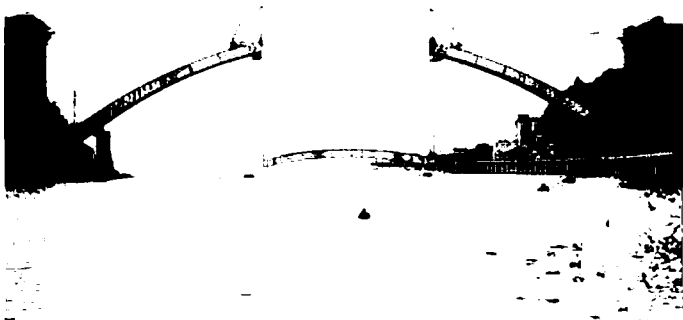




Fig. 24. Arco de la Arrabida, Oporto.

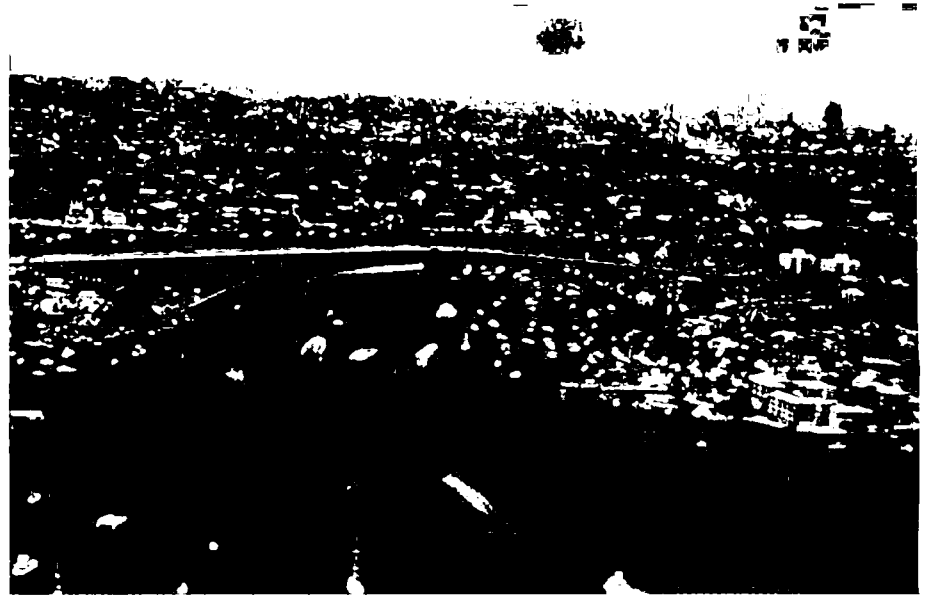
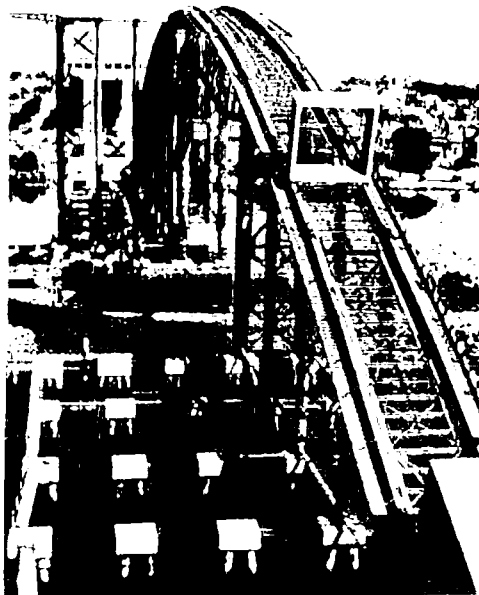
tramos atirantados, se elevó la zona central. La cimbra se situó primero bajo la mitad aguas abajo del puente y después se ripó transversalmente aguas arriba de modo que hizo sucesivamente los dos arcos de hormigón (Figura 24), finalmente se situó entre ambos arcos para hormigonar el arriostamiento entre ellos.

Fig. 25. Cimbra de Glandesville. A la dcha. fig 26. Arco de Glandesville, Australia.

El record le duro muy poco al puente de la Arrabida; Pues poco después se inauguró el arco de Glandesville en Australia (Figura 25). E. Freyssinet fue asesor del proyecto.

Se trataba de un puente de 305 m de luz terminado también en el año 1963.

La innovación más importante de este puente fue que se construyó por dovelas prefabricadas sobre una cimbra (Figura 26), similar a la segunda cimbra de Sandö, sin armadura pasante en las juntas. E. Freyssinet había construido en 1948 una serie de cinco puentes sobre el río Marne con dovelas prefabricadas unidas con pretensado, así que la prefabricación por dovelas no le era nueva. La



