

El desarrollo de los puentes arco de hormigón



Javier Manterola Armisén

Doctor ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

Consejero delegado de CFCSL

Como ya hemos citado, la aparición del hormigón pretensado y, sobre todo, su rápida extensión por todo el planeta, hizo que los arcos de hormigón disminuyesen en número, pues el pretensado, unido a la construcción en avance en voladizo, era una combinación decisiva para derrotar

económicamente cualquier alternativa. Y es precisamente Freyssinet quien, en 1952, construye los dos puentes de la autopista Guaiva (fig. 1), en Venezuela, de 150 m de luz con una relación flecha/luz de 4,75 y un canto del arco constante de $L/50$.



Fig. 1. Puente en la autopista Guaiva (Venezuela)



Fig. 2. Puente en la autopista Guayra (Venezuela)



Fig. 4. Cimbra del puente de la Fiumarella



Fig. 3. Puente de la Fiumarella

Este puente tiene una particularidad importante, es un arco cimbrado y construido en avance en voladizo, lo que se realiza sobre el tercio lateral del puente, mientras que el centro del arco se apoya en una cimbra central la cual se sube y se cuelga de la parte ya construida (fig. 2).

El arco es biarticulado. Quizás Freyssinet no se fiaba del control de la deformación del arco en su arranque debido a los cambios de temperatura sobre los tirantes de cuelgue.

El puente de la Fiumarella, de Ricardo Morendi (1961), tiene 231 m de luz. Se desarrolla sobre un valle muy profundo, con la rasante del puente a 100 m del fondo. Es un arco

triarticulado, en clave y próximo a los arranques del arco, el cual se bifurca en dos patas. La relación flecha/luz es muy grande 1/3.5 (fig. 3).

La cimbra es de tubos, enormemente grande, apoyada en castilletes inferiores, muy al estilo italiano los cuales son grandes especialistas en este tipo de cimbras cuajadas (fig. 4)

Este puente presenta una particularidad única –sólo desarrollada por Morandi–: las pilas que soportan el tablero no son verticales sino normales al arco, las cuales hacen juego con las pilas de los viaductos de acceso.



Fig. 5. Pasarela del torrente de Lussia



Fig. 6a. Giro y abatimiento del arco del torrente Lussia

En la pasarela sobre el torrente Lussia (fig. 5), de 1953-54, Morandi desarrolla, por primera vez, según mi conocimiento, el giro de los dos semiarcos de un arco de 77,5 m de luz, desde una posición vertical a su situación definitiva (fig. 6a).

Esto ya lo habían hecho los franceses pero sólo con la cimbra de madera (fig. 6b).

Este mismo procedimiento lo realiza Morandi el mismo año (1953-1955) en el puente sobre el río Storms en Sudáfrica (fig. 7). El puente de 100 m de luz y 20 m de flecha se construye girando los semiarcos desde una rótula provisional dispuesta en el punto donde la segunda pila inclinada, contada desde



Fig. 6b. Giro de la cimbra de madera de un puente francés de ferrocarril



Fig. 7. Puente sobre el río Storms



**Fig. 8. Puente sobre el río Storms.
Giro de los arcos principales**

el estribo, se une al arco. Allí dispone una pila provisional vertical (fig. 8).

Como en el puente de la Fiumarella, las pilas existentes entre el dintel y el arco son normales al arco. Yo creo que no hay ventaja con esta disposición y descompensa visualmente al puente. El espesor del arco en clave es de 1,21 m y en arranque de 2,5 m.

El puente de la Arrábida, de Edgar Cardoso, tiene 270 m de luz y se terminó en 1963. Es un puente formidable en la desembocadura del Duero, en Oporto. Tiene una relación de flecha/luz de 1/5,19 y un espesor en clave de $L/90$ y en arranques de $L/60$ (fig. 9), dimensionamiento muy normal en aquella época.

Está formado por dos cajones bicelulares, casi sin armadura longitudinal pues la compresión del arco y la forma de la sección permite que bajo las flexiones máximas, la resultante del axil no salga del núcleo central de la sección (fig. 10).

La cimbra fue un arco metálico completo, carísimo pues pensaba usarse en otros puentes similares, lo que no ocurrió.

