

Los primeros arcos de hormigón



Javier Manterola Armisén

Doctor ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

Consejero delegado de CFCSL

Resumen

Se hace referencia a la construcción de arcos de hormigón desde los años 30 a la actualidad. El hormigón armado es el material idóneo para la construcción desde arcos pequeños, los primeros de Ribera que apenas pasaban los 30 m. de luz, hasta los actuales de más de 300 m., 384 m. el cruce del río Almonte en su desembocadura en el embalse de Alcántara. La formidable evolución en procesos constructivos (piedra angular de la construcción de arcos) ha garantizado que se puedan construir los arcos que hoy en día se construyen. Si el pretensado parecía que iba a hacer desaparecer a los arcos de hormigón en los años 60 y 70 al siglo pasado, la realidad ha constatado la formidable firmeza de los arcos de hormigón.

Palabras clave

Arcos, hormigón, armado, voladizos sucesivos, movimiento de traslación y giro, fluencia y retracción

Abstract

The construction of reinforced concrete arches from 1930 to nowadays is shown. Reinforced concrete material is appropriate for the construction of small arches, from a 30 m span initially designed by Ribera to modern arches with span lengths greater than 300 m like the bridge over the Almonte river reaching the Alcántara reservoir. The great evolution in the construction procedures of arches (key features in the construction of arches) has allowed the construction of all modern arch bridges. During the years 60 and 70 of last century, it was thought that prestressed concrete technology would produce the extinction of concrete arches but reality has shown the strength of concrete arches technology.

Keywords

Reinforced concrete arches, free cantilever construction, translation and rotation movements, creep and shrinkage

Este tema es extraordinariamente largo, pues los grandes puentes se hacían con arcos de hormigón, todos nuestros mayores eran formidables constructores de arcos. Hemos decidido dividir el tema en dos partes y el punto de separación es claro, la aparición del pretensado después de la Segunda Guerra mundial que casi supone la desaparición de los arcos como solución a las grandes luces. Pensemos que el puente de Bendorf sobre el Rin, llevó los dinteles rectos hasta los 208 m de luz. Pero poco a poco el puente arco ha ido recuperándose y hoy en día vuelve a tener gran actualidad, tanto formal, como resistente y económica.

El hormigón en masa y después el hormigón armado constituyen los materiales con los que la construcción reencuentra la tradición de la construcción con piedra y que había durado más de 2.000 años. La revolución industrial, que se produce a finales del siglo XVIII y principios del siglo XIX y que se prolonga hasta hoy en día, había traído el hierro y el acero como materiales clásicos de construcción.

Esto significó que todo el entendimiento del hecho constructivo cambió totalmente. La aparición del acero destruyó el concepto que se había configurado de la construcción a lo largo de tantos siglos. Las formas cambiaron de tal manera que profesiones enteras, como la de los arquitectos, quedaron fuera; tan fuerte era la identificación de la construcción con las formas y maneras de unir producida por la arquitectura en piedra.

A finales del siglo XIX, principios del XX, aparecen el cemento Portland y el hormigón, que permitieron recuperar no la forma de construir con piedra pero sí la configuración de lo construido con materiales pétreos. Muchos ingenieros no entendieron la gran revolución que se produjo al tratar con el hierro y el acero en su deseo de construir y se reconciliaron con lo moderno cuando apareció el hormigón.

Pensemos que M. Seyourne, con su enorme habilidad y talento, prolongó los puentes de piedra hasta 1911, como el



Fig. 1. Puente de Torre Montalvo



Fig. 2. Puente sobre el Tajo

puente de los Catalanes, en Tolouse, lo cual le convierte en el mayor ingeniero anacrónico de la época moderna.

En España también se cometieron desaguisados anacrónicos como el puente del Cabriel (1849) de Lucio del Valle o el puente de piedra de Logroño (1882).

Puentes de hormigón en masa

Aunque generalmente no sobrepasen los 40 m de luz, en España se construyeron bastantes bóvedas de hormigón en masa por su reducido coste frente a los puentes de sillería. Ribera decía que, con este material, los puentes no debían pasar de esta luz.

Un ejemplo de ellos es el puente de Torre Montalvo sobre el río Najerilla, terminado en 1926, del ingeniero D. Francisco Castellón. Consta de cinco arcos parabólicos de 30 m de luz y rebajamiento 1/4 (fig. 1). La transmisión de carga del tablero al arco se hace por tabiques transversales.

Se hicieron muchos puentes de hormigón en masa para las líneas de ferrocarril –pues los ingenieros de entonces se fiaban más del hormigón que del acero–, como el construido en Alcántara, sobre el río Tajo, en la línea de Madrid-Valencia, y formado por 15 bóvedas de 21 m de luz (fig. 2). Pero, indiscutiblemente, el puente de hormigón en masa más importante del mundo es el de Villeneuve-sur-Lot (1919), de

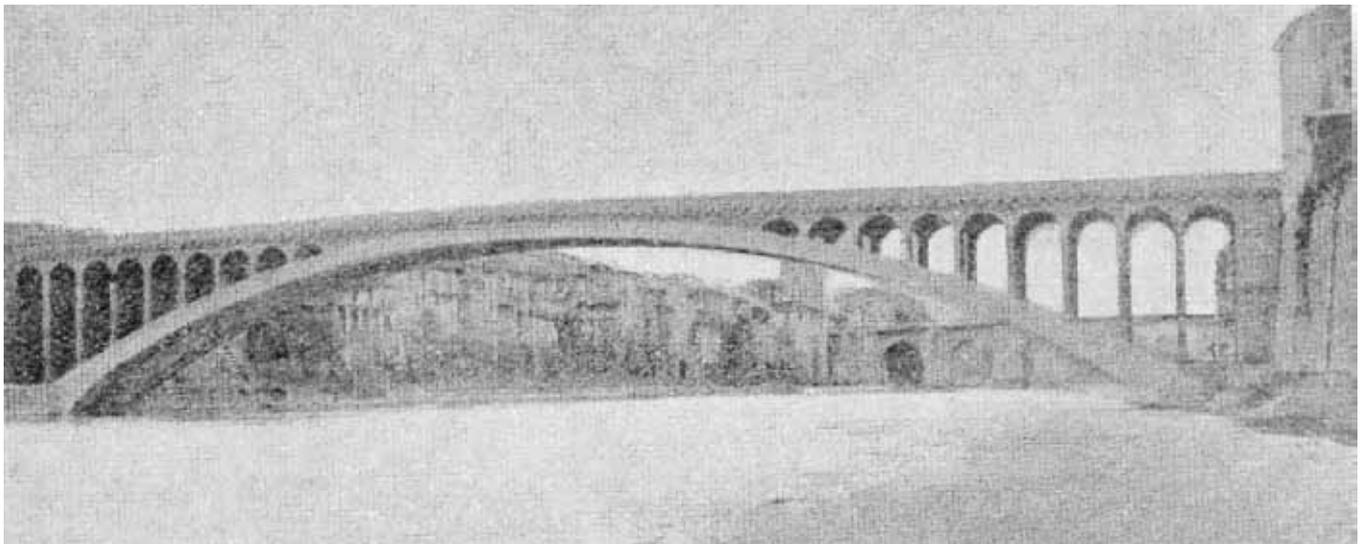


Fig. 3. Puente de Villeneuve-sur-Lot

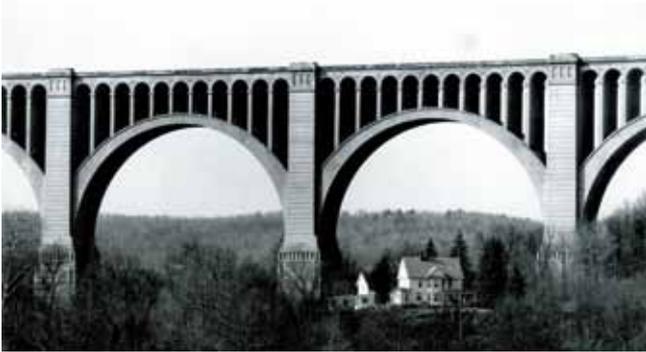


Fig. 4. Puente de Nicholson



Fig. 6. Autocimbra de Melan

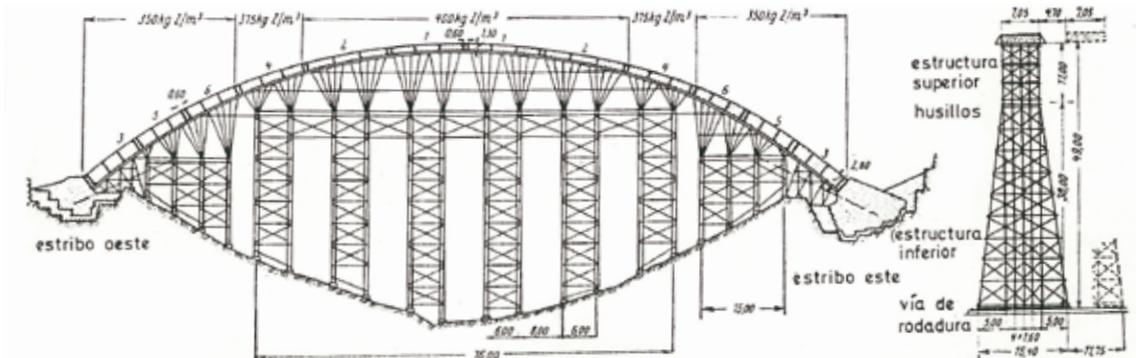


Fig. 5. Puente sobre Tenfelstal

98 m de luz, formado por dos arcos gemelos de hormigón en masa con tímpanos transversales de ladrillo y tablero de hormigón armado, cuyo autor es Freyssinet (fig. 3).

En los Estados Unidos existen muchos puentes de hormigón en masa como el puente de Nicholson (1916), de 680 m de longitud y que está constituido por diez arcos de 54,8 m de luz (fig. 4).

Todos estos puentes se construyeron sobre cimbras.

Puentes de hormigón armado

El puente arco constituye la única estructura posible para saltar grandes luces a principios del siglo XX. Su gran problema residía y reside en su construcción, pues hasta que no está terminado el arco necesita para resistir de grandes cimbras, de madera normalmente, cimbras cuya ejecución fue casi siempre el problema principal a resolver (fig. 5). Generalmente, se resolvían con andamios de madera o de

hierro apoyados en el suelo y se interponían gatos hidráulicos en puntos intermedios para poder descimbrarlos.

En 1892, el ingeniero austriaco Joseph Melan patenta un sistema de construcción consistente en la utilización de cimbras metálicas rígidas, embutidas dentro de los arcos, que servían como soporte para el encofrado y la armadura para el hormigón armado (fig. 6). Este sistema, que permitía eliminar las grandes y pesadas cimbras desde el suelo, fue utilizado mucho en España por José Eugenio Ribera, en desarrollo paralelo a la invención de Melan. En la figura 7 se observa la disposición típica de muchos puentes de Ribera con tabiques transversales y forjados de hormigón armado apoyándose en la cimbra metálica hormigonada.

