

CAPÍTULO VI

ARCOS SIN EMPUJE

§ I.—Con arcos inferiores.

Con tímpanos de celosía tipo Visontini.—Con tabiques rígidos en tímpanos.
Con tímpanos macizos y rígidos tipo Wunsh.

§ II.—Con pórticos.

En América.—En Viena.—En Bélgica.

§ III.—Con arcos superiores.

Disposiciones posibles.—Puente sobre el Nalón, en La Oscura (Oviedo).—
Puente de Prat de Llobregat.—Puente en Montauban, sobre el canal de
Lissac (Francia).—Puente de Villa Santina sobre el Tagliamento (Italia).
Puente Cobianchi (Italia).—Puente sobre el río Melegue (Túnez).

§ IV.—Con puentes colgados.

Puente-acueducto colgado sobre el río Guadalete (Jerez).—Paso superior
colgado de Laon (Francia).—Puente colgado de Lusancy sobre el río Marne
(Francia).—Puente de Montrose (Inglaterra).

§ V.—Conclusiones comparativas.

Con arcos inferiores.—Con pórticos.—Con arcos superiores.—Puentes col-
gados.

Con alguna frecuencia hay que proyectar puentes en emplazamientos cuyos terrenos, de escasa consistencia, aconsejan, económicamente, evitar empujes oblicuos en pilas y estribos. Otras veces, las rasantes obligadas son muy bajas y no caben arcos

inferiores, ni siquiera a veces vigas rectas de tablero inferior.

Se pueden en ambos casos emplear *arcos sin empuje*, que clasificamos en tres tipos:

- I. *Con arcos inferiores, atirantados o rígidos.*
- II. *Con arcos superiores atirantados.*
- III. *Con puentes colgados.*

Presentaremos los ejemplos más característicos de estos tres tipos de arcos sin empuje, para deducir después de su examen las *Conclusiones* comparativas.

§ I.—CON ARCOS INFERIORES

Para suprimir los empujes en esta clase de arcos no cabe más solución que la de atirantar éstos, o la de conseguir que los tímpanos enlacen tan rígidamente el arco y tablero, que el conjunto del entramado no determine en sus apoyos sino reacciones verticales.

Para conseguirlo se precisa recurrir a disposiciones algo artificiosas, que pasamos a examinar en algunos ejemplos.

Puente Chon-Chol, en Nueva Imperial (Uruguay).—Gracias a los tirantes que unen los extremos de los arcos, las pilas pueden constituirse con simples palizadas de dos pilotes (fig. 189).

Los tramos resultan así muy ligeros y siendo numerosos, como

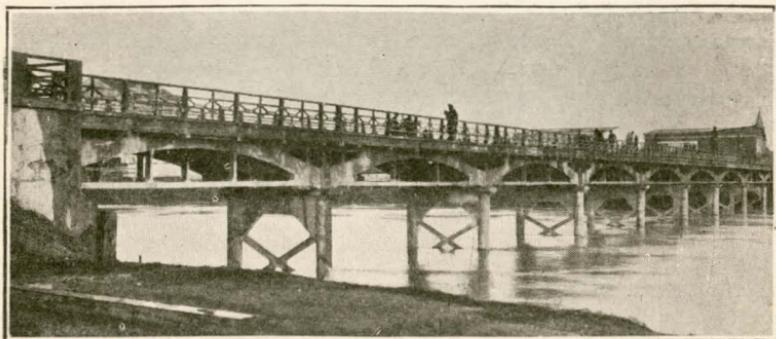


Fig. 189.—Puente Chon-Chol, en Nueva Imperial (Uruguay).

en este puente, el exceso en mano de obra y cimbras sobre el tipo de tramos rectos corrientes, podrá quedar compensado por la economía de material.

Debe en este caso cuidarse mucho de que no se rompan los tirantes, ni de que se oxiden sus armaduras, *de cuya permanencia depende toda la estabilidad del puente.*

Es, pues, un peligro y un serio inconveniente de esta disposición.