El puente de Parramatta (1964) fue récord mundial de luz en arcos de hormigón con sus 304,7 m. Se trata de un puente con una flecha en el centro de 41,3 m lo que le proporciona una relación flecha/luz de 1/7,46 lo que le hace especialmente hermoso si no fuese por las vigas cabezal existentes sobre las pilas. El espesor en clave del arco es $L/75$ y en arranques $L/43,5$ (fig. 11).

Todo está prefabricado y cimbrado (fig. 12). Se construyó una cimbra metálica apoyada sobre soportes verticales (se dejó entre ellos un ancho mayor en un punto para el galibo de paso de barcos en el puerto Sídney).

Las dovelas se unen a 'hueso' sin ninguna armadura pasante y sólo tuvo un cosido transversal del arco por diafragmas prefabricados.

El arco está formado por cuatro cajones que soportan un tablero de vigas prefabricadas (fig. 13).

Yugoslavia

De los años 40 a los años 80 del siglo pasado, el trabajo en arcos de hormigón de un equipo formado por yugoslavos



Fig. 9. Puente de Arrábida



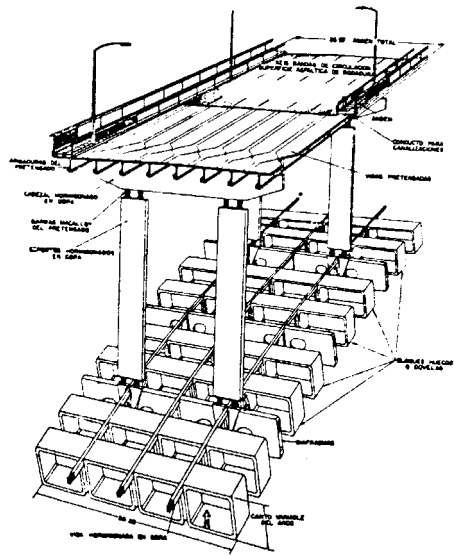
Fig.10. Puente de Arrábida. Elevación de la parte central de la cimbra metálica



Fig. 11. Puente de Parramatta



Fig. 12. Puente de Parramatta



PUENTE DE PARRAMATA L = 304.0 M (1964)