Jose Eugenio Ribera (1864-1936)

Ribera fue funcionario, proyectista, constructor y profesor, además de uno de los grandes ingenieros que tuvimos en el cambio de siglo. Si bien no fue el primero que utilizó el hormigón en

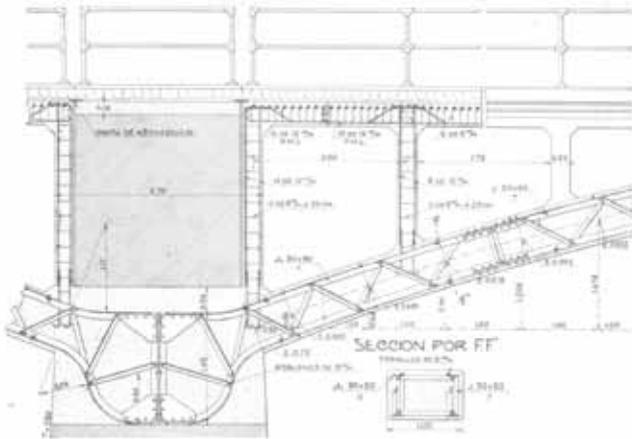


Fig. 7. Disposición constructiva de Ribera

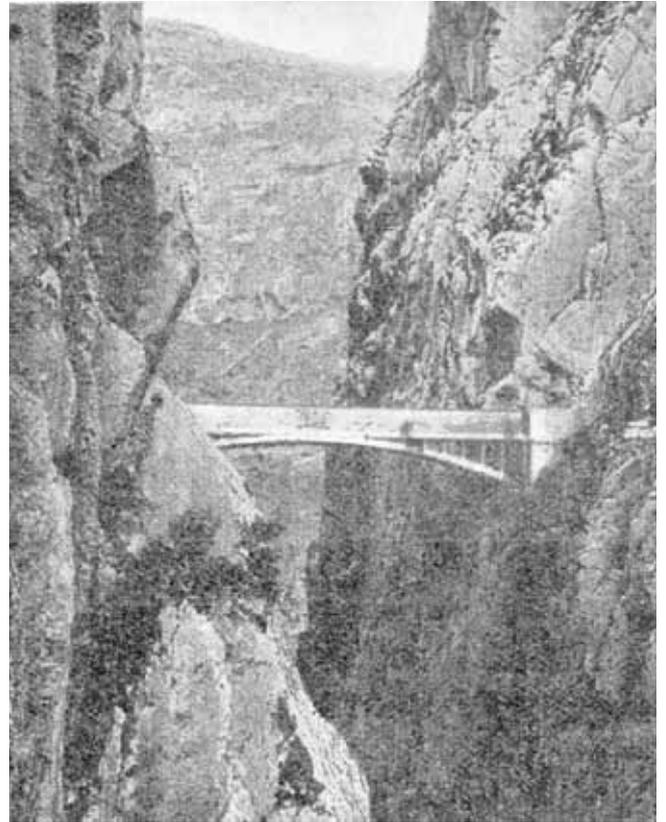


Fig. 9. Acueducto del Chorro

España, sí fue el primero que hizo un puente con este material, el puente de Golbaro (fig. 8), de 1900. Se trata de un puente arco de 30 m de luz, rebajamiento 1/10, formado por dos arcos individuales de 0,5x0,6 dentro de los cuales introduce dos perfiles metálicos en doble 'T' –de 200x90x11,5x7,5– que sirven de soporte del hormigón de los arcos. Los arcos metálicos necesitaron una pequeña cimbra para ser montados.

Parece que Ribera se arrepintió de la pequeña rigidez de estos arcos, lo que llevó a hacerlos mayores en trabajos posteriores.



Fig. 8. Puente de Golbaro

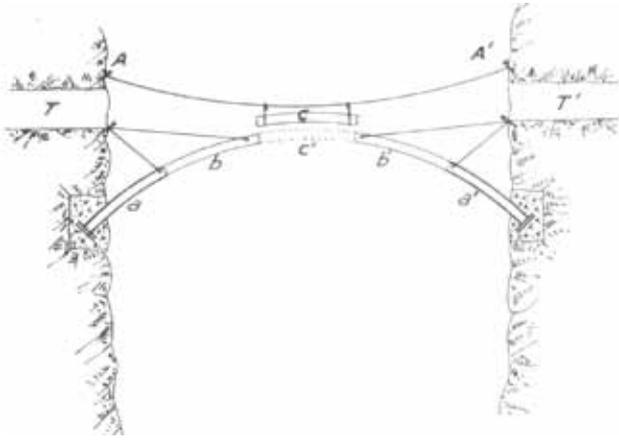


Fig. 10. Autocimbra del acueducto del Chorro

En el acueducto del Chorro (fig. 9), de 1904, Ribera utiliza un arco de toda la anchura del canal, 8 m, por 0,4 m de canto, dentro del cual ha hormigonado la autocimbra metálica constituida por ocho vigas doble 'T' de 0,24 m de canto que, montada con ayuda de un blondín (fig. 10), sirve de soporte al arco de hormigón que rodea las vigas.

El puente de María Cristina (1901-1904) está constituido por tres arcos de 30 metros de luz con rebajamiento 1/11 (fig. 11).

Se realizó una cimbra rígida para soportar la tabla de hormigón que se extiende a todo el ancho del puente. Se dispusieron tabiques longitudinales, de 20 cm de espesor, separados 1,5 m, en los cuales se dispuso la armadura rígida sobre la cual se hormigonó una tongada de 0,25 m que, una vez endurecida, sirvió para colaborar con la autocimbra en el soporte del hormigón posterior. Este puente está excesivamente decorado, medida que Ribera no controlaba bien.

Un proyecto similar es el que realizó, en Valencia, el puente de Don Juan, pero disponiendo cuatro arcos de 30 m de luz y tabiques longitudinales similares al de María Cristina (fig. 12).

En el puente de la Reina Victoria (1909), Ribera introduce una serie de variantes respecto al de María Cristina que van a constituir un prototipo de puente que repetirá con frecuencia.

El río Manzanares (fig. 13) lo salta con arcos de 30 m de luz y además individualizados en dos arcos bicelulares de 2,8 m de anchura, colocados en el borde del tablero que se unen con una serie de vigas transversales separadas 1,52 m y coincidentes con las pilas que unen los arcos con el tablero.

Según el mismo Ribera comenta, la eliminación de una bóveda de toda la anchura por dos vigas se hace a imitación de las

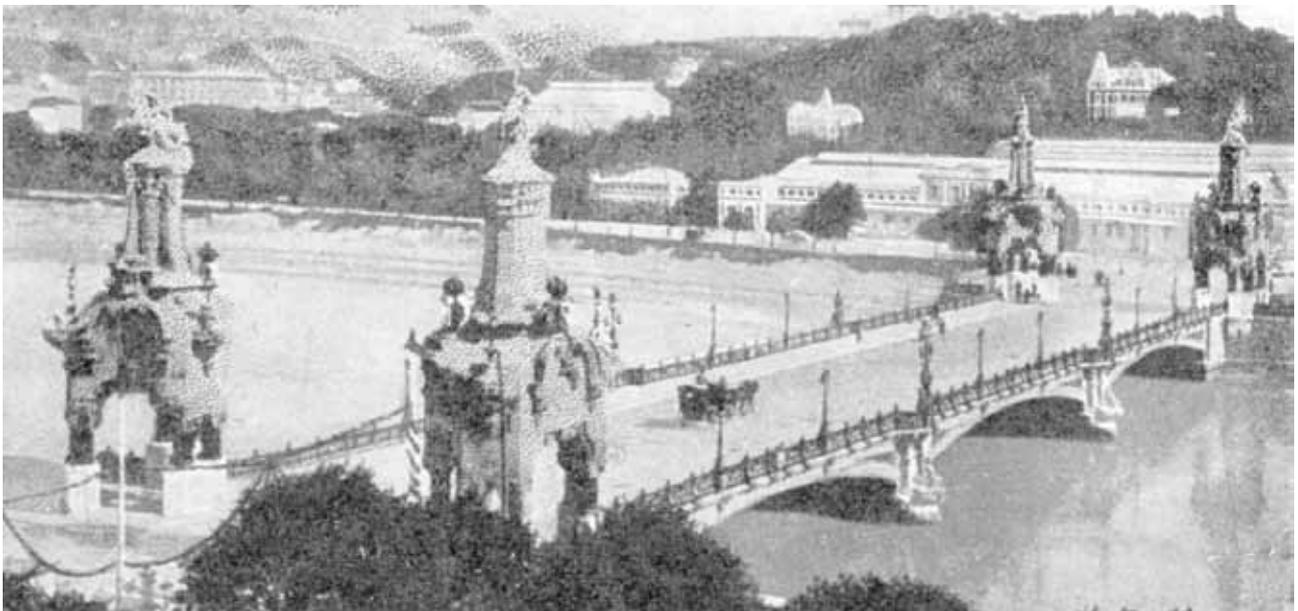


Fig. 11. Puente de María Cristina

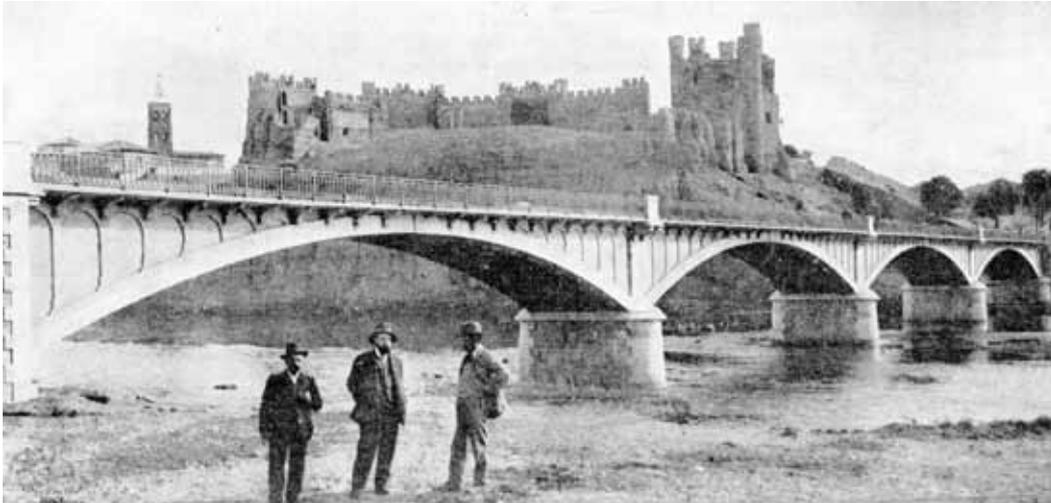


Fig. 12. Puente de Valencia de Don Juan

propuestas que en Francia había realizado Seyourné en el puente de Luxemburgo y el de los Catalanes, en Toulouse.

Estos arcos tienen una cimentación importante sobre el río para recoger los fuertes empujes horizontales de los arcos, pues el rebajamiento de los arcos es enorme para intentar acoplar su rasante a las orillas del río. Este hecho se reproduce en muchos puentes de hormigón armado de la época. A continuación de los arcos, se disponen dos tramos rectos horizontales a cada lado.

Idéntica disposición general adopta Ribera en el puente de Barranco Hondo, en Tenerife (fig. 14).

Junto con el puente de S. Telmo, en Sevilla, con dos arcos laterales y un tramo móvil en el centro –ahora convertido en un pórtico rígido–, Ribera hace muchos puentes similares a los descritos. Hace también una colección de puentes oficial que será seguida por muchos proyectistas en España.

Finalmente, quiero citar el puente de Gaznata, formado por cuatro arcos peraltados de 25 m de luz seguido por cinco tramos rectos de 11,5 m de luz, cuatro por un lado y uno por el otro. La autocimbra rígida se subió por luces completas desde el suelo. Este viaducto da lugar a una serie de viaductos altos muy imitados también (fig. 15).