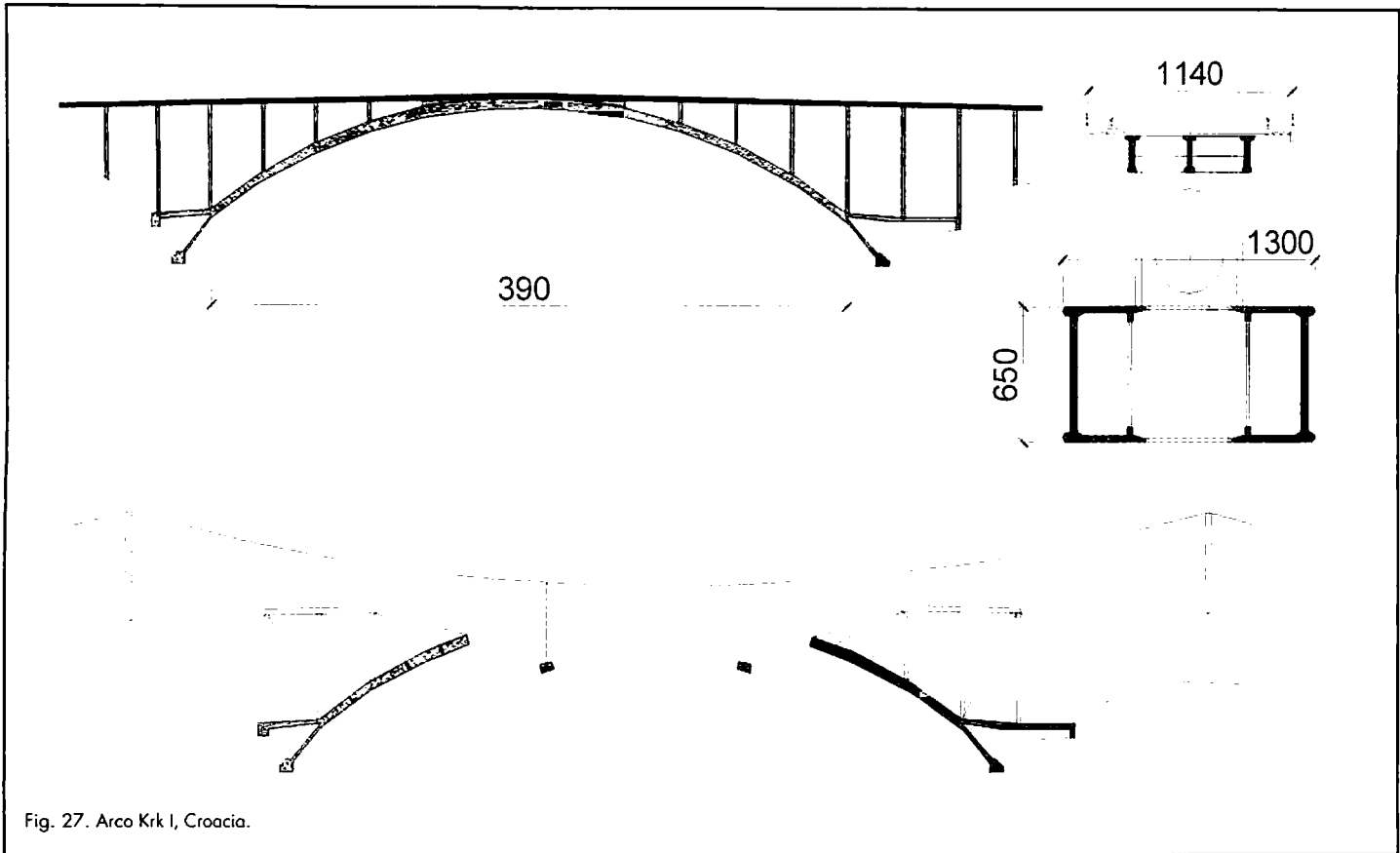


Fig. 27. Arco Krk I, Croacia.

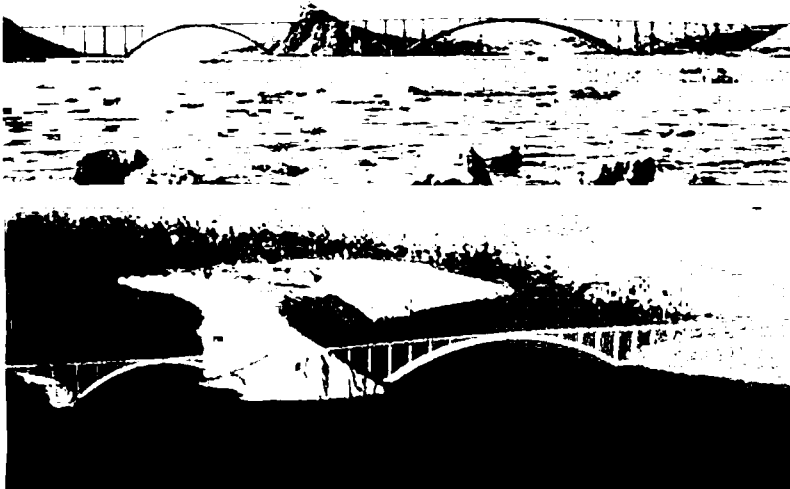
idea nueva en el puente de Glandesville fue sustituir el pretensado de los puentes del Marne por el propio axil de compresión del arco. Aunque el procedimiento despertó desconfianza en aquel tiempo, lo cierto es que el

Fig. 28. Arcos Krk I y II, Croacia.

puente ha funcionado perfectamente desde entonces hasta hoy día.

3.3. Arcos modernos de hormigón

En los sucesivos relevos del record de luz el siguiente arco fue el Krk I de la ex Yugoslavia (Figuras 27 y 28). Este arco inaugurado en 1979 tiene 390 m de luz. El autor del proyecto fue Ilija Stojadinovic. Este ingeniero había construido con anterioridad varios arcos de gran luz en las accidentadas costas del mar Adriático en Croacia y finalmente proyectó los puentes Krk I y II para unir la isla del mismo nombre al continente. En realidad el Krk I tiene una prolongación por debajo del agua que consiste en dividir el arco en dos bielas en cada extremo (precisamente cuando se alcanzan los 390 m de luz), de estas bielas una está sumergida y la otra está justo encima del agua. Parece ser que se diseñó así para simplificar la construcción del tramo sumergido. A efectos de fijar cual es la luz del arco se ha dado en considerar que la biela sumergida no forma parte del arco si no de su estribo, y por ello no se ha tenido en cuenta a la hora de determinar la luz, lo cual es a todas luces muy discutible. El caso es que si la biela sumergida de cada lado se considerase parte del arco y se tomara en consideración para fi-



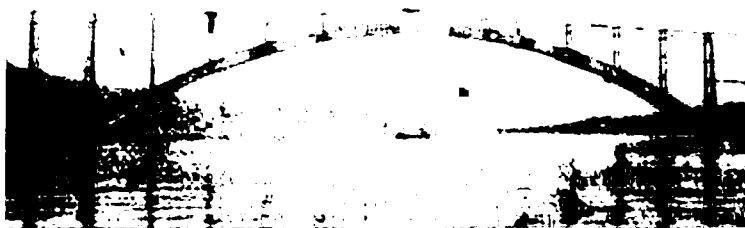


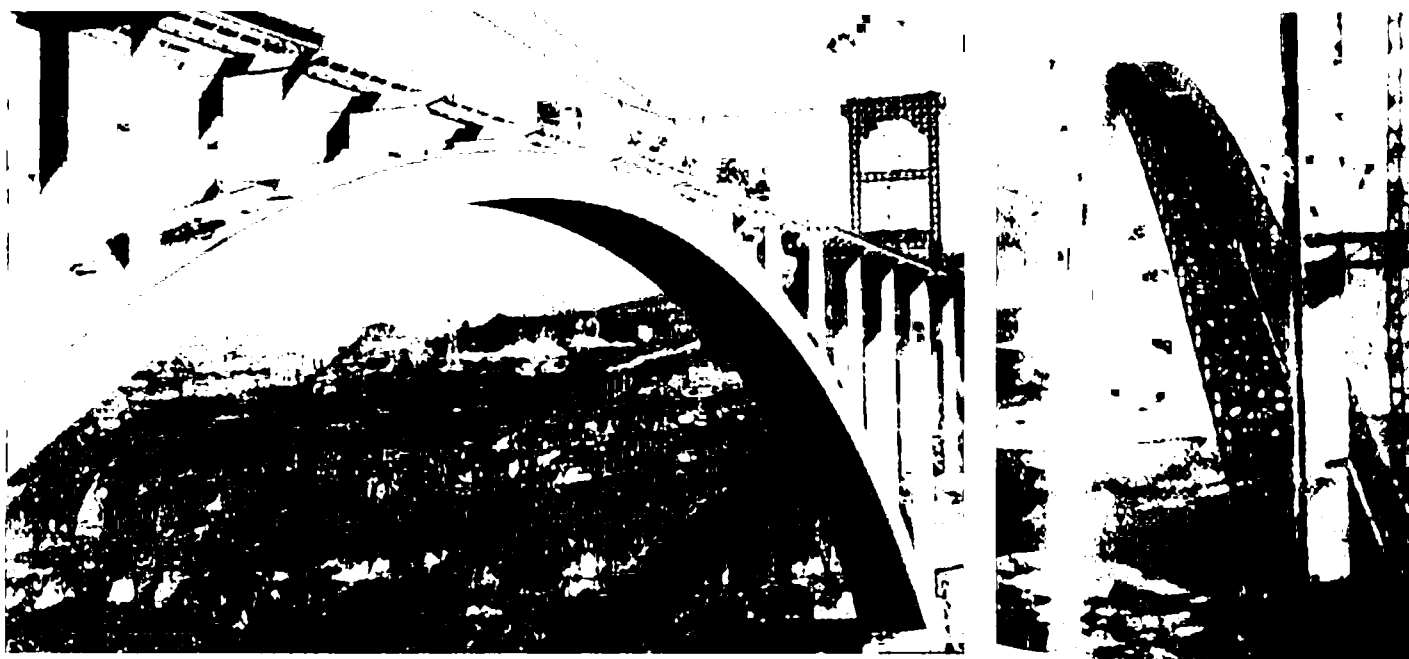
Fig. 29. Puente de Krk. Voladizo con diagonales temporales.

jar la luz, daría una cifra de unos 430 m con lo que el Krk I seguiría siendo record del mundo en la actualidad.