Fig. 13. Axonometría de la estructura del puente de Parramatta

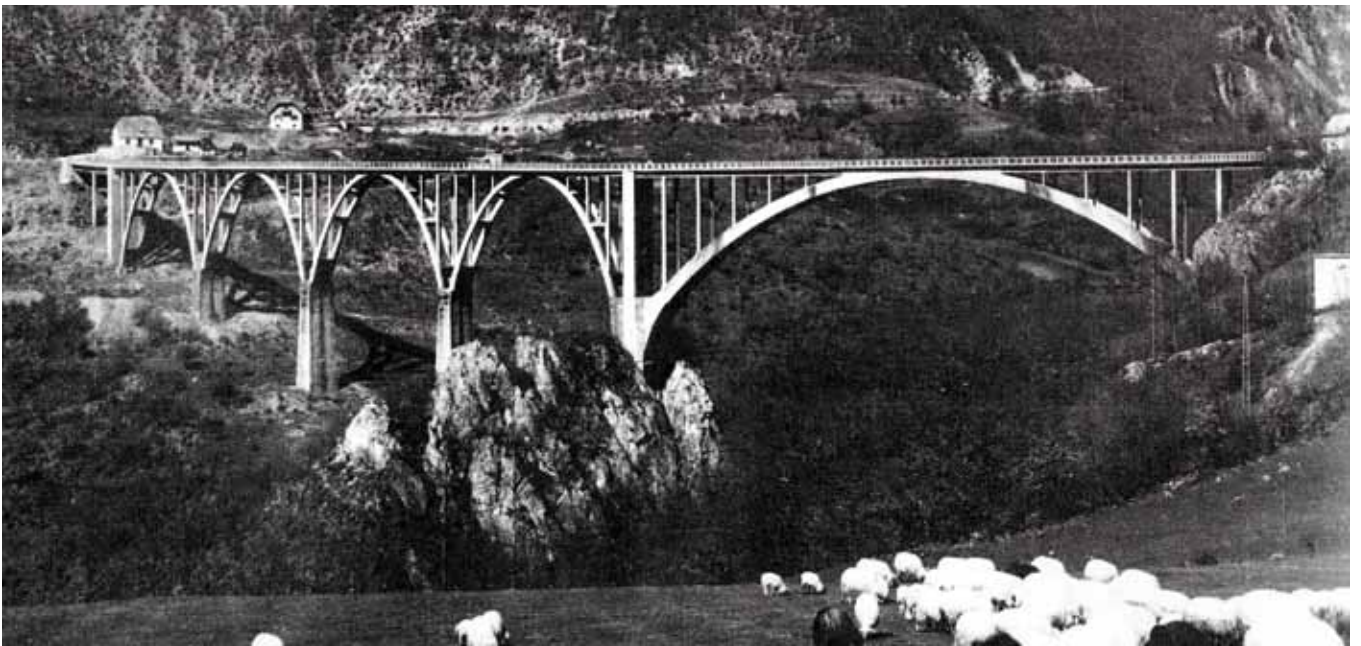


Fig. 14. Puente de Durdevica

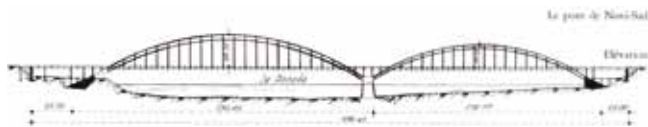


Fig. 15. Puente de Novi Sad

es formidable, no sólo batieron todos los récords sino que, además, sus puentes fueron muy hermosos.

Empezaron en 1938-40 con el puente de Durdevica sobre Tara. Se trata de un viaducto formado por cuatro arcos parabólicos de 40 y 50 m de luz que se rematan por otro arco de 136,4 m de luz (fig. 14).

Este hecho no es casual. En 1959/61 hacen el puente de Novi Sad con dos arcos intermedios de 235 y 178 m de luz sobre el río Danubio (fig. 15). Es uno de los pocos puentes arco de hormigón con tablero intermedio.

Para la ejecución de este puente no se utilizó cimbra alguna sino que se construyó en avance en voladizo atirantado con un pequeño carro que hormigonaba los arcos.

A continuación, en 1964-66 construyen el puente de Sibenik de 246 m de luz y una flecha de 30,3 m $f/L=1/8$ (fig. 16).

El puente de Pag es de 1964-66 tiene 193 m de luz, 27,5 m de flecha y una relación flecha/luz de 1,7 m.

Finalmente, de esta familia el más importante es el puente que une Croacia con la isla de Krk formado por dos arcos separados por un promontorio, el más grande, récord mundial durante muchos años, de 390 m de luz, y el más pequeño



Fig. 16a. Construcción del puente de Sibenik



Fig. 16b. Julio Martínez Calzón y Miguel Aguiló ante el puente de Sibenik

de 244 m de luz (fig. 17), ambos construidos por avance en voladizo atirantado, con unos atirantamientos curiosos pues, para no levantar mucho la torre, se quebró el tirante que sostiene las partes más adelantadas.

También en Yugoslavia, pero en Serbia, se encuentra el puente sobre el río Tisa, puente arco con tablero inferior de 154 m de luz y tipo Maillart a la inversa, con el arco superior muy delgado, 0,7 m de espesor, y el tablero grueso para absorber las flexiones de las cargas no funiculares (fig. 18). Otro raro puente de hormigón en tablero inferior.

República Sudafricana

Entre los años 1980-1987 del siglo pasado, se construyen tres arcos excepcionales en la república sudafricana. El