Con tímpanos de celosía, tipo del ingeniero italiano Visintini (figura 190).—Su construcción es cara por los moldes complicados y la mano de obra delicada que exige; tampoco los nudos que enlazan las diagonales y montantes con el arco inferior y el nervio superior pueden considerarse como articulados, por lo que en ellos se producirán esfuerzos secundarios de torsión difíciles de apreciar, que con el tiempo determinan las grietas que hemos observado en las vigas triangulares tipo Zafra (1).

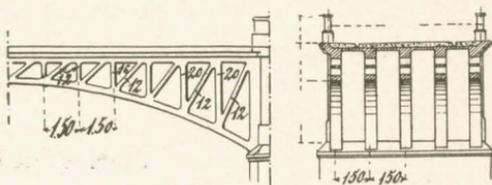


Fig. 190.—Tipo Visintini.

Con tabiques rígidos en tímpanos.—Nos parece mejor la disposición empleada en algunos puentes por Hennebique, en la que cada arco es un tabique macizo, armado en toda la superficie, para obtener con el entramado metálico unos tímpanos con rigidez propia (fig. 191).

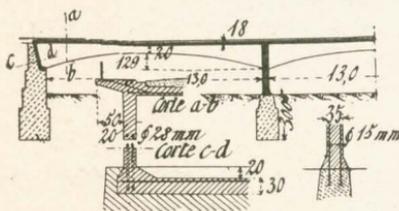


Fig. 191.

Con tímpanos macizos y rígidos, tipo Wünsch.—Igual objeto ha perseguido el ingeniero húngaro Wünsch, armando los tímpanos macizos con hierros perfilados, sólidamente empalmados a fuertes montantes verticales, que se empotran en los macizos de estribos (fig. 192).

(1) De que nos hemos ocupado en el capítulo I.

Se consiguen así grandes rebajamientos (hasta $1/15$) y espesores totales de clave de 0,40 y se suprimen al mismo tiempo los empujes, lo que permite reducir el espesor de los estribos.

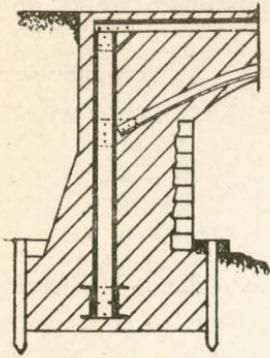


Fig. 192.

Ofrece también esta disposición la ventaja de que por efecto de la rigidez de las armaduras, que se montan previamente, pueden suspenderse de ellas el molde del hormigón, suprimiéndose así la cimbra.

No la creemos, sin embargo, económica, sino para arcos de luces inferiores a 20 metros, y en estos casos serán aun más baratos los tramos rectos. Esta debe ser la razón por la que no se ha extendido este sistema.

§ II.—CON PORTICOS

Los progresos de la mecánica elástica permiten hoy calcular con suficiente aproximación las estructuras rígidas, que se designan con el nombre de pórticos, y que pueden realizarse cuando esté asegurada la inmovilidad de los apoyos.

Claro es que entonces estos apoyos necesitan fuertes armaduras para resistir a los esfuerzos de flexión a que los someten los empujes del arco.

Citaremos algunos ejemplos.

En América.—En los Estados Unidos se han hecho algunas aplicaciones del tipo de la figura 193.

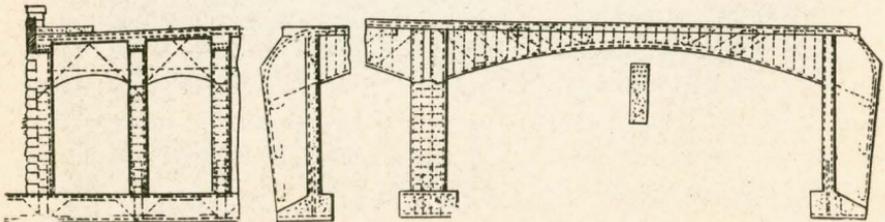


Fig. 193.—Pórticos, tipos americanos.

En Viena.—En el gran concurso de proyectos que se celebró en Viena, para el puente Brigitta, sobre el Donaukanal, se presentaron dos proyectos de pórticos en arco de 56 y 53 m. de luz (figs. 194 y 195).