Otros ingenieros españoles

Fernando Hue (1871-1935) fue el responsable del viaducto Viejo o viaducto Fernando Hue (1929), de Teruel, su obra más importante. Tiene 79 m de luz y 26,5 m de flecha



Fig. 13. Puente de la Reina Victoria



Fig. 14. Viaducto sobre Barranco Hondo

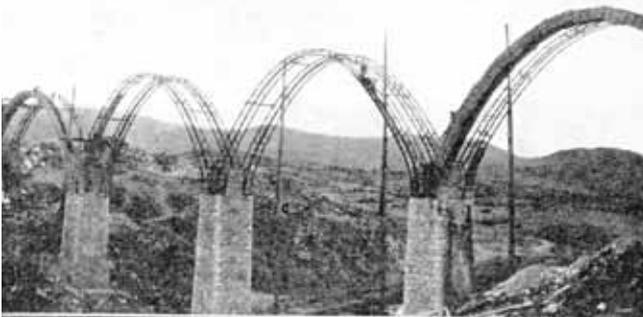


Fig. 15a y 15 b. Puente de Gaznata



Fig. 16. Viaducto de Teruel

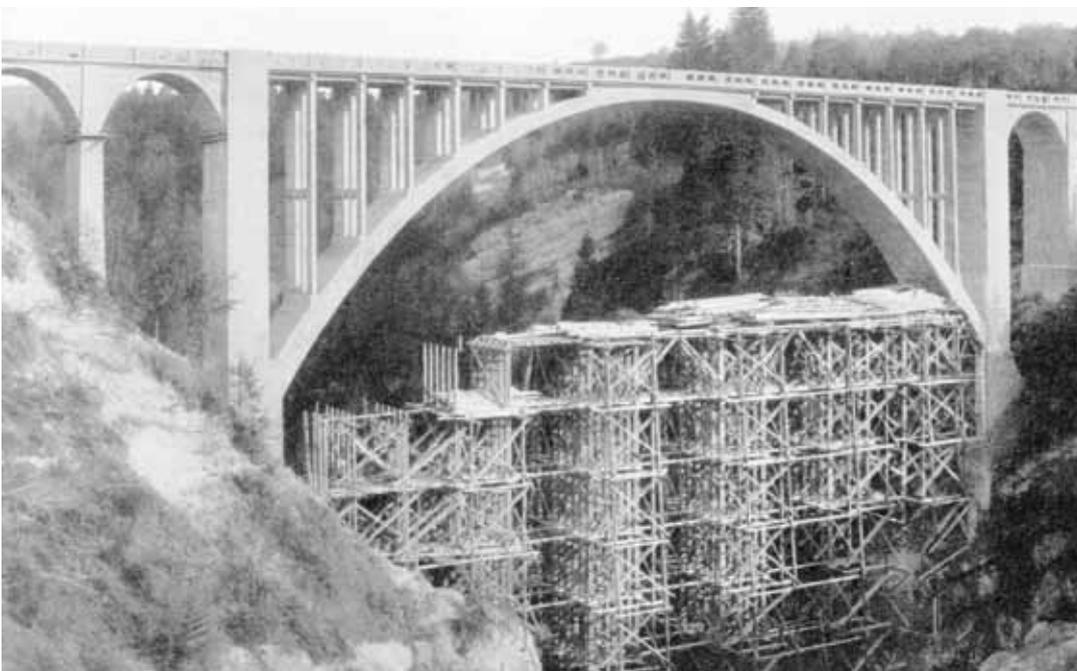


Fig. 17. Cimbra del puente de Gmundertobelbrucke

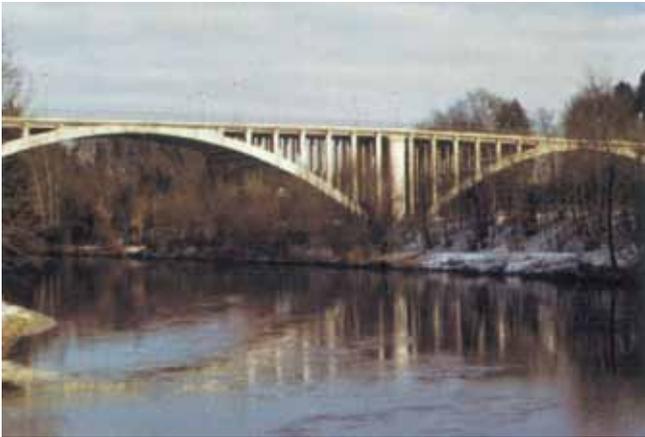


Fig. 18. Puente de Isarbrücke



Fig. 19. Puente de Bixby

(fig. 16). Este viaducto sigue al famoso viaducto de Sitter, de E. Mörsch, construido en 1908.

Conviene aquí detenerse en el gran ingeniero alemán Emil Mörsch (1872-1950), proyectista, docente, investigador, etc. Es el creador del Gmündertobelbrücke (fig. 17), de 1908, y del Isarbrücke cerca de Grunwald (fig. 18), de 1903-1904, con dos vanos en arco de 70 m. Se trata de dos puentes que establecieron la pauta a seguir en los grandes viaductos de hormigón. El mismo Fernando Hue justifica su viaducto de Teruel porque es igual al de Mörsch (fig. 18), con la misma luz 79 m y la misma flecha 26,5 m.

Mörsch tiende a separar en el puente arco, principal de los viaductos de acceso, interponiendo una gran pila rígida que va a soportar los empujes de la arcada lateral de mucha menos

luz y separada del principal por una junta. En el puente sobre el Isar, la dispone igual aunque separa dos arcos iguales.

En España, además del puente de Teruel de Fernando Hue, siguen la misma morfología puentes como el de Martín Gil, construido por Torroja o todos los puentes grandes de Ribera, quien no dispone arquillos en los vanos de los viaductos de acceso sino tramos rectos, como ya hemos visto en el puente de Tenerife del Barranco Hondo, el de la Reina Victoria de Madrid, etc.

Y eso, a mi entender, no está bien. La discontinuidad introducida entre el arco principal y los tramos de acceso sólo puede deberse a la dificultad de calculo que podría presentar la continuidad natural del viaducto de acceso con la palizada dispuesta sobre el arco principal.

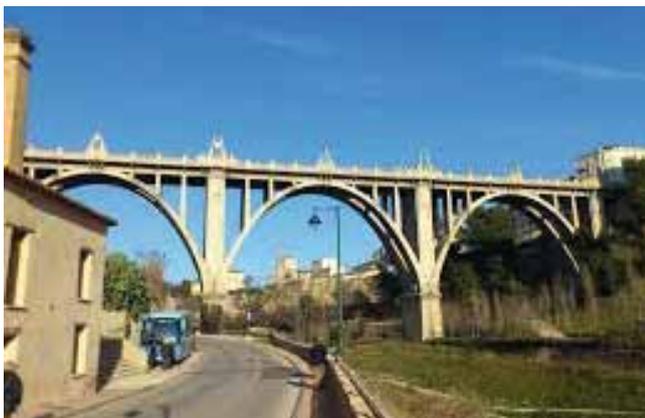


Fig. 20. Viaducto de San Jorge de Alcoy

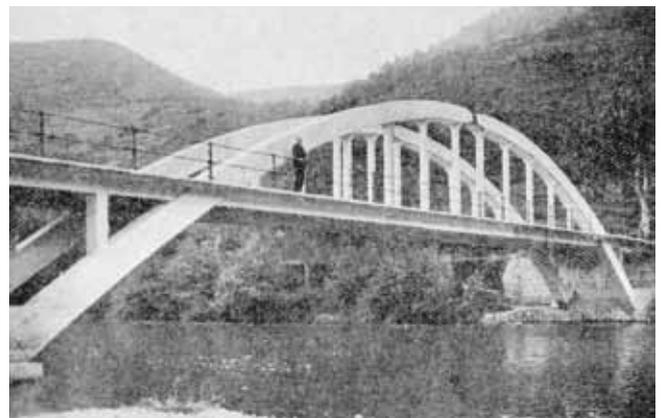


Fig. 21. Puente de Requejo

Hay muchos puentes así distribuidos por el mundo y de ejecución posterior al de Mörsch. El puente de Bixby (fig. 19), en la costa californiana del Pacífico responde al mismo planteamiento. Tiene dos arcos paralelos de 85 m de luz y fue construido en 1931-33.

De la misma época tenemos en España el viaducto de S. Jorge de Alcoy (1931), con proyecto de los ingenieros de Caminos, Carmelo Monzón y Vicente Redón, con la colaboración de Peña Benuf (fig. 20). Está constituido por tres arcos parabólicos de 45,5 m de luz con 12 m de anchura. Su altura alcanza los 42 m. Su tecnología es muy distinta a los ejemplos de Mörsch. Es una arcada múltiple, empotrada y formada por dos arcos separados. Sigue los modelos de puente de Ribera. A los arcos les siguen tramos rectos a la manera de Ribera.

En España se proyectaron en los años 30 muchos puentes con tablero inferior e intermedio. El puente de Requejo sobre el Narcea (fig. 21), de 1930, tiene 41 m de luz y una articulación en la clave del arco, cuya existencia justifica su autor, Ildefonso Sánchez del Río, por una serie de razones de dudosa eficacia.

Puente del Risorgimiento (1910)

La tecnología italiana fue muy buena y activa en el desarrollo de los puentes arco de hormigón. El puente del Risorgimiento (fig. 22), de 1910, constituye con sus 100 m de luz, el máximo logro en una fecha tan temprana. El puente tiene 20 m de anchura.

Existen dudas respecto a su autoría, los italianos adjudican el proyecto al ingeniero Porcheddu y a su asistente, el ingeniero Emilio Giay, mientras que los franceses consideran que es el máximo logro de Hennebique. Lo que sí parece seguro es que éste supervisó los cálculos.

El puente se realizó sobre cimbra y está constituido por siete tabiques longitudinales, con 0,85 m de espesor en clave, 20 cm pertenecientes a cada una de las losas superior e inferior y 45 cm de alma. La cimentación se realizó sobre pilotes.

Otros muchos puentes, y de todo tipo y tamaño, realizaron los italianos. Conviene señalar dos por sus especiales características como el viaducto de Intra configurado por tres arcos de 30 m de luz y un ancho total de 7,8 m. La flecha de los arcos es de 5,9 m (fig. 23). Su configuración es es-

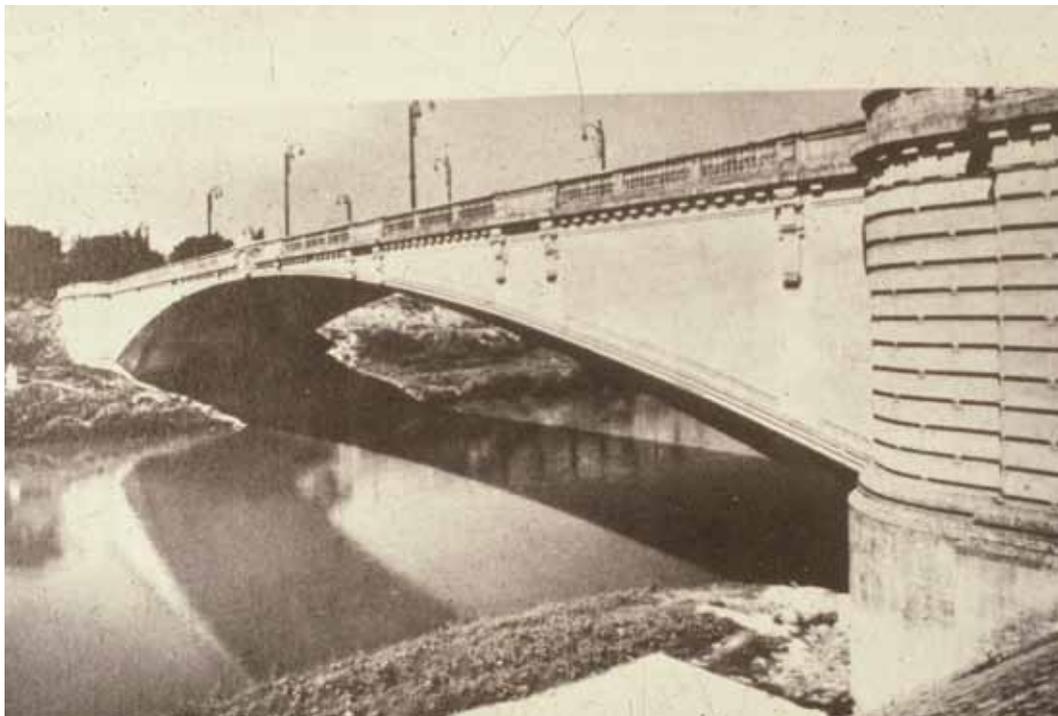


Fig. 22. Puente del Risorgimiento



Fig. 23. Puente de Intra



Fig. 24. Puente en la autopista de Bologna-Venecia



Fig. 25. Puente de Varzi

pecial con tres puntales sobre pila que recogen la carga de los 10,8 m de tablero que están sobre la pila y el arco los 21,6 m centrales (1922).