Fig. 17a. Puente de la isla Krk



Fig. 17b. Puente de la isla Krk

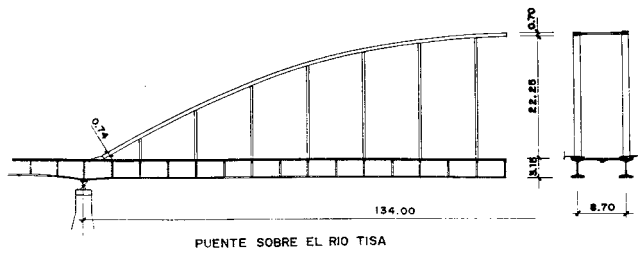


Fig. 18. Puente sobre el río Tisa



Fig. 19a. Puente de Bloukrans

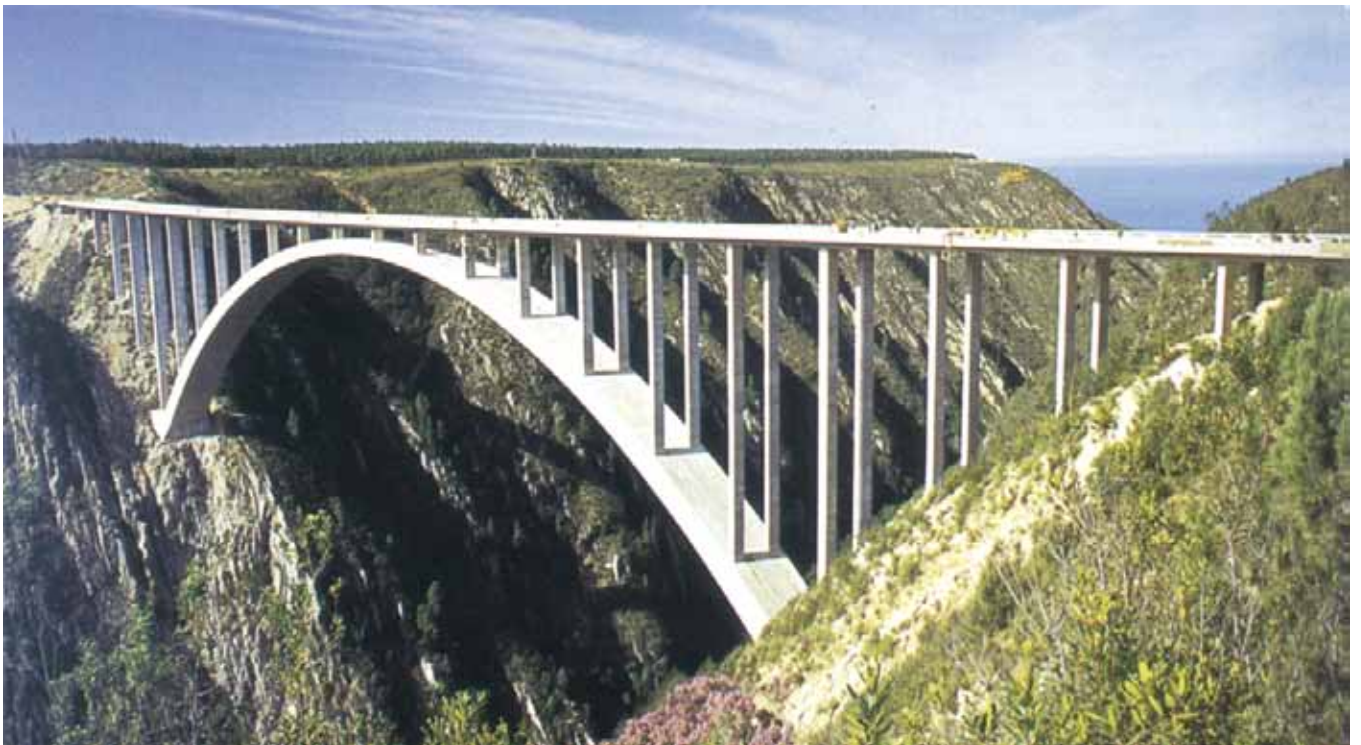


Fig. 19b. Puente de Bloukrans



Fig. 20. Puente Romita

puente sobre el Bobbejans de 165 m de luz y 34 m de flecha, el puente sobre el Groot de 189 m de luz y 33 m de flecha y el más grande de todos el puente sobre el Bloukrans de 272 m de luz y 62,00 m de flecha. Este último se desarrolla a 216 m sobre el lecho del río Bloukrans y los otros dos a 170 m (fig. 19).

Todos los puentes tienen la misma morfología, sección cajón completa para el arco construido en avance en voladizo y doble pila para soporte del dintel separados 19 m entre sí, en sentido longitudinal.