El primer proyecto (A), cuyo presupuesto ascendía a 15 millones y medio de coronas austríacas, consiste en un pórtico articulado en los arranques y con tramos extremos en voladizos, contrapesados con terraplén (fig. 194).

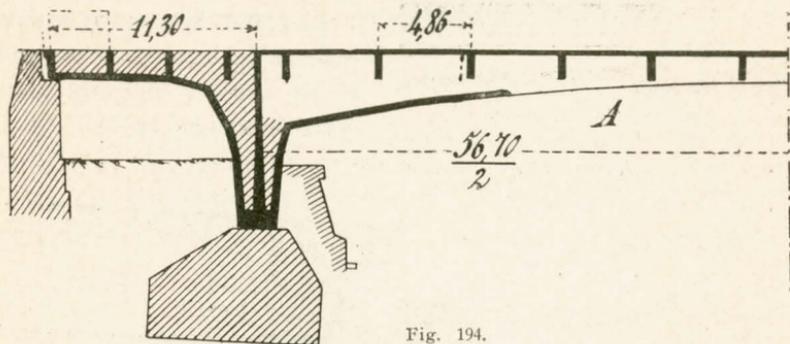


Fig. 194.

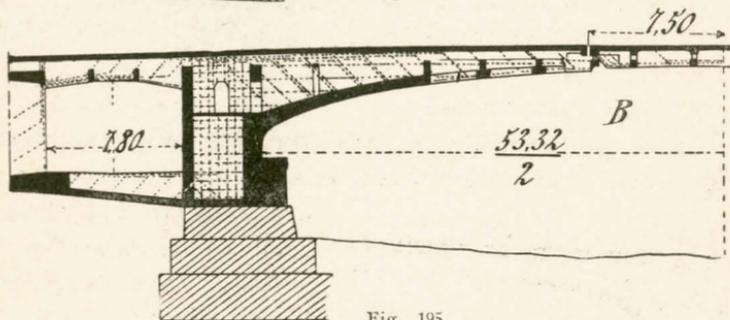


Fig. 195.

El otro proyecto (B) (fig. 195) hubiera costado 16,6 millones de coronas y está constituido como un puente *cantilever*, con un tramo central independiente de 15 m., apoyado sobre los voladizos del arco por medio de unos rodillos de acero colocados entre chapas del mismo metal (1).

En estas dos soluciones los empujes del arco están equilibrados por las armaduras de los estribos.

(1) A pesar de las ventajas de duración y economía que parecían ofrecer estas soluciones de H. A., se adjudicó el concurso a una solución *metálica* en cantilever de 18,2 millones de coronas. Detalles, en *Ingeniería y Construcción* de noviembre de 1928, pág. 509.

En Bélgica.—Recientemente se han construido tres interesantes puentes en pórtico sobre el Canal de Charleroi a Bruselas, con disposiciones variadas.

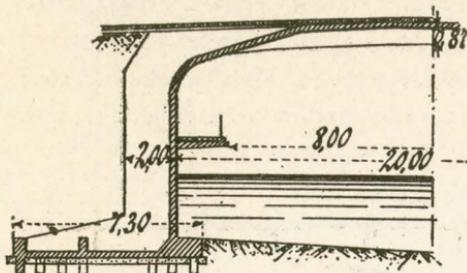


Fig. 196.—En Cureghem.

y forjados se empotran en la zapata de H. A., que se apoya sobre los pilotes y tablestacas de H. A. que constituyen el cimiento (fig. 196).

En los puentes de las figuras 197 y 198, los arcos pórticos se apoyan en cada margen en un estribo y una pila; sobre los estribos, en los que las reacciones son negativas, se anclan por medio de articulaciones Mesnager, dentro de macizos de hormigón pobre; sobre las pilas se transmiten las cargas por medio de aparatos de apoyo metálicos, uno de ellos fijo y otro móvil.