Otros viaductos curiosos italianos se encuentran en la autopista Bolonia-Venecia (fig. 24). La poligonalización de los arcos y la cuadrícula de vigas y pilares que cosen entre sí los puntos de quiebro proporcionan rigidez y resistencia a los arcos ante las cargas descentradas. Tiene unas luces de 58 m.

Esta misma forma de arriostramiento longitudinal de los arcos se encuentra en muchos puentes arco italianos.

La finura del diseño que caracteriza a casi todos los puentes italianos se manifiesta, muy especialmente, en puentes como el que está sobre el torrente Staffora, en Varzi, constituido por tres arcos muy rebajados de 31,2 m de luz y 2,75 m de flecha. Estos arcos, formados por cuatro nervios con fondo continuo, se terminaron en 1915 (fig. 25).

Robert Maillart (1872-1940)

Maillart es un ejemplo de la innovación que puede obtenerse en la forma del puente partiendo de una interpretación directa de la tecnología. Y esto es muy poco frecuente. Normalmente, se tiende a considerar la forma de los puentes como expresión única de la tecnología que lo soporta. Un puente arco es o un arco tímpano, en el que la relación entre arco y tablero es continua –herencia del puente de piedra–, o es un arco que soporta el tablero por medio de pilares verticales –herencia del puente metálico–. Maillart no hace ni lo uno ni lo otro, es un heterodoxo para su tiempo y abre una ventana enorme al entendimiento del puente arco. Cuando en el puente de Zuoz (fig. 26), de 1901 –arco tímpano de hormigón de 30 m de luz, triarticulado, y con relación flecha-luz 1:10–, se le fisuraron los tímpanos, los eliminó como en su segundo puente, el de Tavanasa (1905), en el que empieza a perfilarse lo que va a ser una de las aportaciones concretas de Maillart al mundo de los puentes: el arco triarticulado con riñones aligerados (fig. 27).



Fig. 26. Puente sobre el río Inn, en Zuoz



Fig. 27. Puente sobre el río Rhin, en Tavanosa



El dintel no es algo que se superpone y se apoya en el arco, sino que ambos forman un elemento estructural único del que se elimina la zona inútil. Estarán relacionadas por pilares o no, pero siempre manteniendo ese criterio. Los arcos son más o menos arqueados, a veces son hasta ojivales, pero siempre acoplándose a la ley de momentos flectores característica de los arcos triarticulados.

Resultado de esta toma de conciencia respecto a lo que es el puente arco tenemos ejemplos tan características como:

Puente	Año	Luz (m)	Relación flecha/luz
Tavanasa	1905	35,00	1/8,5
Salginatobel	1929-30	90,04	1/6,9
Rossgaben	1932	82,00	1/8,5
Thur	1933	72,00	1/8,45
Arve	1936	55,97	1/11,7
Simme	1939-40	32,00	1/13,6
Strassenüberführung	1940	40,00	1/8,8

Tabla I

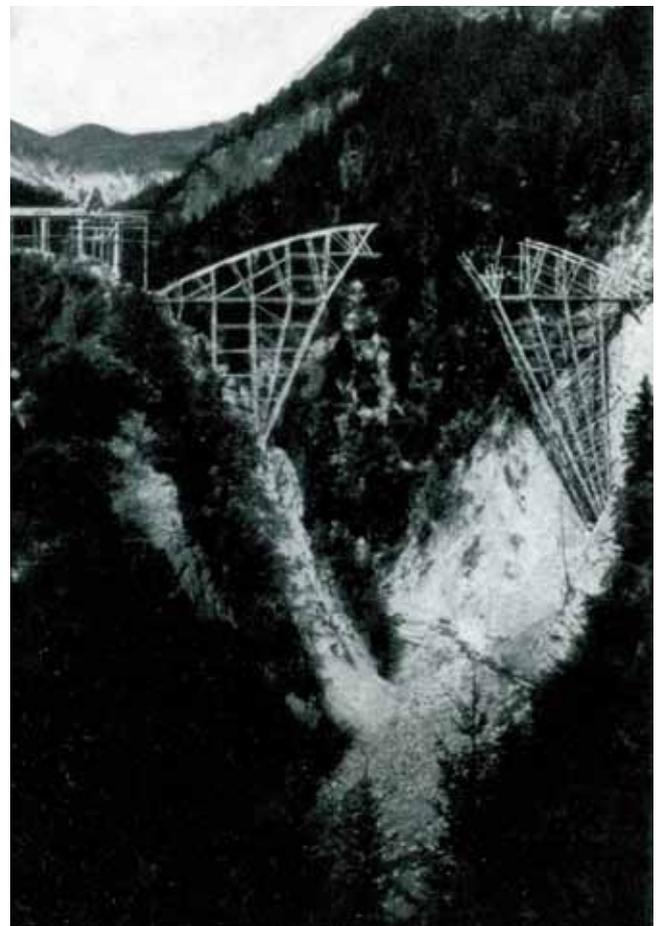


Fig. 28. Puente de Salginatobel y cimbra (Ing. Coray)

Otra cosa que sorprende en estos puentes, con una estructura tan flexible como es un arco triarticulado, es su pequeña relación flecha/luz. Renuncia pocas veces a relaciones tan arriesgadas, aún en casos tan fáciles como el Salginatobel en el que la morfología del terreno no le obligaba a mantener rebajamientos tan grandes. Pero el rebajamiento es un elemento de tensión formal en los arcos. Un arco con una relación flecha/luz grande es un arco muy tranquilo. Un arco muy rebajado es inquietante y hermoso.

En la figura 28, podemos ver el puente Salginatobel, uno de los muchos que construyó en esta tipología, con un rebajamiento de 1/6,9. Pero, en otros casos, como en el puente sobre el Simme, llega a rebajamientos de 13,6.

La segunda tipología, original de Maillart y que se ha hecho clásica en los puentes de hormigón armado, es el que podríamos bautizar como puente colgante invertido, en el cual el arco se reduce a su mínima expresión y el dintel es la viga de rigidez que permite la actuación de cargas alternadas. De este tipo tenemos:

Puente	Año	Luz	Relación flecha/luz	Ancho Dintel	Canto dintel	Espesor arcos
Schrärbach	1924	28,8	1/7,2	3,0	1,1	0,2 a 0,22
Val-Tschlei	1925	43,2	1/8,3	3,6	1,15	0,27 a 0,29
Landquart (ferrocarril)	1930	30	1/3,8	4,95	1,4	0,26 a 0,34
Spital	1930	30	1/9,2	7	0,9	0,24 a 0,28
Engstligen (pasarela)	1930	26	1/7,65	2	1,2	0,15 a 0,16
Hombach	1931	21	1/7	5	0,7	0,17 a 0,19
Traubach	1932	40	1/7,15	4	--	0,2 a 0,26
Schwandbach	1933	37,4	1/6,23	4,9	0,9	0,2

Tabla II



Fig. 29. Puente de Schwandbach



Fig. 30. Puente de la Caille

Se caracterizan por una ejecución cuidadosísima del arco, como no podía ser de otra manera, pues los fallos en la geometría de la directriz tendrían consecuencias considerables en arcos de espesores tan delgados. Las vigas de rigidez del dintel son siempre las barandillas y la referencia entre arco y tablero son diafragmas muy delgados pero extendidos a toda la anchura del arco. En este tipo de puentes es necesario mantener la cimbra hasta la terminación del puente pues el arco no puede aceptar cargas disimétricas sin tener la viga de rigidez terminada. La tradición de este tipo de puentes se ha continuado en Suiza por Christian Menn y fue utilizada con éxito por Fernández Casado en acueductos, donde la rigidez del dintel se obtiene naturalmente en la altura del cajero que conduce el agua.

El trabajo de Maillart no se redujo en los puentes exclusivamente; las losas ‘hongo’ para los edificios o las primeras estructuras laminares son obra suya.

Puentes franceses: Caquot, Freyssinet, Esquillant, etc.

El siglo XX, sobre todo en su primera mitad, corresponde a la apoteosis de la ingeniería francesa. Ésta se manifiesta con gran pureza, sencillez, adecuación tecnológica y belleza. Cuando la ingeniería francesa se expresa en toda la pureza que su racionalismo ha capacitado a la transformación de lo tecnológico en formas simples y primeras, la belleza aparece natural y contundente, lo que no pasa cuando decide adornarse con la estética de arquitectos que vulgariza y afea fuertemente su magnífica tecnología. Voy a presentar unas magníficas realizaciones que en belleza y naturalidad se decantan mejor en Esquillant, Caquot y Freyssinet, aunque producen obras absolutamente capitales en el desarrollo de los puentes arco no son tan bellas.

Albert Caquot (1881-1976)

Albert Caquot fue considerado como el más grande de los ingenieros franceses vivos durante nuestro siglo y eso que era condiscípulo y de la misma promoción de Freyssinet.

El puente de la Caille (fig. 30) fue terminado en 1928 convirtiéndose en el récord absoluto de luz de puentes de hormigón con 137,5 m. Con 8 m de ancho, fue proyectado para resistir tanto vías de ferrocarril como la carretera.

Su construcción se realizó con una cimbra completa de madera en arco de toda la luz del puente, verdadera hazaña cualquiera que sea su consideración. Esta cimbra fue montada con la ayuda de un puente colgante realizado al efecto.

En su diseño, el puente tiene un error formal importante. Durante mucho tiempo se ha estado elucubrando respecto a cómo debía ser el contacto entre arco y tablero; hay muchas opiniones y aquí se elige la peor, disponiendo un tabique que solidariza arco y tablero en una gran longitud en clave.

El arco tiene una anchura de 6,36 m, un espesor en clave de 2,8 m y un espesor en arranques de 5,5 m.

Eugene Freyssinet (1879-1962)

En 1907, Freyssinet, de 28 años de edad, proyecta el más atrevido y bello de sus puentes. Recibe el encargo de sustituir tres puentes colgantes en estado ruinoso sobre el Allier y proyecta los puentes de Le Veudre (1911-1912), Boutiron (1913) y el puente de Châtel-de-Neuvre (1914-1923).

Le Veudre (fig. 31) está formado por tres arcos de tres articulaciones, de 72,5 m de luz y una esbeltez extraordinaria de 1/15. La relación entre el arco y el tablero es una triangulación.



Fig. 31a. Puente de Veudre

La esbeltez del arco es tan importante que el año de su inauguración las flechas que se producían en clave son del 13 cm y el tema progresaba. Esto dio lugar, posteriormente, al descubrimiento de la fluencia del hormigón, que él resolvió con la abertura en clave de los arcos por medio de gatos y la eliminación de la articulación central. Este puente fue destruido en la Segunda Guerra Mundial. El de Boutiron, cerca de Vichy, se conserva pero carece de la espectacularidad de Le Veudre.



Fig. 31b. Puente de Veudre



Fig. 32. Puente de Saint-Pierre-du-Vauvray

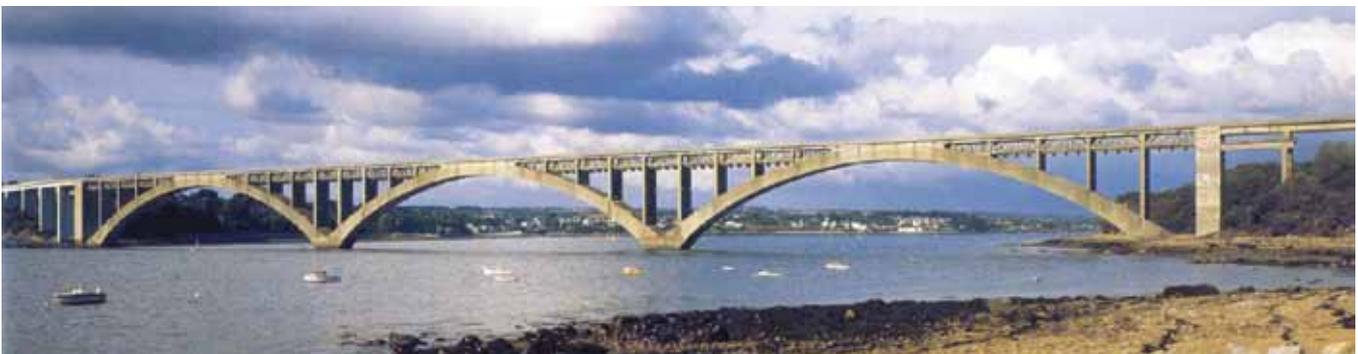


Fig. 33. Puente de Plougastel



Fig. 34. Puente de Plougastel

En 1923 termina el puente sobre el Sena de Saint-Pierre-du-Vauvray (fig. 32). Se trata de un arco empotrado de 132 m de luz, del que cuelga el tablero. Freyssinet hizo aquí lo contrario de lo habitual: construyó primero el arco por medio de una cimbra espectacular y luego hizo el tablero. Fue el mayor puente del mundo en hormigón aunque pronto el puente de la Caille, con 137,5 m de luz, lo destronó.