El Puente fue construido por avance en voladizos sucesivos con diagonales temporales (Figura 29). Se utilizaron dovelas prefabricadas para el cajón central de una sección transversal tricelular, después se añadieron los dos cajones laterales también prefabricados mediante juntas de mortero transversales y longitudinales. Para elevar las dovelas se montó un blondín con capacidad de carga de 10 Tn solamente en cada lado.

Una comunicación presentada en el anterior congreso de Arcos 01 por ingenieros de la Universidad de Croacia, ha puesto de manifiesto que el estado de conservación de este arco es bastante deficiente debido: al proyecto de elementos prefabricados con muchas juntas, en ambiente muy agresivo, y a la mala calidad de la construcción. Todo lo cual ha traído como consecuencia un déficit de durabilidad para esta magna obra. En la actualidad han comenzado los trabajos de mantenimiento, auscultación y reparación de ambos puentes.

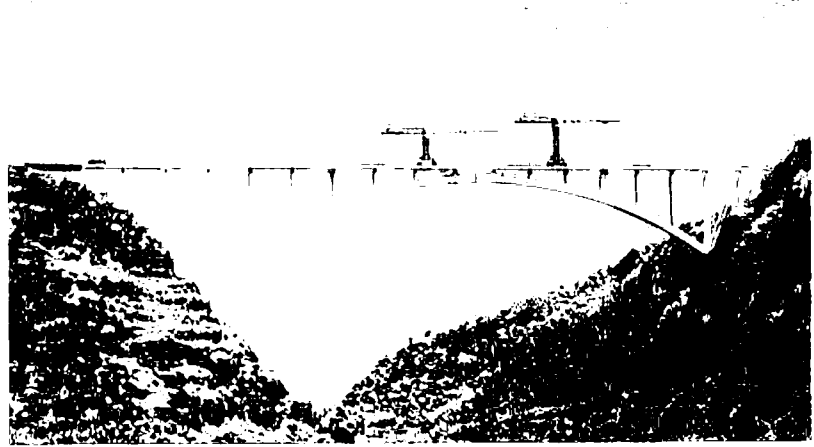
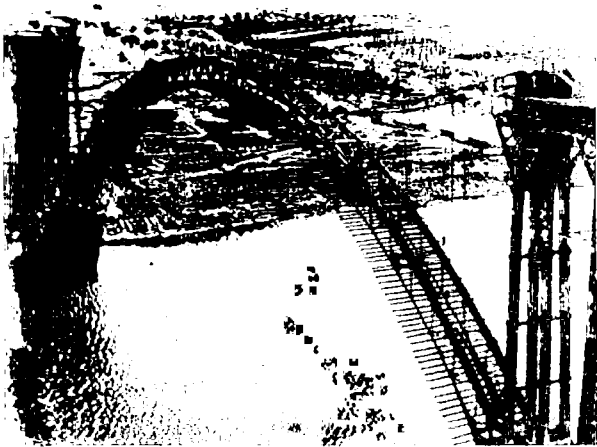
Fig. 30. Arco de Waxian, China. A la dcha. fig. 31. Cimbra de Waxian.



El record del mundo actual en arcos de hormigón (y quinto en la lista de arcos metálicos) lo detenta el Waxian sobre el río Yangtse en China. Se trata de un arco de 420 m de luz (Figura 30), con sección tricelular, proyectado por Li, W y terminado en el año 1996. La construcción se llevo a cabo con una cimbra perdida constituida por una celosía de tubos metálicos rellenos de hormigón (CFST Concrete Filled Steel Tubes) (Figura 31). Estos tubos se han estudiado y ensayado ampliamente y se ha podido conocer con gran precisión sus características resistentes. El relleno de hormigón fundamentalmente mejora el comportamiento a compresión de los tubos metálicos, que es lo que se necesita cuando forman parte de un arco metálico de celosía. Para el montaje de esta cimbra y también para el hormigonado posterior se montó un blondín. El hormigonado del arco se hizo por rosas para no sobrecargar la cimbra demasiado a flexión.

El arco de Waxian tiene un parecido extraordinario con el arco de Martín Gil en Zamora de 209 m de luz (record del mundo de puente de Ferrocarril en su época 1947). Este arco, que fue proyectado por el Ingeniero Martín Gil, se pensaba construir con una cimbra de madera clásica que incluso llegó a estar completamente montada; Sin embargo en 1936 la construcción fue interrumpida por la guerra civil española y el arco no se llegó a hormigonar.

Cuando acabó la guerra la cimbra estaba muy deteriorada por el paso del tiempo transcurrido, así que se le encargó a D. Eduardo Torroja que diese una solución al problema para construir el arco. Torroja ideó la construcción con una cimbra perdida de celosía de perfiles metálicos y un blondín para llevar los materiales de construcción (Figura 32). Como puede verse en las fotografías de construc-



ción y de arco terminado el parecido es total. Además las secciones transversales también son iguales y el hormigonado por roscas también lo hizo primero Torroja en el arco de Martín Gil.

En España el arco de hormigón record de luz actual es el arco de los Tilos en la isla de La Palma, Canarias (Figura 33). Se inauguró el 18 de Diciembre del 2004 y fue proyectado por el autor de esta ponencia. Se trata de un arco de 255 m de luz, con relación luz/flecha de 5.3, sección transversal en cajón monocelular de 3.0 x 6.0 m constante, con pilas de hormigón y tablero mixto de 12 m de ancho. Así el conjunto de la estructura arco-pilas-tablero resulta de una esbeltez excepcional en comparación con las realizaciones hasta la fecha, sobre todo para acciones transversales de viento y pandeo fuera de su plano. El arco y las pilas son de hormigón de alta resistencia (resistencia característica a 28 días de 750 Kg / cm²) por lo que se han podido diseñar almas de sólo 20 cm y losas de 25 cm de espesor.

El arco de Los Tilos se ha construido por voladizos sucesivos con diagonales temporales (procedimiento bien conocido por el autor que había empleado en puentes anteriores como el arco de Ricobayo 168 m). La operación del cierre en clave se realizó con una apertura previa 16 cm para compensar la retracción, fluencia y diferencia de temperatura con la media anual.

4. Evolución de los arcos metálicos

En el transcurso de esta evolución de los arcos de hormigón los arcos metálicos también han evolucionado extraordinariamente. Vamos a referirnos tan solo a los cuatro de mayor luz en la actualidad.

Los arcos de Hell gate, Sydney Harbour y Bayona están ligados por una historia común. En efecto: cuando se convocó el concurso de proyecto para el arco de Sydney Harbour se pensó inicialmente en puentes colgantes. Sin embargo



A la izda. fig. 32, Cimbra de Martín Gil, Zamora. A la dcha. fig. 33, Arco de Los Tilos, La Palma.

Fig. 34. Hell Gate, Nueva York.