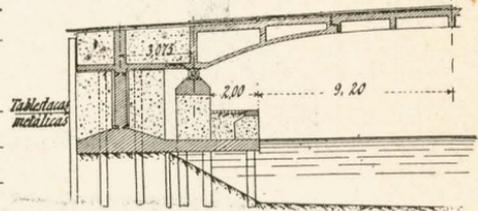


Fig. 197.—Puente de la Isla Pequeña.

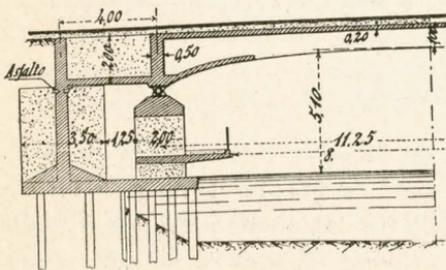


Fig. 198,

Puente de la carretera al bosque de Hal.

sobre las dos consolas de arranques de los arcos; no pelagra el arco, aunque sufran asiento los pilotes de cimientos (1).

(1) Estos tres puentes han sido proyectados por el ingeniero belga M. Boucan, y se detallan en la *Revista de Obras públicas* del año 1931, pág. 471.

§ III.—CON ARCOS SUPERIORES

Disposiciones posibles.—Cuando la rasante tiene que estar a pequeña altura sobre el nivel de crecidas y no caben arcos inferiores, ni tramos rectos con tablero superior, se emplean con frecuencia arcos superiores, cuyos empujes se equilibran por el el tablero inferior, *que actúa como tirante*.

Pueden adoptarse dos disposiciones (fig. 199).

En (A) los arcos son vigas curvas trianguladas, del antiguo tipo, y el tablero queda rígidamente unido al arco.

En (B) el tablero queda suspendido del arco por medio de péndolas, análogamente a lo que vimos en algunos ejemplos de grandes arcos; pero aquéllos empujan en los apoyos, mientras que ahora se trata de que el tablero sea al mismo tiempo el tirante que anule los empujes.

Si en la disposición (B) en lugar de péndolas suspendidas del arco, las damos sección robusta y las empotrados fuertemente en el arco y en el tablero, obtenemos unas vigas rígidas del tipo Vierendeel, que es la que hoy se emplea más frecuentemente para tramos de 25 a 40 metros.

Describiremos algunos ejemplos.

Puente sobre el Nalón, en la Oscura (Oviedo).—Construido recientemente por la Diputación provincial de Oviedo (1).

Son dos tramos de 26,50 m., fijos en la pila y sobre articulación de rótula en los estribos (figs. 200 a 202).

Importaron los dos tramos 96.000 pesetas y los cimientos 46.000

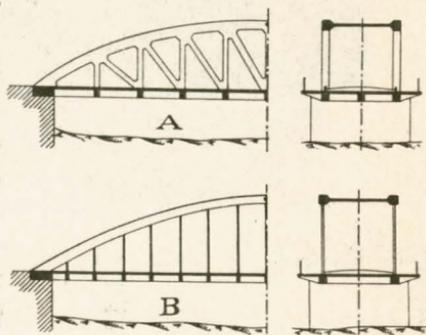


Fig. 199.

(1) Autor del proyecto y director de la obra: ingeniero D. Juan de la Torre Boulín. Constructor: ingeniero D. J. Sánchez Murielaga.

Puente de Prat de Llobregat (figs. 203 y 204).—Cinco tramos de 34,5 m. de luz entre ejes de pilas, con andenes exteriores en voladizo.

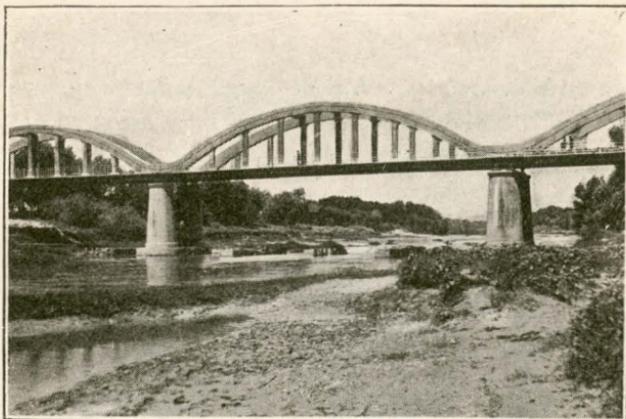


Fig. 203.—Puente de Prat de Llobregat.