Entre 1926 y 1930, Freyssinet, con la empresa Limousin, construye el puente de Plougastel, sobre el río Eloru (fig. 33). Consta de tres arcos de 186,4 m de luz, con 9,5 m de anchura y 4,8 m de canto en una viga cajón de tres células. El tablero es una viga en celosía con dos calzadas, una superior con

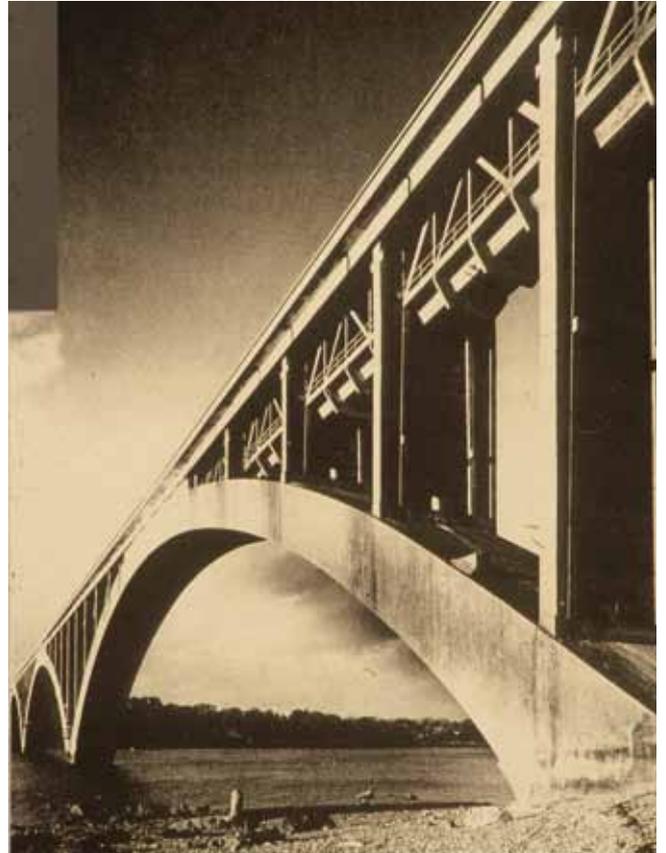


Fig. 35. Puente de Plougastel

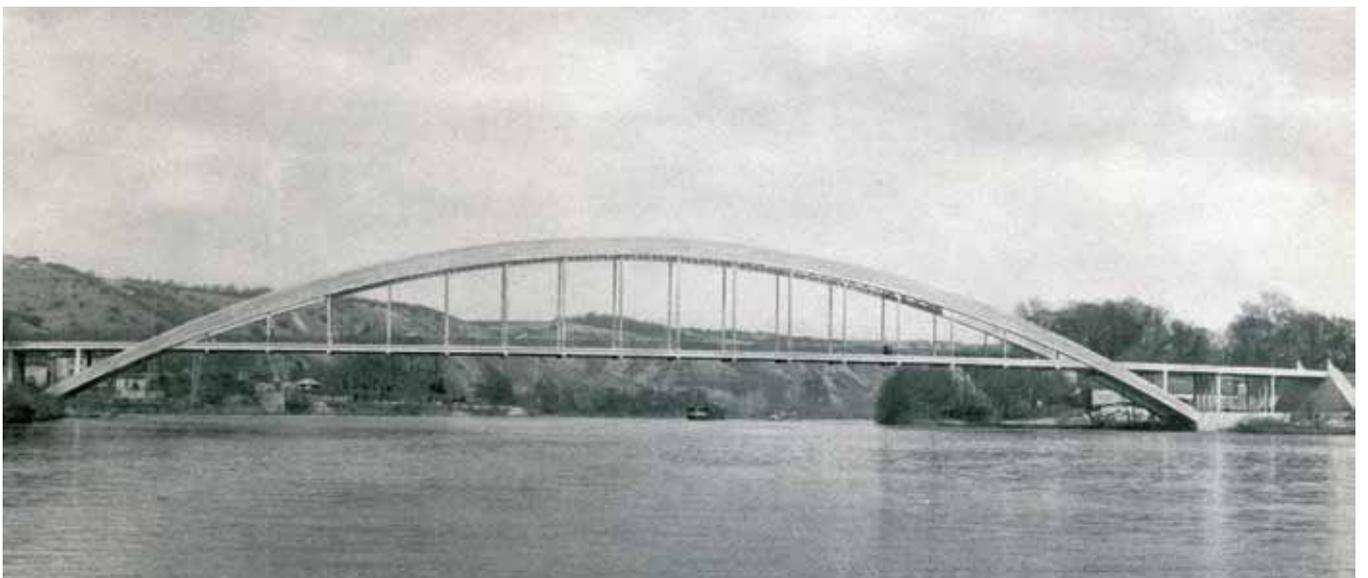


Fig. 36. La Roche-Guyon

una calzada de 6 m de ancho y dos aceras de 1 m y una inferior para una sola línea de ferrocarril.

La construcción fue asombrosa pues fabricó una cimbra móvil en arco atirantado de 160 m de luz (fig. 34), verdadera obra maestra, que apoyaba en los cimientos y aguantaba el hormigón de la viga cajón del arco definitivo, el cual se hormigonó en tres fases, primero la losa inferior, después las almas y por último la losa superior de la viga cajón.

Una vez terminado un arco, pasaba la cimbra al vano siguiente, la cimbra de madera flotaba por dos flotadores de hormigón en los extremos los cuales estaban articulados durante el transporte (fig. 35).

Freyssinet consideraba a este puente el mejor de los realizados por él si se exceptúa a Le Veudre que admira sobre todos los demás.

Nicolas Esquillan (1902-1989)

Más conocido por sus grandes cubiertas, CNIT París, en 1955, Esquillan fue un gran constructor de puentes. Simón Boussion le nombra jefe de su sección de estudio donde realizará puentes tan notables como La Roche-Guyon, de 161 m de luz (1934), La Coudette (1943) y Conflans-Fin-d'Oise (1950).

El puente de La Roche-Guyon (1934) es un puente arco con tablero intermedio (fig. 36), que en su momento constituyó la mayor obra en cuanto a luz se refiere para los arcos con tablero intermedio. Los arcos tenían un canto de 2,65 m en clave y 1,4 m en arranques aunque con un ensanchamiento a 3 metros.

El tablero, de 10 m de ancho, era dividido en tres partes correspondientes a la zona colgada o apoyada en el arco.

El puente fue cimbrado para su construcción. El hormigonado se hizo por secciones comenzando por la losa inferior siguiendo por las almas y terminando en su losa superior. Es un puente bellísimo, simple y perfectamente bien resuelto. El puente de Conflans-Fin-d'Oise es similar a éste aunque un poco más pequeño.

El puente de Caudette (fig. 38), de 1943, es otro de los puentes diseñado por Esquillan siguiendo, en este caso, al puente de Castelmoron, proyectado y realizado por Christiani Nielsen, con péndolas inclinadas, lo que en un principio permite reducir el tamaño del arco pues la triangulación es muy favorable para la respuesta ante las cargas disimétricas pero con el inconveniente de que pueden quedar fuera de servicio si la sobrecarga en alguna introduce una compresión mayor que la tracción de peso propio.



Fig. 37. La Coudette



Fig. 38. Puente Canadá

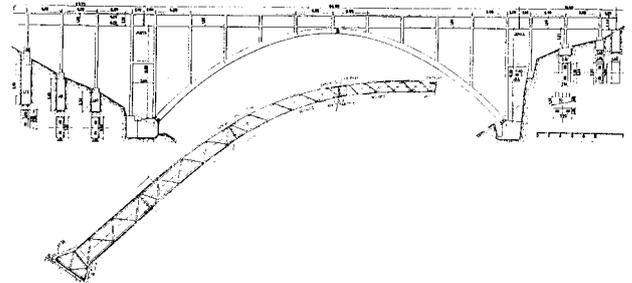


Fig. 39. Acueducto de Najerilla

El puente de La Coudette tiene 111 m de luz, un espesor constante del arco de 1,25 m x 1,1 m de anchura. La relación flecha/luz es 1/6,75 y la separación entre arcos es de 1,2 m.

El puente se construyó sobre cimbra. Los arcos tienen un arriostramiento discontinuo en cuatro zonas del mismo.

Aunque se sale un poco de las fechas en que se desarrollan estos primeros puentes arco, en 1954, se construye el Canadá, en Treguier, un puente formado por dos arcos sin

arriostramiento entre ellos, fig. 38, con una relación flecha/luz de 1/5,5, un canto en el centro de vano de 2,5 m y 3,6 m en el empotramiento. Su luz es de 153 m.

Carlos Fernández Casado (1905-1988)

La obra en hormigón armado se realiza en la primera parte de su vida, en la segunda utiliza el hormigón pretensado, y esporádicamente, alguna construcción metálica, nunca en puentes.

Los puentes arco de hormigón armado los realiza según tres procesos constructivos diferentes.

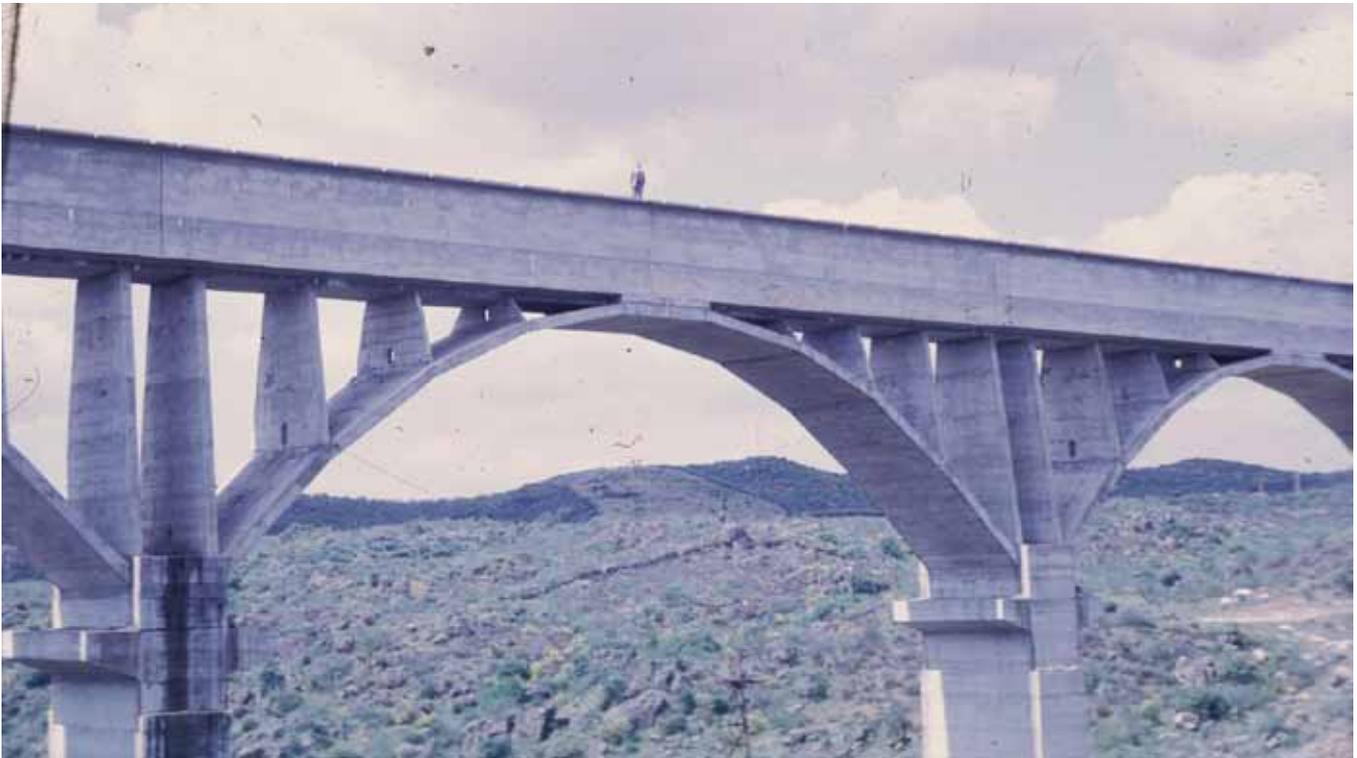


Fig. 40. Acueducto sobre el embalse de Gabriel y Galán

En el acueducto del Najerilla (fig. 39), de 1944, Fernández Casado utiliza la autocimbra metálica impuesta en la tecnología española de puentes arco por Ribera. Se trata de un arco de 60 m de luz y 16 m de flecha que soporta un cajero para el transporte del agua de 1,8 m por 1,8 m. Los arcos eran de canto variable entre 0,6 m en clave a 1,1 m en arranques.