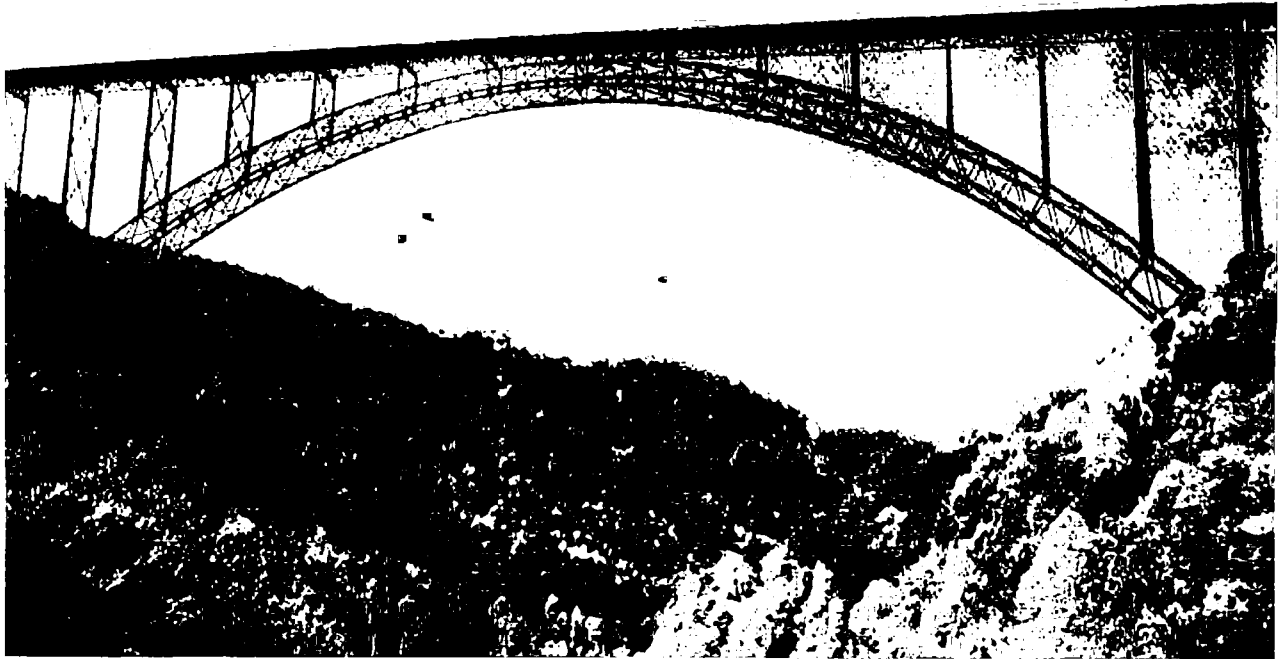


Fig. 35. Sydney Harbour, Australia.



Fig. 36. Arco de Bayona, Nueva York.

Fig. 37. Arco de New River Gorge, W. Virginia.



diferentes personas del jurado visitaron New York para conocer los puentes de Manhattan y vieron el hermosísimo arco de Hell Gate sobre el East River antes de que este alcance la isla de Manhattan (Figura 34). A partir de aquí se formó la idea de que el puente australiano debía ser como el Hell Gate de New York. Así fue adjudicado el concurso a un arco que era prácticamente una homotecia del Hell Gate ya que este tenía 200 m de luz y aquel 503 m (Figura 35).

La historia no se acabó aquí, pues la Autoridad de los Puentes de la Isla de Manhattan, celosa del nuevo record del mundo y de la copia que le habían hecho, decidió construir un puente idéntico pero con un metro más de luz. Fue el Bayona Bridge que une New Jersey con State Island y tiene 504 m de luz (Figura 36). A diferencia de los dos precedentes el arco de Bayona no tiene torres de piedra en sus dos estribos con lo que estéticamente resulta mucho menos logrado y estáticamente pone de manifiesto que dichas torres, aunque ayudan a verticalizar la resultante del arco, no son realmente imprescindibles.

El siguiente puente metálico que fue record del mundo es el New Gorge River cerca de Fayetteville (Figura 37). Se sitúa en un entorno privilegiado ya que cruza a gran altura sobre un valle en un parque nacional en West Virginia EEUU, donde organizan el día del puente en él que celebran todo tipo

de actividades deportivas, alguna relacionada con el puente como saltar en parapente desde el mismo.

El arco tiene 518 m de luz. Fue proyectado por Michael Baker y construido en 1977 con acero tipo corten y uniones atornilladas. La construcción comenzó con el tendido de un cable con helicóptero para cable guía de un blondín entre ambas márgenes. Después se construyeron sendas torres para posicionar el blondín que sería utilizado como grúa para llevar y colocar las grandes piezas de acero para el arco, las pilas y el tablero. Estas piezas eran grandes para disminuir el número de uniones en obra, se fabricaban en taller con montaje en blanco incluido y se llevaban por tren y carretera hasta la obra. El avance se hizo por voladizos sucesivos (Figura 38) atirantados a la parte de puente ya construido en los viaductos de acceso. El cierre en clave del arco se hizo con previa abertura del mismo mediante cilindros hidráulicos para compensar la temperatura con la media del año. (Figura 39).

Como queda dicho el arco es de acero corten y, como el clima de West Virginia es muy riguroso en invierno, se utilizaba sal para combatir el hielo en el pavimento. Esto produjo una interferencia en la formación de la pátina protectora de óxido de cobre ya que se forma cloruro de cobre en su lugar, con lo que la corrosión progresa. Afortunadamente este problema se descubrió a tiempo y se procedió a limpiar

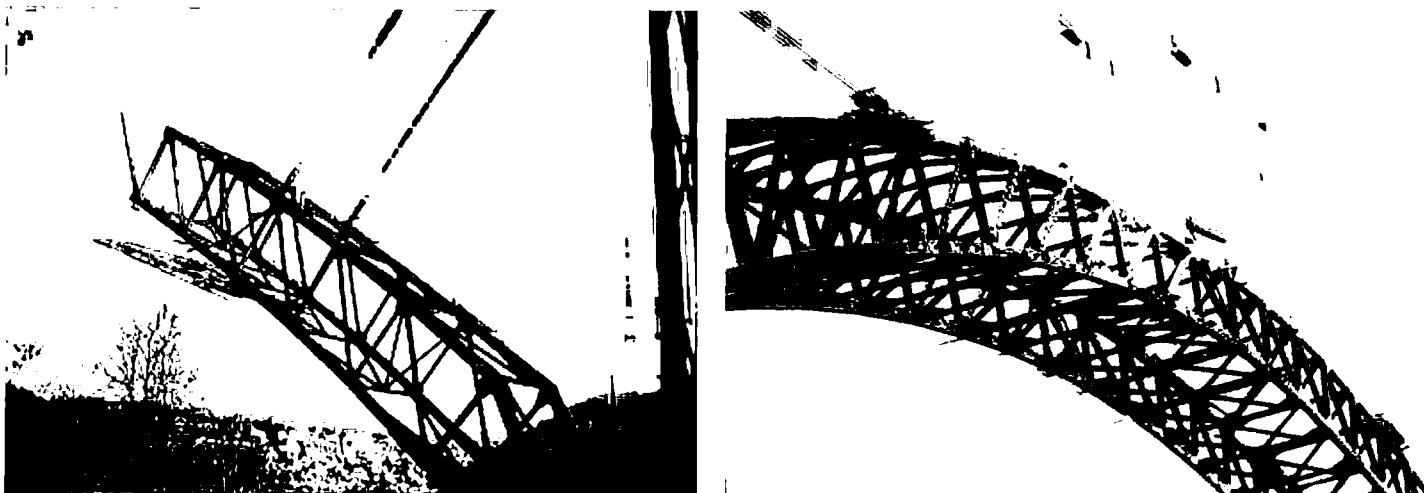


Fig. 38. Construcción en voladizos alirantados. A la dcha. fig. 39, Cierre de la clave. New River Gorge, W. Virginia.

el puente de sal y a utilizar en adelante otros agentes químicos contra el hielo.