Directrices singulares

El puente arco clásico con directriz curva antifunicular de una carga más o menos uniformemente repartida empieza a no ser indiscutible. Existe una frontera, a veces difícil entre los arcos y los pórticos de patas inclinadas cuya geometría es bastante funicular. Silvano Zorzi (1921) realiza dos puentes arco sobre el Arno que corresponden a este nuevo planteamiento. El puente Romita sobre el Arno (1964), de 136 m de luz, sigue una directriz poligonal (fig. 20) que canaliza perfectamente las compresiones de arco poligonal. Las vigas prefabricadas utilizadas tienen 36 m de luz.

Lo mismo podemos decir del arco puente sobre el río Bacunayagua de 114 m de luz (fig. 21), en Cuba (1962), de L. Sánchez J. R. Cancio, cuya construcción se realizó girando la cimbra metálica sobre la que se hormigonó (fig. 22)

Otra obra más compleja, también de Silvano Zorzi, es el puente sobre el río Arno (fig. 23), de 112 m de luz y construido en 1963.



Fig. 21



Fig. 22



Fig. 23

Con esta configuración resuelve bien el problema que ocurre en todo puente arco cuando es pequeño, en los cuales el antifunicular curvo obliga a una separación de pilas muy pequeña que no encaja bien con un diseño adecuado de los tramos de acceso. Aquí Zorzi utiliza una luz de 36 m para las vigas, el arco se convierte en un pórtico con pilas inclinadas algo curvas que lo asemejan a los arcos. Recordando la pasarela sobre el torrente del Llusia (fig. 5), Morandi hace lo mismo. Es un puente nuevo y muy hermoso.

En el puente sobre el Glen (fig. 24), de 114 m de luz, el dintel en lugar de ser prefabricado como los de Zorzi, es una viga cajón continua, peor diseñado a mi entender.



Fig. 24



Fig. 25a . Puente de Natchez



Fig. 25b. Puente de Natchez

Un planteamiento similar se encuentra en el puente de Santiago, en Zaragoza, de Tomas Mur, con vanos de 65 m.

En el Natchez Bridge (fig. 25), de 1995, los dos arcos de 177,4 m y 140,8 m tienen cada uno dos únicos apoyos para soportar el tablero de sección cajón. Toda la obra está realizada por dovelas prefabricadas y los arcos construidos en avance en voladizo con dovelas de 5 m de anchura y canto de 3 m en clave y 4 m en arranques. El dintel varía entre 4,4 m de canto en el apoyo en el arco y 2,3 m en el centro del vano.

Otra disposición heterodoxa y que nosotros hemos utilizado en algunas ocasiones se configura en el puente Juan de Austria de 120 m de luz, de 1986 (fig. 26).

La forma responde también al mismo principio, hacer los vanos de acceso grandes y el arco compensado visualmente. No como en el puente de Glen (fig. 24), donde no existe



Fig. 27

ninguna intención de hacer un todo conjunto sino todo lo contrario, por un lado el arco y por otro el dintel.

Un viaducto de ferrocarril absolutamente fundamental para muchas obras del AVE y que inició toda una tipología es Alemania (fig. 27), en el que se utiliza un arco apuntado que



Fig. 26



Fig. 28. Viaducto sobre el río Deza

en unos casos sirve para absorber frenado o en otras y, además, para cruzar algún obstáculo importante. En este caso, el arco apuntado determina los mismos luces estándar en el viaducto de acceso que en el vano principal, con lo cual empujar el tablero se realiza sin problema complementario. En el viaducto sobre el río Deza, en Orense, de 1.175 m de longitud y 75 m de luz normal y 150 m de luz en arco, es uno de los muchos ejemplos realizados en España (fig. 28).

Tres arcos tipo Maillart

Empezamos por un clásico, el puente de Viamala sobre el Rin en Suiza de Christian Menn de 86 m de luz (fig. 29). Este puente está mejor equilibrado visualmente que los de Maillart, pues los arcos, delgados, y el dintel grueso para recoger la rigidez del puente ante las sobrecargas, están mejor que los de su maestro. Christian Menn ha construido muchos otros puentes de este tipo como los del acceso sur del paso de S. Bernardino de 112 m de luz.