Las cerchas arqueadas se calcularon como vigas Vierendeel y se apoyaron sobre rodillos de acero sobre las pilas. El tablero es de

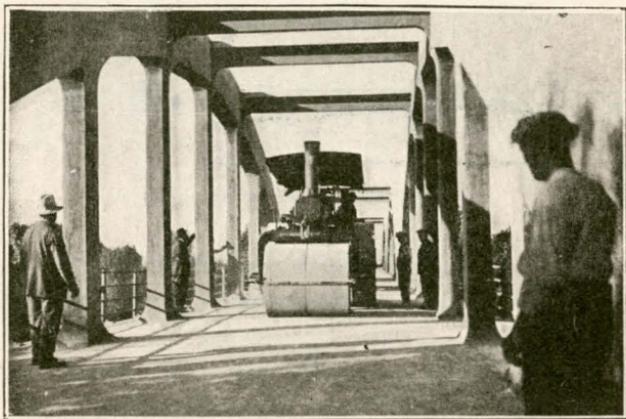


Fig. 204.

nervios y forjado corriente, sosteniendo el firme de macadam asfáltico.

Las pruebas previstas en el proyecto con carros de seis toneladas

se hicieron con apisonadoras de 20 toneladas y grandes camiones, cargando los andenes a 400 kgs./m². Las flechas no llegaron a un milímetro, reaccionando la estructura después de separar la carga (1).

Puente en Montauban, sobre el Canal de Lissac (Francia).—La luz entre apoyos de este tramo es de 30 m. (fig. 205).

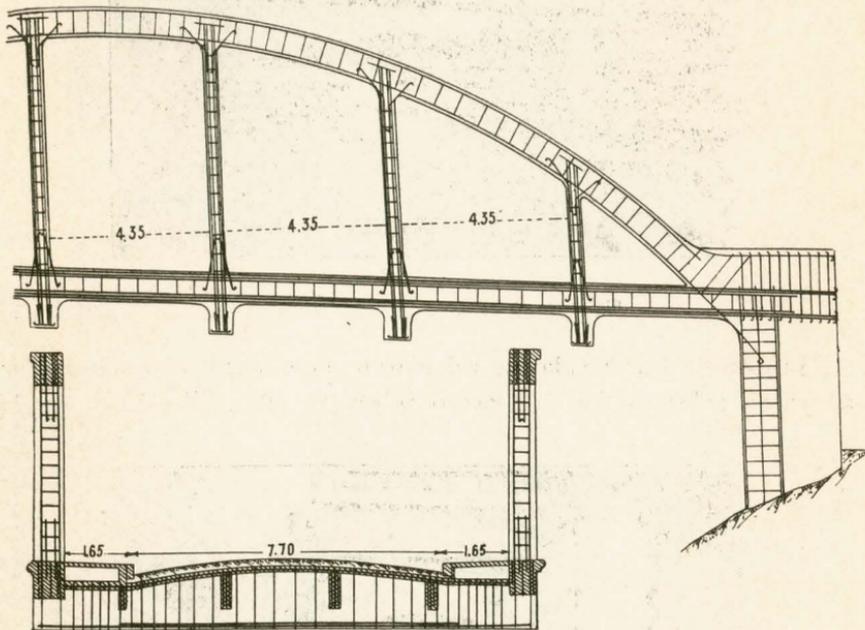


Fig. 205.—Sobre el Canal de Lissac

Las vigas curvas son del tipo Vierendeel y ofrecen la particularidad de no haber puesto arriostramientos entre las claves de los dos arcos (2).

Con arreglo a este tipo se han construido muchos tramos en la zona francesa de Marruecos y en todos los países.

(1) Autor del proyecto: ingeniero D. Federico Turell. Ejecutado por la Sociedad "Construcciones y Pavimentos".

(2) Este tramo es continuación del arco articulado sobre el río Tarn, en Montauban, descrito en el capítulo anterior. Detalles, en *Génie Civil* de 20 de enero de 1916.