El arco metálico Lupu sobre el río Huangpu ha sido terminado el 28 Junio del 2003 y con sus 550 m de luz detenta en la actualidad el record del mundo para arcos (Figura 40). El Proyecto es debido al Shanghai Municipal Engineering Design Institute y al Shanghai Urban Construction Design

Institute. El arco forma parte de una autopista de peaje sombra que comunica el Norte y el Sur de la ciudad.

Se trata de un arco de tablero intermedio que utiliza cables sobre el tablero como tirante. El arco esta formado por dos arcos inclinados respecto a la vertical 1H/5V que casi se tocan en clave. La relación luz Flecha es de 5.5. La sección transversal de estos arcos esta formada por sendos

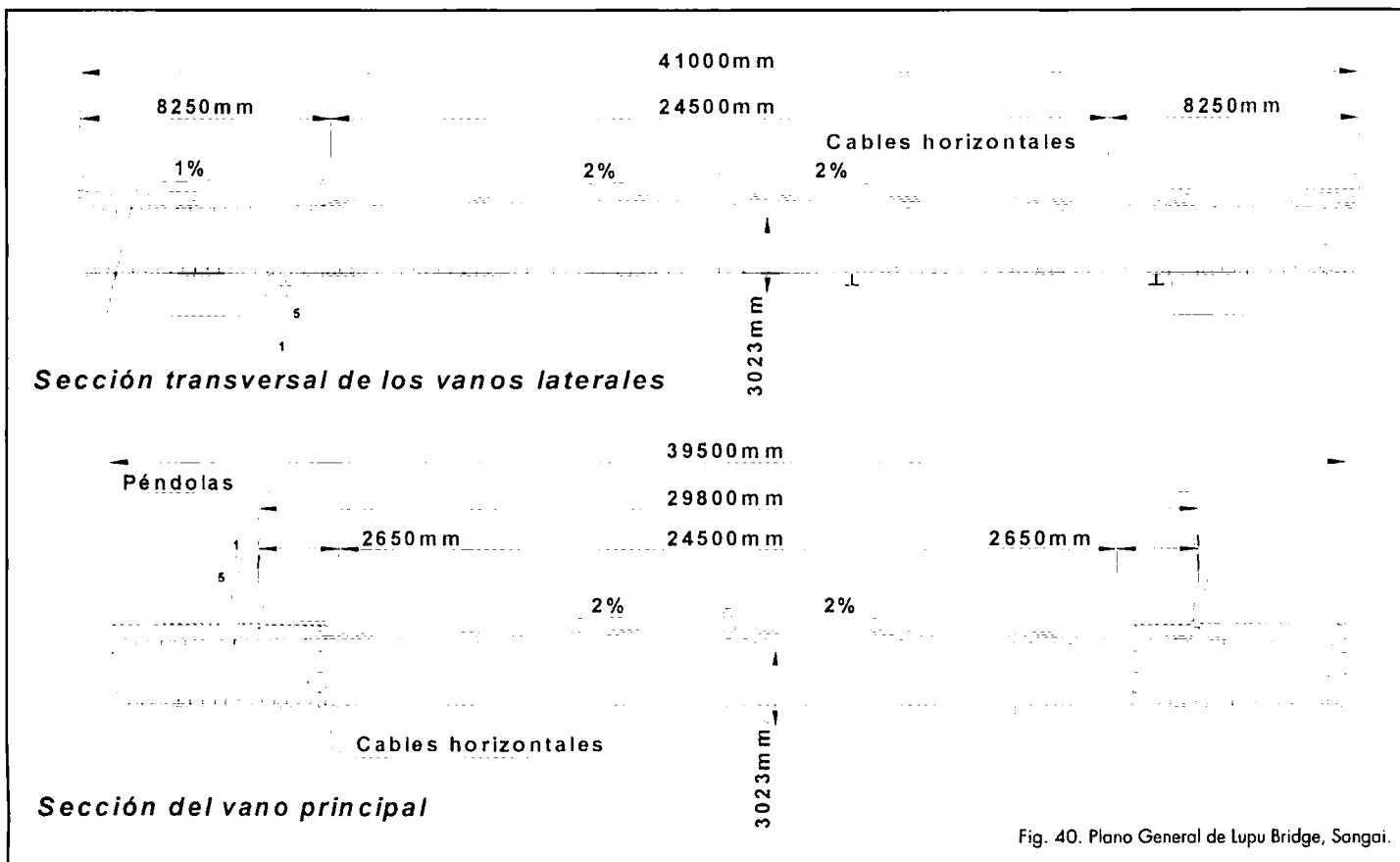
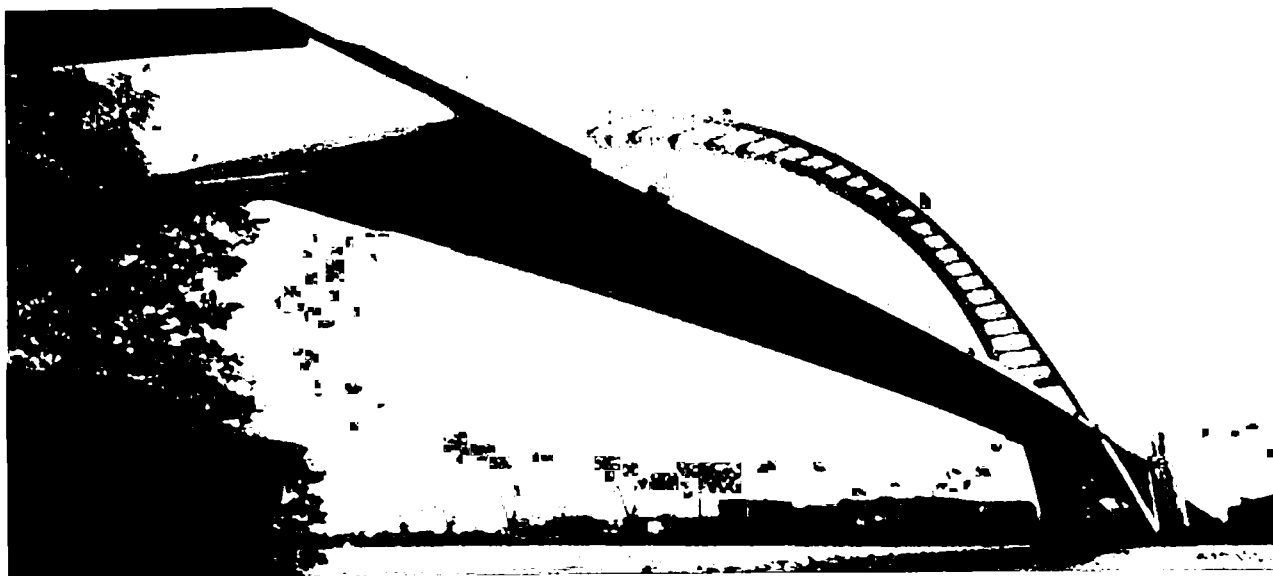


Fig. 40. Plano General de Lupu Bridge, Songai.