El segundo es el puente Infante D. Enrique, en Oporto, de F. Millanes, Fernández Ordoñez y Aldao da Fonseca, es muy grande,



Fig. 29. Puente de Viamola



Fig. 30. Puente Infante D. Enrique



Fig. 31

280 m de luz y es el típico puente de arco delgado y dintel grueso (fig. 30), se construyó por avance en voladizo triangulando los trapecios configurados por pilas, arco y dinteles.

Asombra un poco su encaje en el terreno estando situado entre el puente S. Luis, de Seyrig, y el puente de Eiffel, los dos van a cimentar al río, mientras que éste se queda colgado en la parte superior (fig. 31).

El tercero es un puente, el puente de S. Sebastián (2006) en México, de Leonardo Fernández Troyano. Tiene 137 m de luz y el problema es el mismo que Maillart se planteó en Salginatobel (fig. 32). Naturalmente, los años han pasado,



Fig. 32. Puente San Sebastián



Fig. 33. Puente de los Tilos

70 exactamente, y los medios y posibilidades también. La gigantesca cimbra de madera se sustituyó por un arco metálico montado con un blondin y se elimina la palizada entre arco y tablero del puente de Maillart.

Dos maneras de construir un arco en avance en voladizo

En el puente de los Tilos (fig. 33), de 255 m de luz, arco clásico, precioso, de Santiago Pérez-Fadón y en el puente de Hokawatsu de 170 m de luz (fig. 34), triangulan los trapecios haciendo una celosía completa que funciona muy bien, procedimiento utilizado por muchos puentes en España.

Tiene una variante en la cual no se realiza el dintel para poder crear la viga en celosía, sino que se hace una triangulación artificial como en el viaducto de Almonte, de C. Siegrist, con 185 m de luz (fig. 35).

El segundo procedimiento consiste en mantener el atirantamiento por medio de una torre artificial que mantenga la inclinación de los tirantes (fig. 19).

Tres puentes grandes

El puente Waxian sobre Yanstze, de 420 m de luz, de 1997 (fig. 35), es el mayor puente arco de hormigón del mundo. Se realizó con una autocimbra de tubos que se hormigonó a la manera en que trabajaba Ribera (fig. 36).

El puente de la Regenta de J. J. Arenas fue el primer puente arco grande construido en España, tiene 190 m de luz y fue construido en avance en voladizo triangulando los trapecios.

El puente sobre el embalse de Contreras tiene 264 m de luz y se construyó en 2009. Tiene todo lo que entendemos por un hermoso puente arco, fig. 37, es muy poco peraltado, la relación $f/L = 1/6,8$.



Fig. 34. Puente Hokawatsu



Fig. 35. Viaducto de Almonte

El dintel es continuo, con las mismas luces cuando discurre sobre el terreno o sobre el arco, lo que sólo se puede hacer cuando los arcos son bastante grandes. Es delgado, con el canto del arco próximo al $L/100$, una sola pila en sección transversal para evitar el cruce visual de pilas en la visión oblicua (fig. 38). Incluso es ligeramente poligonal para significar la acción de la pila sobre el arco.

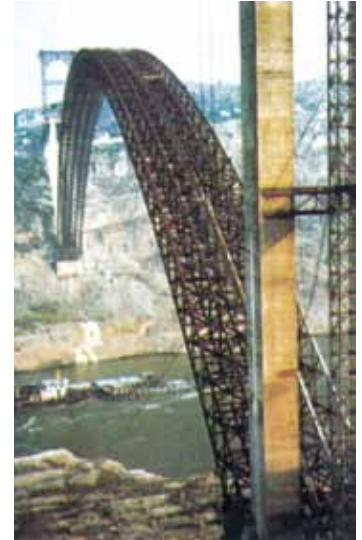


Fig. 36. Puente de Waxian



Fig. 37. Puente de Contreras



Fig. 38. Puente de Contreras

La construcción se realiza en avance en voladizo con un voladizo más corto que la longitud del semiarco pues tuvimos la suerte de que el pantano de Contreras estaba muy bajo y se pudo cimentar la pila provisional que ahorró mucho atirantamiento (fig. 39). Además, la ejecución no experimentó retraso ni encarecimiento.