En el acueducto del embalse de Gabriel y Galán sobre el río Alagón (fig. 40), de 1969, utiliza una morfología tipo Maillart, muy adecuada para acueductos ya que la carga es constante; el cajero, obligatoriamente para el transporte del agua, tiene gran rigidez, lo que permite ir a arcos muy delgados. Consta de cuatro grandes arcos de 60 m de luz. Se construyó sobre cimbra apoyada en el suelo, procedimiento molesto, pues la cimbra no se puede quitar hasta que el cajero está terminado.

El tercer procedimiento que utiliza para construir puentes arco es la prefabricación, procedimiento muy utilizado por él en muchas experiencias de puentes y otro tipo de estructuras. Consiste en la fabricación de un arco triarticula-

do, lo que permite su elevación en dos tramos con apoyo provisional en el centro (fig. 41). Esta estructura sirve de apoyo a tímpanos macizos que solidarizan entre sí los arcos y eliminan la rotura de la clave. Sobre ellos, se hormigona el tablero. De esta tipología tenemos el puente sobre el aliviadero de Cubillas (fig. 42), de 1954 y con 49 m de luz; el puente de Mérida (1955), con vanos arcos de 60 m de luz; y, finalmente, el de Mieres (1967), formado por un solo arco tímpano de 70 m de luz.

Eduardo Torroja (1899-1961)

Aunque el legado más importante de Torroja hay que buscarlo en las estructuras laminares, en la construcción de puentes fue notable dejando más impronta personal con los puentes metálicos que con los de hormigón.

El viaducto del Aire (1933) está formado por dos arcos gemelos de 36 m de luz enlazados entre sí en clave, arranques y un punto intermedio (fig. 43).

En un ingeniero tan fino como Torroja sobra la doble pila que se produce en los arranques del arco, los cuales determinan

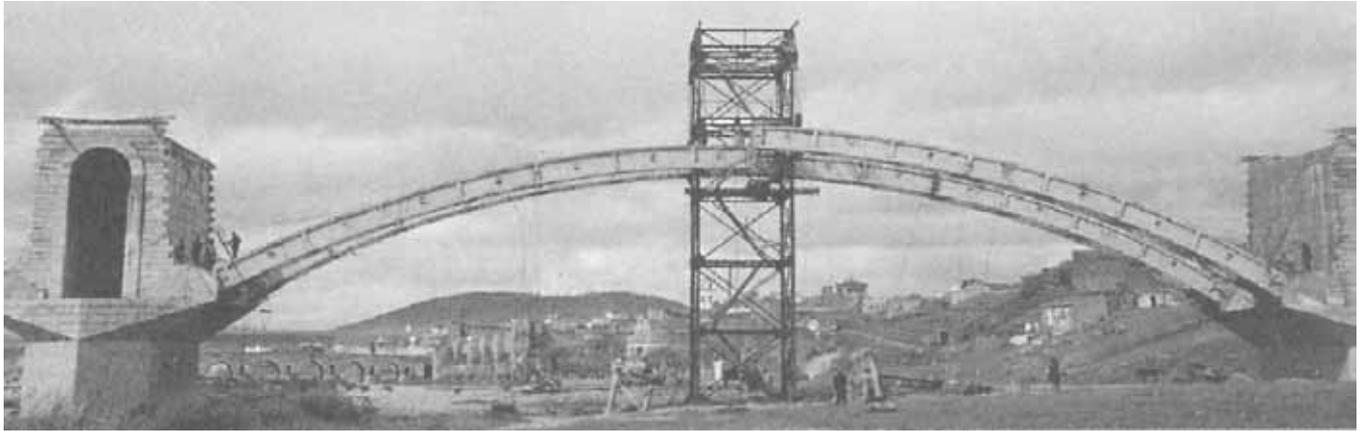


Fig. 41. Puente de Mérida

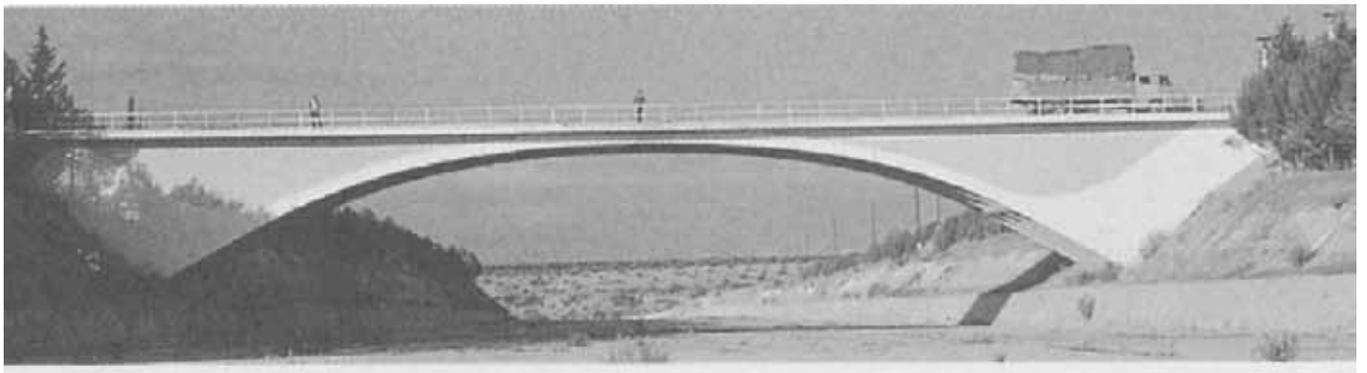


Fig. 42. Puente sobre el aliviadero de Cubillas



Fig. 43. Viaducto del Aire

una separación entre el tablero apoyado en los arcos y el tablero apoyado en la palizada (fig. 43).

En el viaducto de los 15 ojos (1933), Torroja diseña una estructura clásica y bella (fig. 44). Las luces son de 7 m y la arcada, que no es arcada, está configurada por pilares de 1,7 m en sentido longitudinal.

En esta estructura contradice su primer mandamiento estético: “Se considera mentira y por lo tanto proscrito, el que la apariencia de una construcción induzca a pensar que sus fenómenos funcional y resistente son otros totalmente diferentes a los reales que se ocultan en una estructura interior”. En este caso, lo que parecen arcos son ménsulas. Yo no creo que el puente esté mal, lo que está mal es ese primer mandamiento estético.



Fig. 44. Viaducto de los 15 Ojos

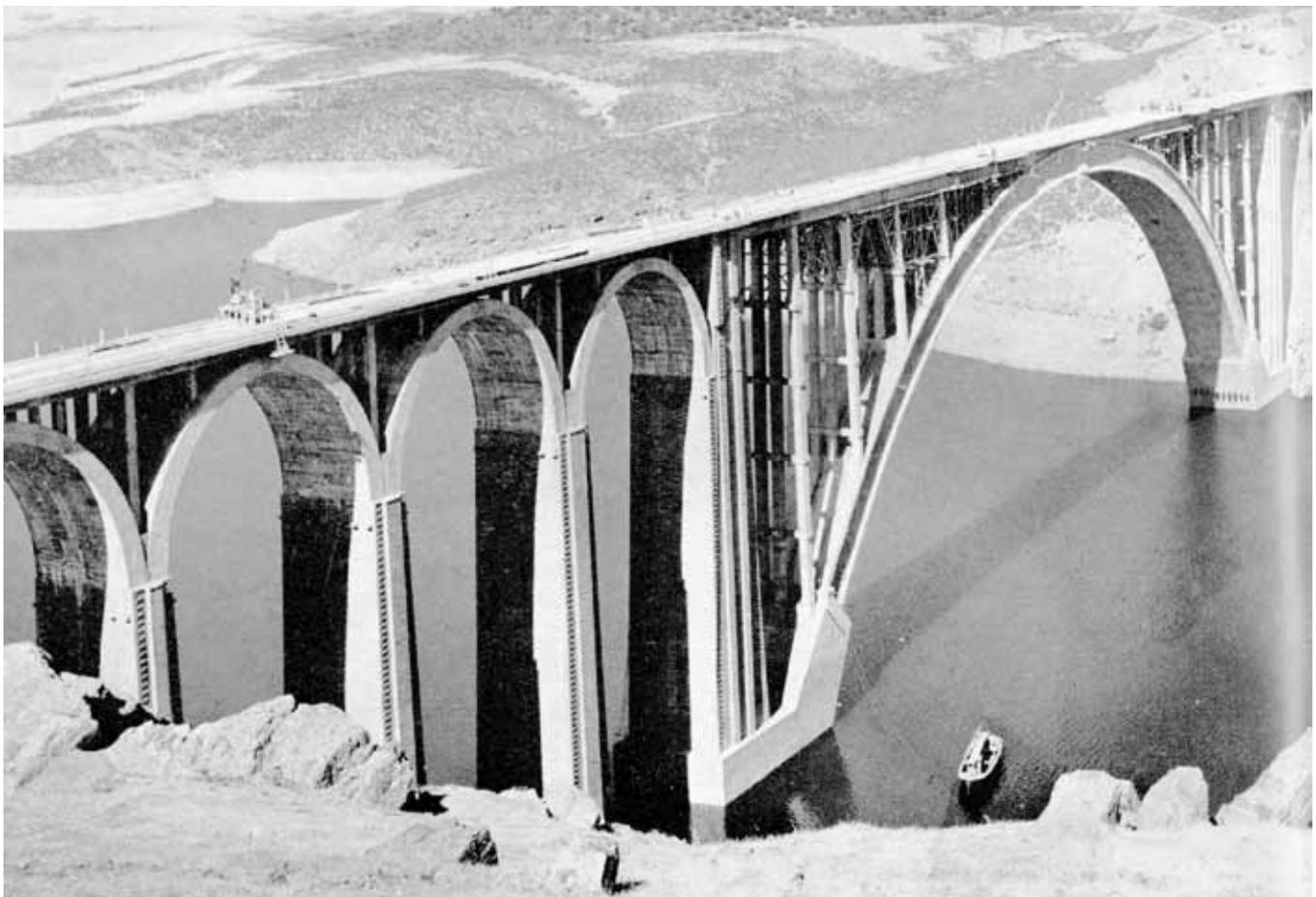


Fig. 45. Viaducto de Martín Gil



Fig. 46a. Construcción del arco de Martín Gil



Fig. 46b. Construcción del arco de Martín Gil

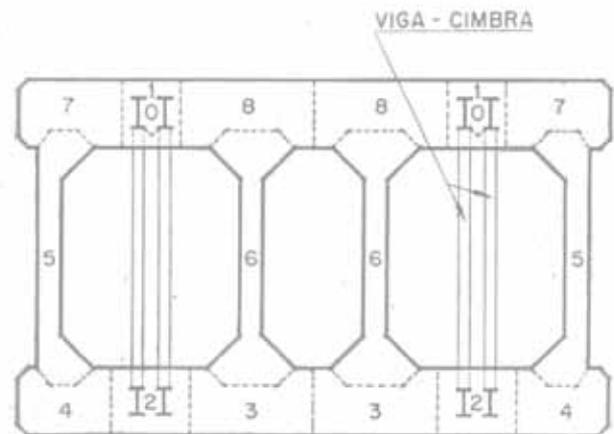


Fig. 47. Sección transversal del arco

Viaducto Martín Gil (1939)

Este viaducto no lo proyectó Torroja, sino Martín Gil (fig. 45). Es antiguo, pesado y un poco torpe siguiendo los pasos de E. Mörsch. Pero la construcción del arco, que sí fue tarea de Torroja, es heroica (fig. 46). La cimbra de madera de Martín Gil no era fiable y Torroja la cambió

por otra metálica que colocó en su sitio con un blondín y apoyándose en la cimbra de madera (fig. 46). Después fue completando poco a poco la capacidad resistente de esa cimbra de madera con hormigonados parciales y escasos (casi con una cucharilla) para no romper la también escasa autocimbra metálica (fig. 47). Una verdadera proeza.