Fig. 41. Arco de Lunpu, Shanghai, China.

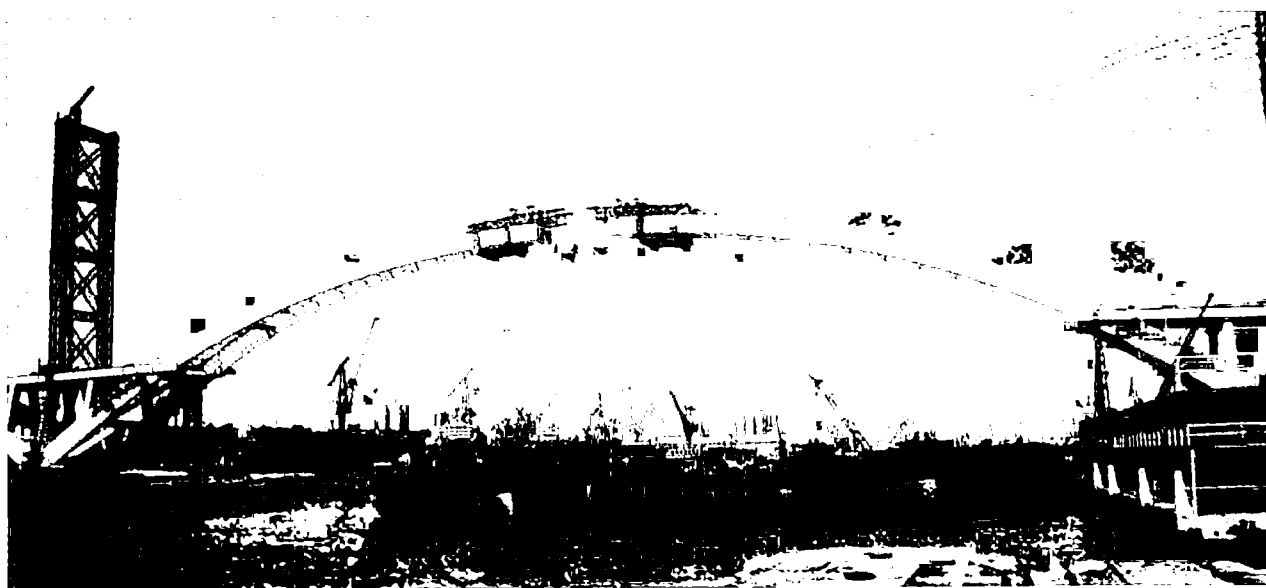


cajones metálicos monocelulares de ancho constante (5 m) y canto variable (de 6 m en clave y 9 m en arranques). El tablero es así mismo una sección transversal metálica en losa ortotropa con sendos cajones en los bordes (Figura 41). El tablero lleva además en sus bordes cables horizontales para absorber el tiro del arco antes de tener colocado el tablero. El tablero tiene 39.5 m de ancho y un canto constante de 2.7 m. En los vanos laterales el tablero se modifica a una sección cerrada del mismo canto. Existe 27 vigas de arriostamiento, a una distancia de 13.5 m entre los arcos en el tramo sobre el tablero y algunas más en "K" en el tramo bajo el tablero. Estas vigas son igualmente de alma llena.

La construcción se hizo simultáneamente desde ambas orillas del río. Todas las uniones en obra se realizaron me-

dante soldadura. Primero se construyeron las secciones de arco debajo del tablero con sus pilas y tablero incluido. A partir de aquí se avanzó en voladizo con atirantamiento provisional a unas torres temporales que se construyeron precisamente encima de las principales del arco (Figura 42). Una vez alcanzada la clave del arco se utilizó una dovela de cierre soldada a un lado y atornillada provisionalmente al otro lado, de manera que fue posible esperar a tener una temperatura de 20°, que se estimó como temperatura media del año, para cerrar el arco. Después se atirantó el arco con los cables citados que quedaron permanentes en el tablero. Las dovelas de este último se transportaron sobre barcazas y se elevaron desde el arco por medio de equipos de lifting montados sobre unos carros que rodaban sobre la parte superior

Fig. 42. Construcción con tirantes temporales. Lunpu, Shanghai, China.



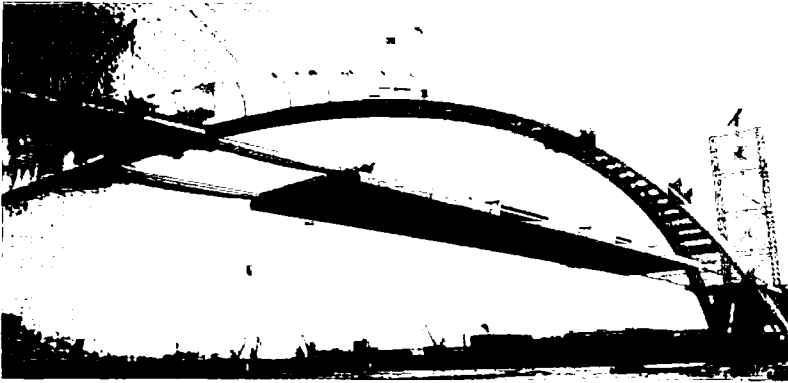


Fig. 43. Elevación tablero, tirantes y cables horizontales. Lunpu, Shanghai, China.

de los arcos (Figura 43). Se han instalado deshumidificadores en el interior del tablero y de los arcos y se ha monitorizado para seguir su comportamiento estructural futuro.

Es de destacar que, en la comparación de soluciones alternativas contempladas durante el estudio preliminar, el arco era más económico que un puente colgante y ligeramente más caro que un puente atirantado de la misma luz. También hay que destacar que la tipología de arco de alma llena es diferente de la de los puentes que hasta ese momento

habían tenido el record del mundo que eran todos de celosía. La justificación que los proyectistas hicieron de esta decisión fue puramente estética; pero no cabe duda que ha debido encarecer su coste.

5. Evolución futura de los arcos

5.1. Arcos de Hormigón

En el concurso del viaducto de Millau en Francia, Jean Muller y Alain Spielmann presentaron una solución en arco de hormigón de 602 m de luz (Figura 44). La solución tenía a su vez dos variantes una con tablero también de hormigón y la otra con tablero metálico. El arco tenía una sección en cajón hexagonal de canto constante de 8.0 m. y ancho variable de 8.0 a 18.0 m. Las luces entre pilas sobre el arco eran de 85 m aproximadamente y en la zona de la clave el tablero y el arco se unen durante una longitud de 105 m. El proceso de construcción era similar a la de los puentes de la Güaira. Primero se construían los arranques del arco en voladizo atirantado a la pila del