Puentes de hormigón con tablero inferior

Es muy poco frecuente este tipo de puentes en hormigón, el arco hay que cimbrarlo normalmente sobre un tablero que también está cimbrado. Alguna vez se ha hecho construyendo el arco en voladizo y después colgar allí el tablero. Los dos puentes que presento, uno pequeño y otro grande, se construyeron de la primera de las maneras indicadas.

El puente de Alcantarilla está constituido por un viaducto muy largo que se desarrolla sobre la zona inundable al río Segura en Alcantarilla. El viaducto se ordena según dos losas aligeradas de 33,5 m de luz y 1,3 m de canto. Cuando se llega al río Segura, la luz debe crecer hasta 66 m. Como queríamos mantener el dintel le añadimos un arco superior de hormigón (fig. 40).

El arco se sitúa en el eje de los dos dinteles y es necesario disponer un tejido transversal de vigas (fig. 41) que transmiten la carga de los dinteles al arco. Como los dinteles son continuos, al llegar al apoyo del arco descargan al mismo de parte de la carga de los dos dinteles en las proximidades al apoyo y el tejido de vigas transversales puede reducirse. Los tirantes están recubiertos por camisas de acero inoxidable y el apoyo provisional del dintel formado por parejas de pilas provisionales se volaron para descimbrar –después de haberlos despegado del dintel– (fig. 42).

El puente de la exposición de Zaragoza 2008 de J.J. Arenas es un puente formidable y de una gran luz $L= 215,6$ m. Sigue el ejemplo que ya desarrolló con M. Pantaleón para el puente de Sevilla de la Expo, pero agrandándolo y ensanchándolo, confiriéndole monumentalidad característica a que es proclive el Prof. Arenas (fig. 43). A la anchura necesaria para un puente de autopista le ha añadido unas aceras generosas que ha cubierto con gran maestría. El dintel se construyó empujándolo sobre apoyos provisionales sobre el que se cimbró el arco y su descimbramiento se realizó por apertura en clave, fig. 44



Fig. 39. Construcción del puente de Contreras



Fig. 40. Puente de Alcantarilla



Fig. 41. Puente de Alcantarilla



Fig. 42. Voladura del puente de Alcantarilla



Fig. 43. Puente del Tercer Milenio

Dos puentes arco que no son arcos

El puente Rij en Australia tiene tres luces de 73 m +183 m + 73 m con dos articulaciones deslizantes en el centro del arco donde acaban las triangulaciones (fig. 45).

Realmente se diferencia de otros puentes triangulados como el mismo puente de Veurdre (fig. 31, 1ª parte) de Freyssinet, en la articulación deslizante del dintel. Si Freyssinet hubiese unido entre sí los tableros de sus tres arcos, tendríamos un puente continuo en celosía sin apenas empuje horizontal sobre los cimientos, pero los dejó con articulaciones deslizantes y el mismo mecanismo de trabajo que le quedó es funcionar como arco. También es la configuración resistente



Fig. 44. Puente del Tercer Milenio



Fig. 45. Puente Rij



Fig. 46. Puente Rij



Fig. 47. Construcción del puente Rij

de todos los arcos construidos en avance en voladizo cuando se triangulan los trapecios. Toda la estructura es prefabricada y construida en avance en voladizo (fig. 46, 47).

El segundo puente arco que no es arco es nuestro puente de Zamora configurado por tres luces centrales sobre el río de 90 m y dos laterales en la margen derecha (fig. 48). Nuestra primera intención, bueno la segunda, fue hacer una arcada múltiple a imagen del puente viejo medieval de Zamora situado a menos de 1 km aguas arriba.

Pero vimos que si a esa arcada se le daba continuidad con pretensado por el cordón superior se convertía en una viga cajón de canto variable que no introducía esfuerzos horizontales en cimientos. La elección no fue difícil y construimos un dintel continuo en voladizos sucesivos (fig. 49) con carros de avance normales.

El puente presenta varias particularidades que no afectan al tema de que estamos tratando (fig. 50). **ROP**



Fig. 48. Puente de Zamora



Fig. 49



Fig. 50