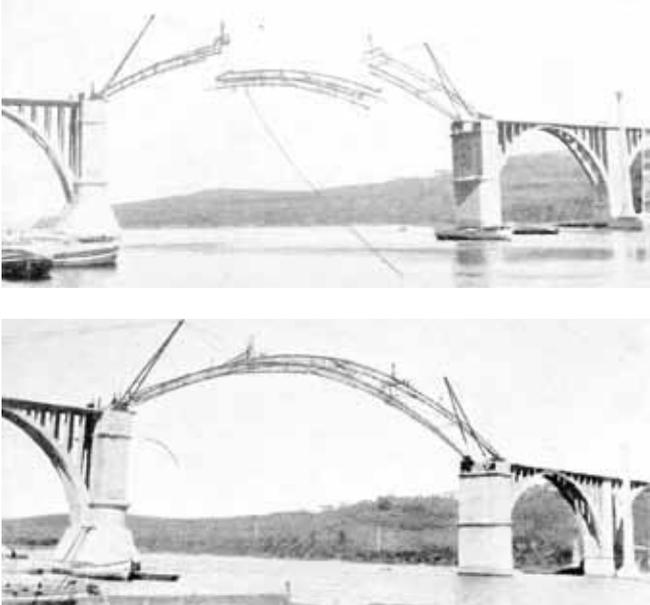


Fig. 48a. Puente del Pedrido y autocimbra

Puente del Pedrido (1943)

De nuevo Torroja soluciona la construcción del arco central del 75 m de luz (fig. 48). La armadura principal del arco formada por perfiles metálicos soldados que constituyen la autocimbra que va a permitir hormigonar el arco, en tres roscas que a su vez se dividen en dovelas para controlar los esfuerzos y las deformaciones de la autocimbra. No olvidemos que Torroja fue discípulo y trabajó con Ribera.



Fig. 48b. Puente del Pedrido



Fig. 49. Puente de Traneberg

Suecia

Por sus características geográficas y morfológicas este país da lugar a un gran número de puentes arco grandes.

El puente de Traneberg (1932-39) fue diseñado por E. Freyssinnet, tiene 181 m de luz y 26,2 m de flecha, relación flecha/luz 1/6,9 (fig. 49).

Su anchura es de 27,4 m, con 19 m para carretera y 8,4 m para vías. Dispone de dos arcos gemelos de 9 m de ancho y separados entre sí 15,2 m.

Se construyó con cimbra en acero que se empleó para los dos arcos.

El puente de Sandó de 264 m de luz es un puente formidable. Se construyó entre 1938-1943. El arco venía de un canto de 5,9 m arranques a 4 m en clave (fig. 50). Se plantea su construcción con una cimbra de madera de luz total, como en los puentes de Caquot, pero ésta se derrumbó el 31 de agosto de 1939 cuando el hormigonado de la losa inferior del arco estaba casi terminado. Hubo que construir una cimbra tradicional cimentada en el fondo del fiordo (fig. 51). **ROP**

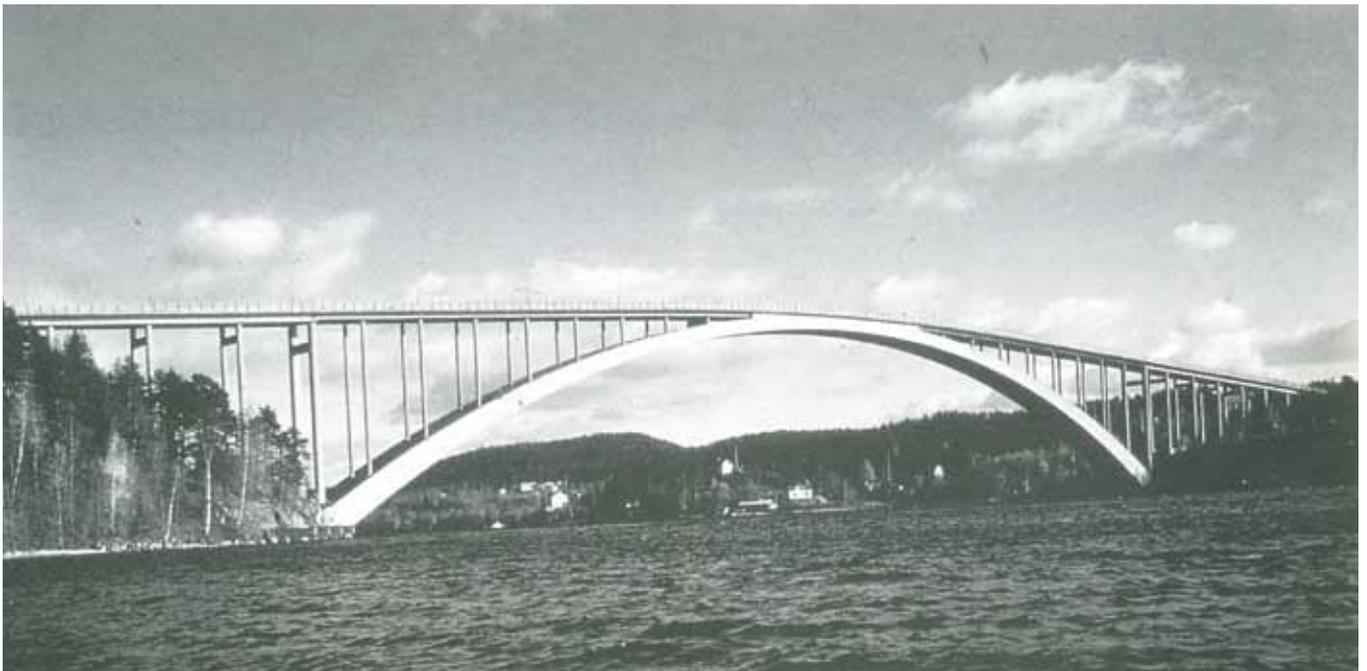


Fig. 50. Puente de Sandó

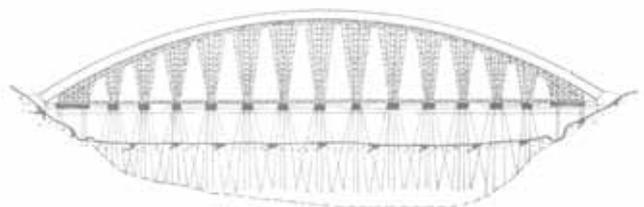
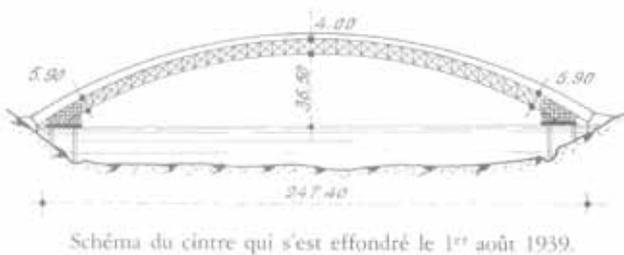


Fig. 51

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



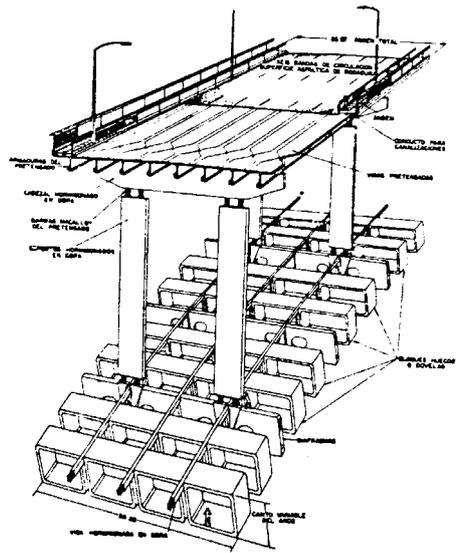
Fig.10. Puente de Arrábida. Elevación de la parte central de la cimbra metálica



Fig. 11. Puente de Parramatta



Fig. 12. Puente de Parramatta



PUENTE DE PARRAMATA $L = 304.0 \text{ M}$ (1964)