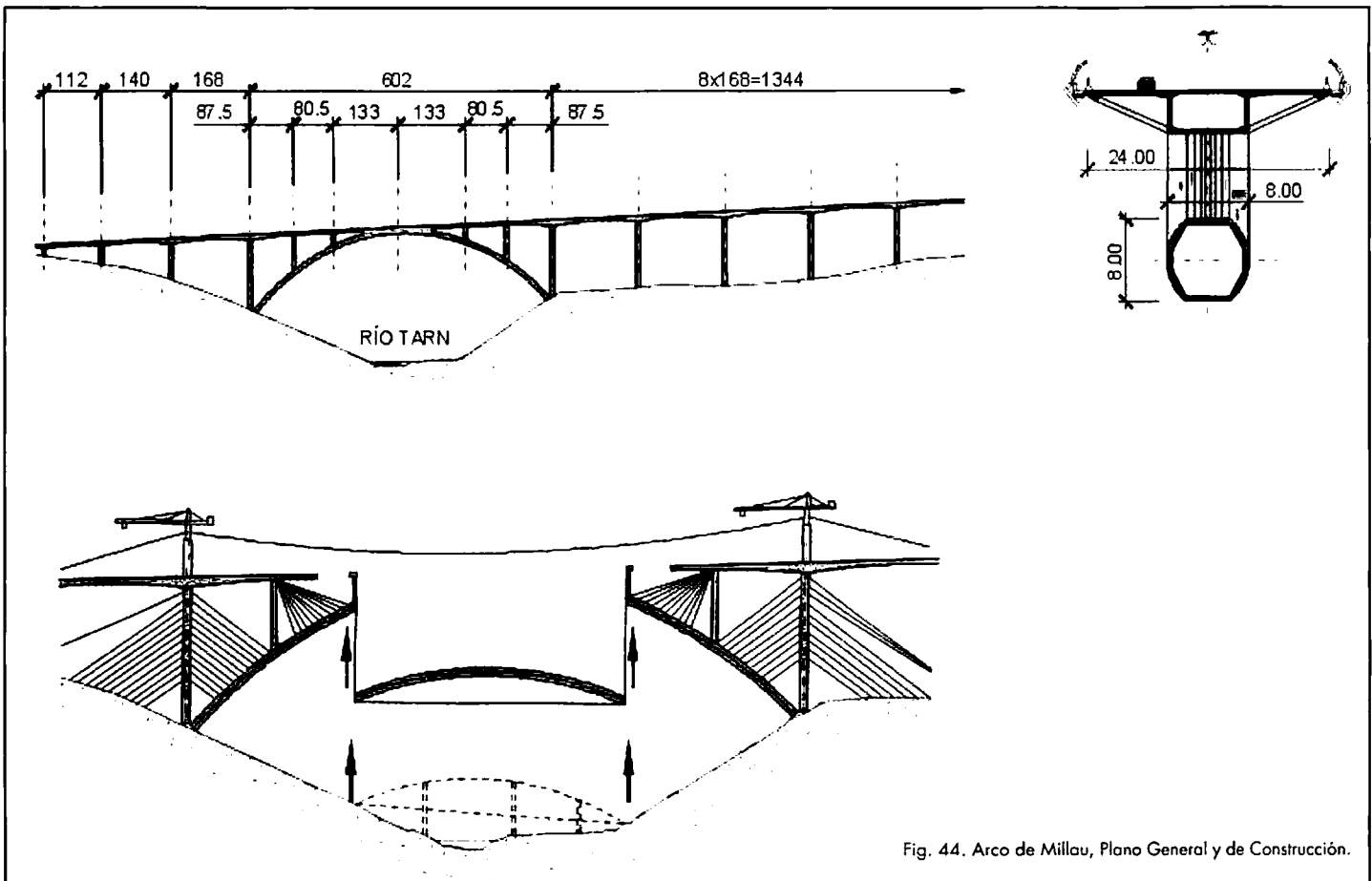


Fig. 44. Arco de Millau, Plano General y de Construcción.

arranque del arco hasta un vuelo de 170 m. Luego se construiría una cimbra perdida de celosía metálica cuya losa inferior se hormigonaría abajo y luego se elevaría mediante "lifting" con un peso de 2.300 Tn. Según los presupuestos que se prepararon para esta oferta la solución competía con el viaducto multiatirantado que finalmente se ha construido.

5.2. Arcos de tubos de acero rellenos de hormigón

En China en los últimos años se han construido muchos puentes arcos (ver tablas 1 y 2 sacadas de las comunicaciones al Arch 2.001).

De los 24 arcos registrados con luces de más de 200m 19 son del tipo celosía de CFST. Es decir como la cimbra usada para el Wanxian, pero sin hormigonado posterior, es decir la celosía es el arco definitivo. Parece que se vuelve así a la tipología de celosías que se estableció como clásica para los grandes arcos metálicos solo que en este

caso podríamos decir que se trata de celosías mixtas ya que los tubos de acero van rellenos de hormigón. También, la mayoría de estos arcos adaptan la tipología de tablero intermedio (precisamente en el medio de la flecha en muchos casos).

Dentro de esta tipología CFST, habría que destacar el arco de Wusha sobre el río Yangtze (Figura 45) cerca de la Presa de las Tres Gargantas. Este puente arco tiene 460 m de luz lo que supera el record de puente de hormigón, que detenta el Waxian con 420 m, y se acerca al record de puentes arcos metálicos. La relación Flecha/luz tiene un valor inusual de 3.8 que es muy bajo, es decir se trata de un arco muy peraltado como se puede apreciar en la única fotografía disponible de este arco en Internet. Su construcción se ha terminado recientemente y se ha realizado mediante voladizos atirantados a torres temporales sobre la pila de arranque.

Otro arco del que existe documentación y fotografías es el arco de Yajisha sobre el río Zhugiang es un puente para autopista de 360 m de luz es decir luces parecidas

Tabla 1: Arcos de hormigón con luz mayor de 200m en China

Nombre del Puente	Año de Terminación	Luz (m)	Flecha/Luz	Ancho Tablero (m)
Waxian Puente sobre el Yangtze	1997	420	1/5	24.0
Puente sobre el río Jiangjie en Guizhou	1995	330	1/6	11.4
Puente Yongjiang en Guangxi	1996	312	1/6	18.9
Puente Yibin Jinshajiang en Sichuan	1990	240	1/5	19.5
Puente Fuling Wujiang en Chongqing	1989	200	1/4	12.0

Tabla 2: Arcos de Tubos metálicos rellenos de hormigón mayores de 200 m en China

Nº	Nombre del Puente	Año de Terminación	Luz (m)	Flecha/Luz
1	Puente Wusham sobre el río Yangtze en Choingqing	En construcción	460	1/3.8
2	Puente Maochaojie en Hu'nan	En construcción	366	1/5
3	Puente Yahishan en Guangzhou	2000	360	1/4.5
4	Puente Nanning Yonghe en Guangxi	En construcción	338	1/5
5	Puente en Chunán Nanpu en Zhejiang	En construcción	308	1/5.5
6	Puente sobre el río Fengjie Meixi en Chongqing	En construcción	288	1/5
7	Puente Hanjiang en Wuhan	En construcción	280	1/5
8	Puente Sanán Yongjiang en Guangxi	1998	270	1/5
9	Puente sobre el río Zigui Qinggan en Hubei	1998	256	1/4
10	Puente Sanmen Jiantiao en Zhejiang	En construcción	245	1/5
11	Puente Hanjiang Nº 5 en Wuhan	En construcción	240	1/5
12	Puente Tongwamen en Zhejiang	En construcción	238	1/4.82
13	Puente de ferrocarril Beipanjiang en Guizhou	En construcción	236	1/4
14	Acueducto Pizhou en Jiangsu	2000	235	1/4
15	Puente Liujing en Guangxi	1999	220	1/5
16	Puente EnSi NanNiDu en HuBei	En construcción	220	1/5
17	Puente Hechuan Jialingjiang en Chongqing	En construcción	210	1/4
18	Puente Mianyang Fujiang Nº.3 en Sichuan	1997	202	1/4.5
19	Puente Nanhai Oeste Sanshan en Guangdong	1995	200	1/4.5