Puente de Villa Santina, sobre el Tagliamento (Italia).—Tramo central de 40 m. de luz y dos laterales de 8 m. (1).

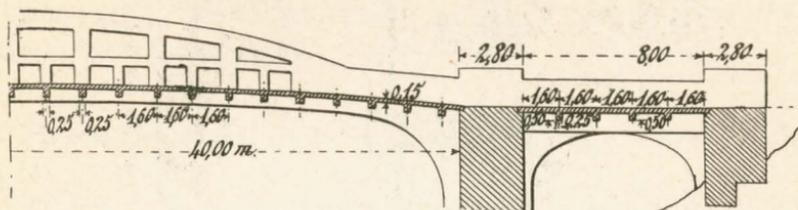


Fig. 206.—Puente en Villa Santina.

Para carretera de 5 m. de ancho, entre las barandillas de H. A. La disposición es original, pues suprime casi por completo el

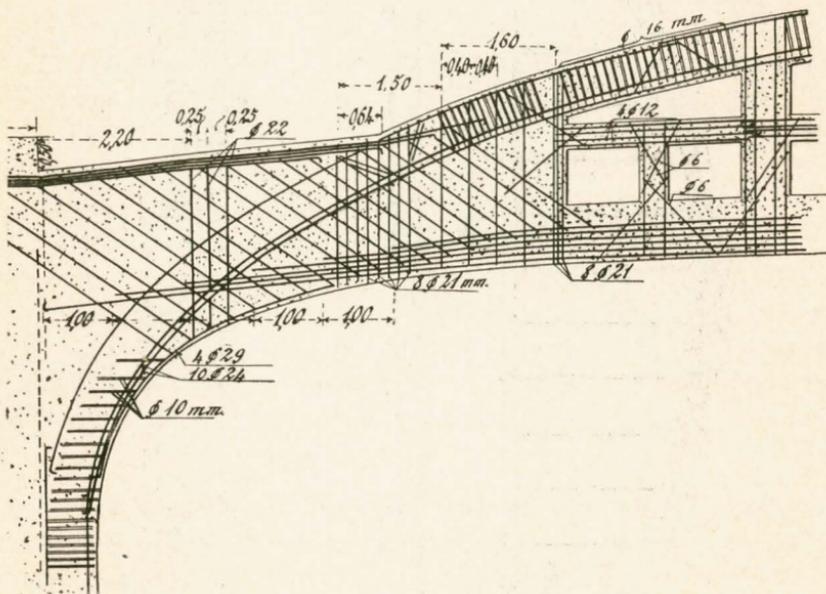


Fig. 207.—Puente en Villa Santina.

empuje de los arcos, cuyos montantes se aprovechan para la barandilla (figs. 206 y 207).

(1) Detalles, en *Ponti in cemento armato*, de Santarella e Miozzi. Láminas 17 y 18. Se construyó en cuatro meses, en 1916, por necesidades militares, utilizando los apoyos de un puente viejo destruido por una crecida, y fué nuevamente destruido en la retirada de Caporetto por el ejército italiano.