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

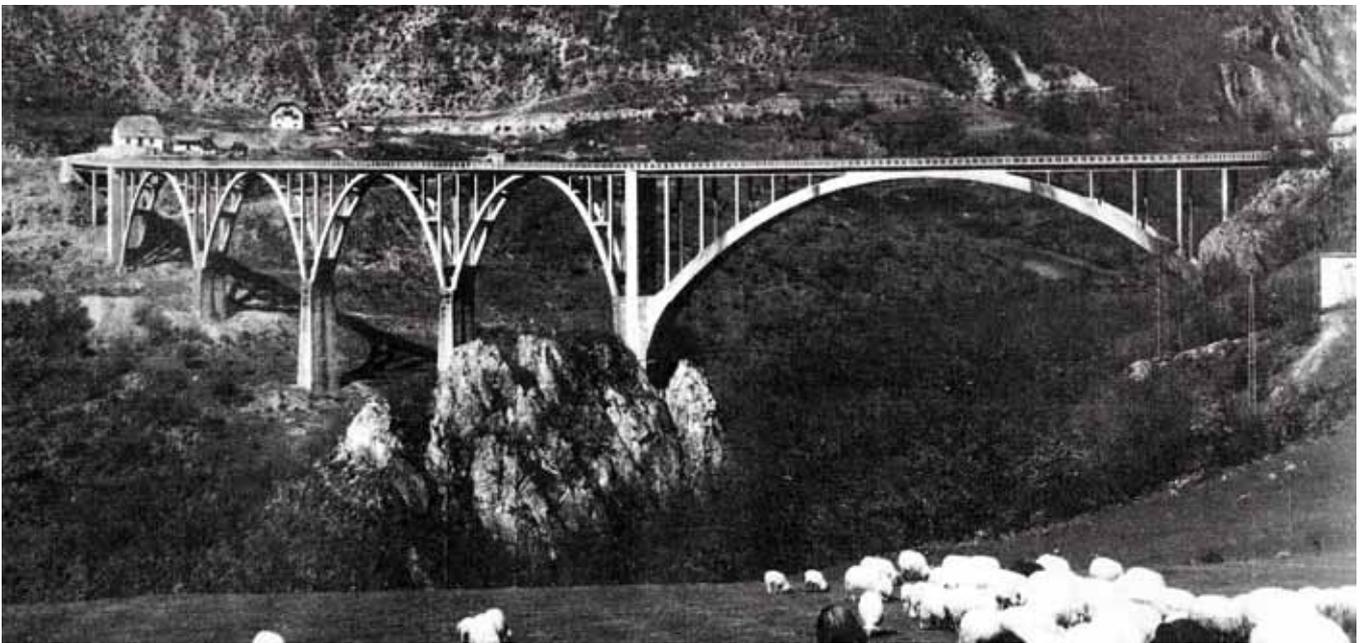


Fig. 14. Puente de Durdevica



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

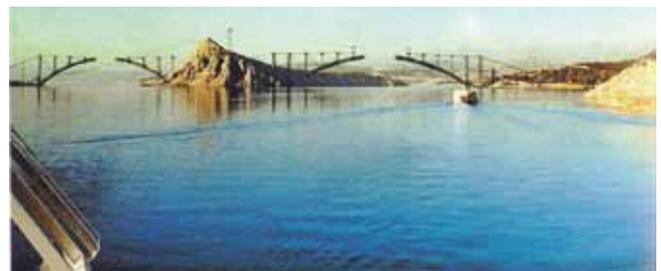


Fig. 17a. Puente de la isla Krk



Fig. 17b. Puente de la isla Krk

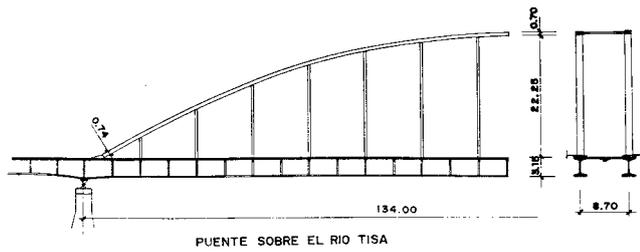


Fig. 18. Puente sobre el río Tisa



Fig. 19a. Puente de Bloukrans

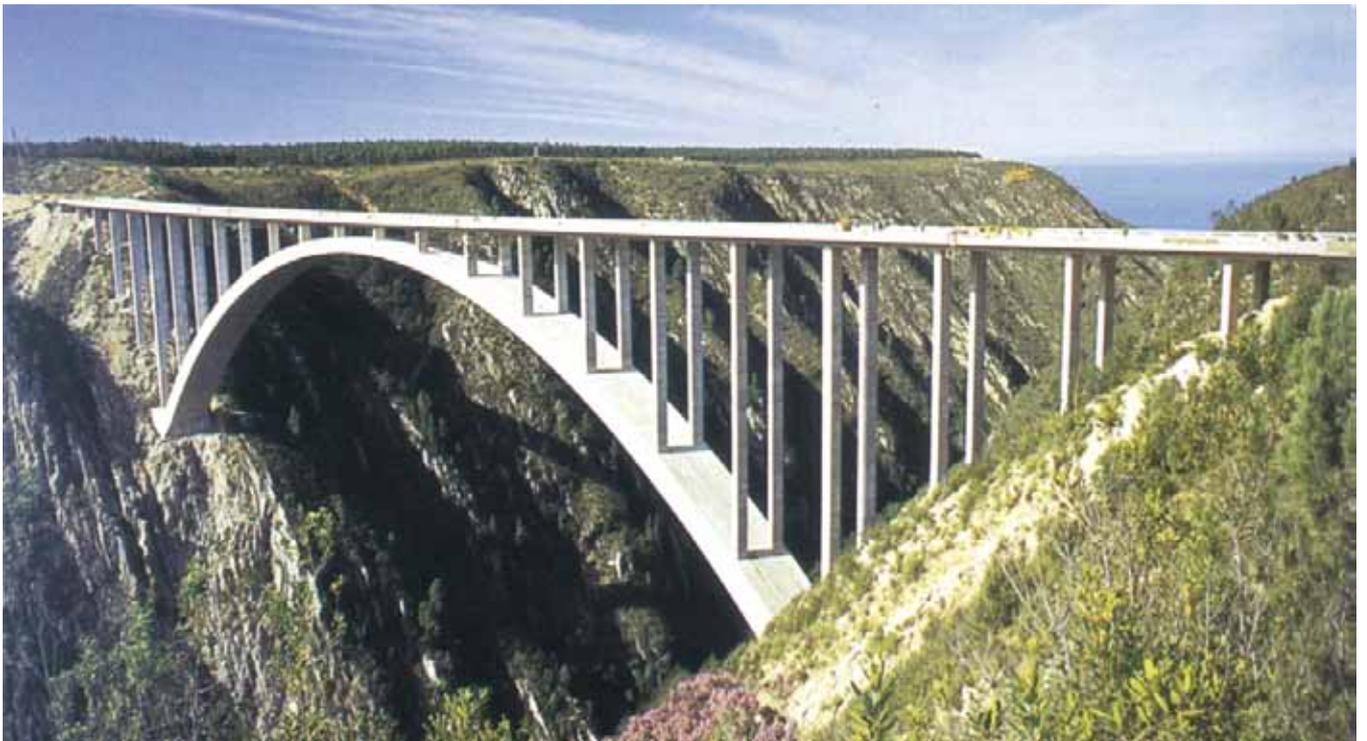


Fig. 19b. Puente de Bloukrans



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

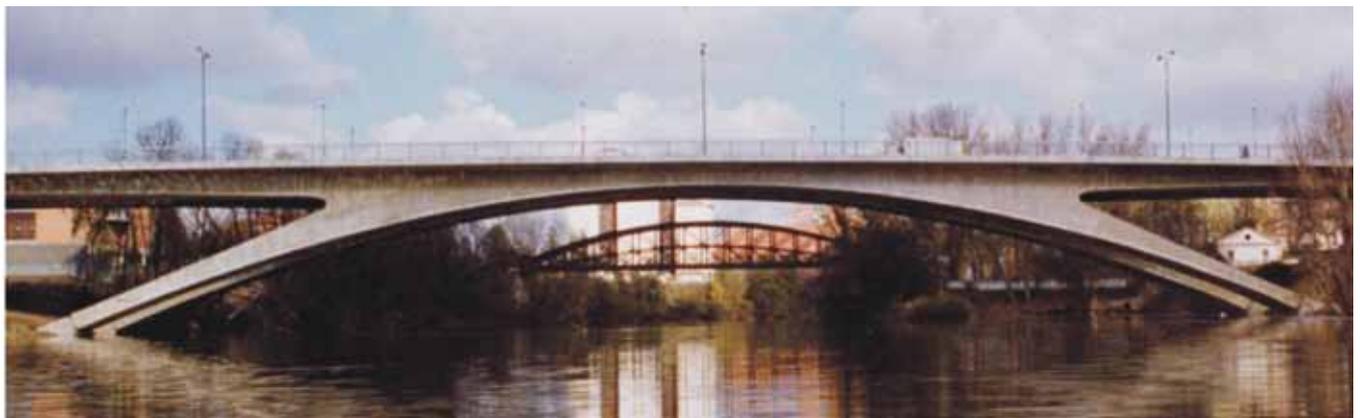


Fig. 26



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,

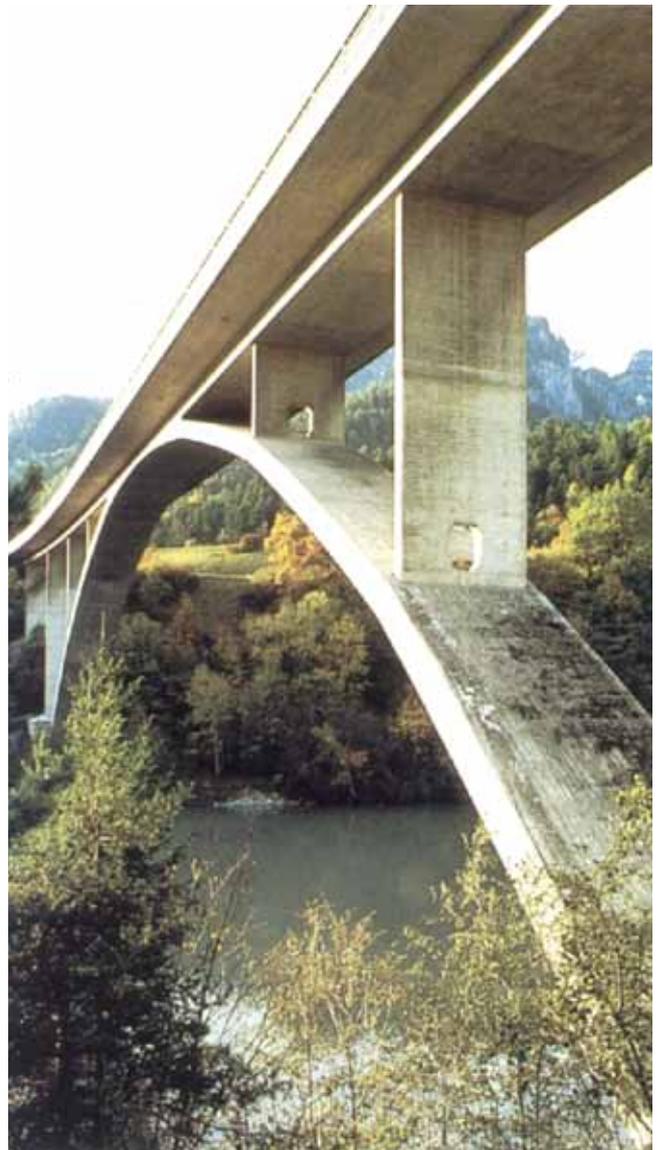


Fig. 29. Puente de Viamola



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.

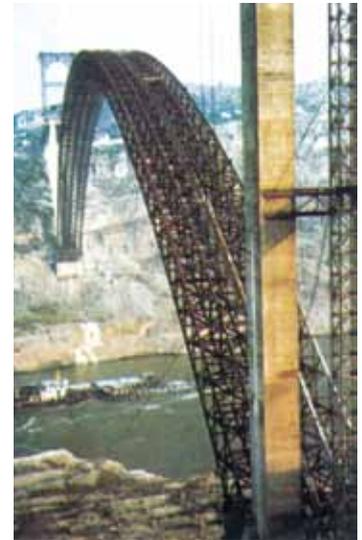
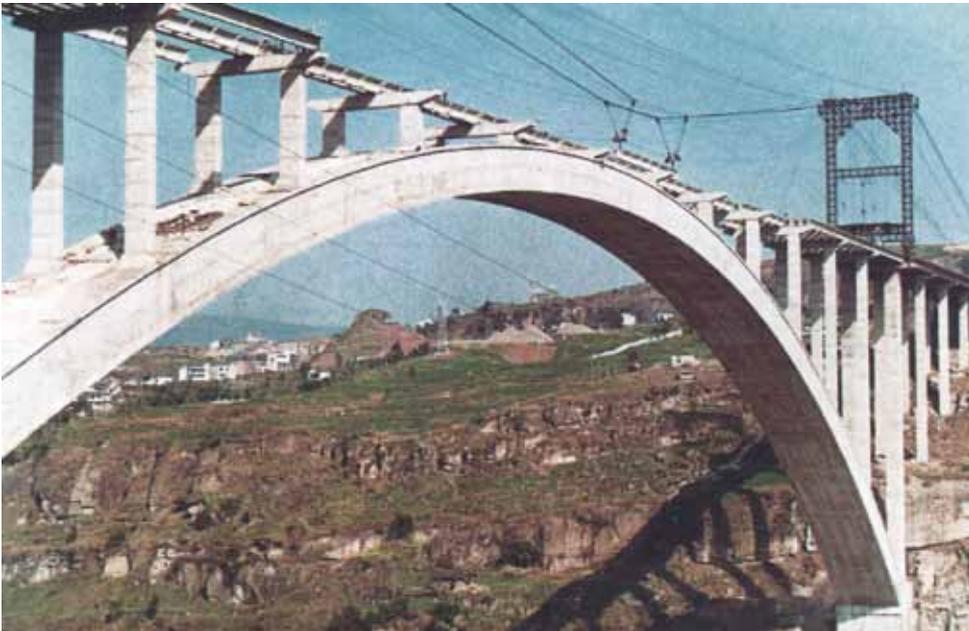


Fig. 36. Puente de Waxian



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