Fig. 45.
Arco de
Whusa, Río
Yangtse,
China.

a las máximas de hormigón. En sección transversal son dos arcos uno en cada lado de la autopista y la sección de cada arco tiene la particularidad de que llevan sendas losa de hormigón como cordones inferior y superior de las celosías. También es un arco de tablero intermedio y fue construido por un ingenioso sistema de doble rotación (Figura 46). Primero se construyó la mitad de cada arco y los vanos laterales en la orilla paralelo al río, después se levantaron los semiarcos del vano principal a su posición mediante giro de eje horizontal y utilizando tirantes a una torre temporal sobre la pila de arranque y finalmente se giro el conjunto de semiarcos y vanos laterales de contrapeso, sobre eje vertical de la pila de arranque, a su posición definitiva. Una vez terminado el giro se cerró con una dovela de clave.

cimbras (Atirantamiento, Diagonales temporales y Rotación) los hacen muy competitivos en este rango de luces frente a otras tipologías (los atirantados por el lado de las luces altas y los de dintel plano construidos en voladizos por el de las cortas). Incluso por debajo de estas luces se seguirán construyendo arcos por razones puramente estéticas, sobre todo arcos de tablero inferior en los que la estructura queda a la vista de los usuarios.

6. Conclusiones

De todo lo anterior ya se pueden sacar algunas conclusiones sólo para el futuro próximo, ya que el futuro a largo plazo es imprevisible:

6.1. Luces medias y pequeñas

En primer lugar parece fácil predecir que: se van a seguir construyendo arcos de luces medias (entre 125 y 250 m) dado que los tres métodos actuales de construcción sin

6.2. Grandes luces. Comportamiento estructural

En segundo lugar: Referente a las grandes luces, hemos hecho algunos cálculos con puentes arcos de hormi-

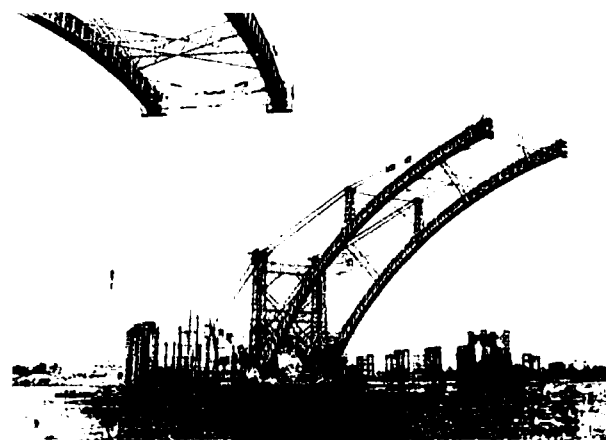


Fig. 46.
Rotación de
semiarco.
Yajisha, Río
Zhugian,
China.

gón de alta resistencia. Hemos calculado arcos únicos de 600 a 1000 m de luz con geometrías razonables en lo que se refiere a esbelteces, espesores, etc. y arcos dobles para autopistas, separando las dos calzadas y arriostrando ambos arcos por vigas horizontales entre ellos. La conclusión es que los límites estructurales de estos arcos, incluyendo la estabilidad dentro y fuera del plano del arco, están por encima de los 1.000 m para los primeros y los 2.000 m para los segundos. El problema es económico. Las dificultades de construcción y las alternativas de otras tipologías. ¿Dónde están los límites de construcción en voladizo de las cimbras? ¿Desde que luces empiezan a ser más competitivas otras tipologías? O dicho de otro modo cuales son las ventajas e inconvenientes competitivos esenciales de estas tipologías respecto de los arcos. Como ya se ha dicho la tipología competitiva es el atirantado y mucho más lejos el colgante. 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:

Tipologías de arcos

En comparación con los atirantados nos encontramos que, en luces grandes próximas a los 1.000 m, las torres de un atirantado están en torno al 20 % de la luz es decir 200 m de altura lo cual no cabe duda que penaliza el coste de estos puentes. En tanto que las pilas de un arco de tablero superior son muy altas (para relaciones luz / flecha clásicas habituales de 5.5, tendríamos pilas sobre el estribo de casi 200 m y a partir de estas decreciendo hacia la clave) que penalizarían mucho el coste del puente. Por eso parece que en estas grandes luces habría que adoptar la tipología de tablero intermedio como hicieron casi todos los puentes arcos de grandes luces de acero (en particular el record actual Lunpu Bridge) y también están haciendo los puentes chinos de CFST como el Wusha. De esta manera y con relación luz / flecha hasta el entorno de 6 se podrían tener pilas de estribo de 70 m y altura máxima del arco sobre el tablero de unos 100 m para los cables de cuelgue, estos cables podrían ser más económicos que los cables de un atirantado que resultan mayores de unos 540 m.

Referencias:

-Roca. P. and Molins, C. *Arch Bridges IV, Advances in assessment, Structural Design and Constructio.* CIMNE Barcelona. 2004.
-Arch'01. *Third international arch bridges conference.* Presses de l'école nationale des ponts et chaussées. 2001.

-Bennett, David. *The Creation of Bridges, from vin to reality - the ultimate challenge of architecture, design and distance.* Aurum press ltd. 1999.
-Fernandez Troyano, Leonardo. *Tierra sobre el agua, Vision Historica Universal de los Puentes.* Colegio de ingenieros de Caminos Canales y Puertos. 1999.

-Wittfocht, Hans. *Building Bridges History, Technology, Construction.* Beton Verlag. 1984.
-Leonhardt, Fritz. *Brücken Bridges.* Deutsche Verlags-Anstat. 1984
-Wittfocht. *Puentes Ejemplos Internacionales.* Editorial Gustavo Gili, S.A. 1975.

Nuevos materiales y procesos de construcción

En cuanto a materiales nuevos parece que los hormigones de altas resistencias y los hormigones superfluidificados y autocompactables serán los más utilizados. Por un lado las torres de atirantados de esta luz deberían ser de hormigón de alta resistencia armado mejor que metálicas para ser competitivas. Así en el caso de arcos habría que ir a arcos de hormigón ejecutados sobre autocimbra metálica perdida. De este modo se podría montar la autocimbra (con mucho menos peso que el arco definitivo) en voladizo con diagonales temporales y/o tirantes. Además habría que intentar que la mayor parte del material empleado en el montaje de la cimbra colabore después a la resistencia del arco definitivo (arco mixto o armado) a compresión compuesta o a flexo compresión. Montajes de cimbra tipo Ricobayo o Waxian incluso para dejarla como arco definitivo relleno los tubos con hormigón de autocompactable de alta resistencia pero sin hormigonado externo (como los ejemplos de los arcos chinos), serían los más competitivos.

En estas condiciones parece que un puente en arco de hormigón de alta resistencia, mixto o con cimbra metálica 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 1.000 m de luz. No parece que para luces mayores los arcos puedan competir con los puentes colgantes. Al fin y al cabo los puentes colgantes son arcos trabajando a tracción, mucho más fáciles de construir y, hoy día, sin problemas de estabilidad gracias a los ensayos de las nuevas secciones en túneles de viento.

Grandes luces en el futuro

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 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, parece que el campo actual hasta 550 m de luz, puede avanzar en las realizaciones más punteras hasta cerca de 1.000 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. ♦