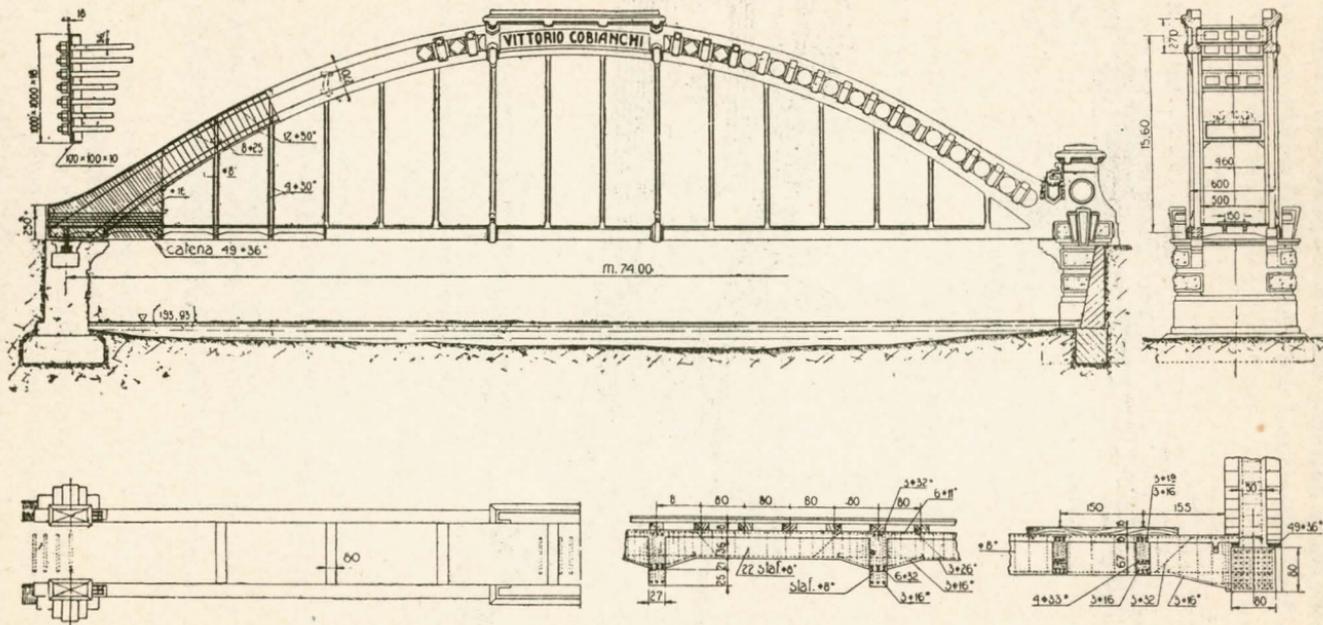


Fig. 208.—Puente Cobianchi (Italia).

Calculado para un cilindro de 23 toneladas y un tren de artillería pesada y sobrecarga estática de 500 kg./m².

Pero los moldes de los arcos-vigas, así como la cimbra y el moldeo del hormigón, tuvieron que resultar más caros que con otras disposiciones de mayor sencillez.

Puente Cobianchi, en Intra (Italia).—En el ferrocarril Pallanza-Intra (fig. 208).

El arco, de 74 m. de luz entre apoyos, tiene sección de doble T con 2,70 m. de altura (espesor del alma, 0,26; anchura de las alas, 0,90; altura, 0,40).

El tirante inferior del arco lleva 49 redondos de 36 mm. de una sola pieza, atornillados en sus extremos a chapas de palastro de $1 \times 1 \times 0,016$.

El tramo se apoya sobre dos placas fijas en un estribo y dos placas con rodillos en el otro.

Se calculó para dos locomotoras de 45 tn. en tres ejes y cuatro vagones de 32,5 tn. en dos ejes.

El trabajo del hormigón de 300 kgs. no excedió de 60 kg./cm².

La máxima deformación en las pruebas, con la carga completa, fué de 1 mm. en el arco y de 2 mm. en el tablero.

Es uno de los puentes que más honran a la Ingeniería italiana y al autor del proyecto, muy ilustre ingeniero y profesor Luigi Santarella, autor de numerosos libros, entre ellos *Ponti in cemento armato*, del que extractamos interesantes ejemplos para este tomo.

Puente sobre el río Melegue (Túnez).—Se adjudicó por concurso al proyecto de los ingenieros Pelnard, Considère y Caquot (figura 209).

Una capa de fango líquido de 11 a 12 mm. de espesor en todo el lecho del río aconsejó la adopción de un tramo único de 90 m.

La altura de las crecidas obligó a emplear un arco superior, atirantado por el tablero; éste se apoya en los estribos por una articulación de H. A. mediante dos superficies cilíndricas armadas con cuadrículas de redondos, cuya adherencia inicial se reduce por dos hojas de cinc con engrase intermedio.

Para disminuir el peso muerto se aligeraron con celosías los

grandes arcos y se empleó el cemento fundido, lo que permitió además acortar el plazo para descimbramientos.

La ligereza así obtenida permitió apoyar este tramo, con la

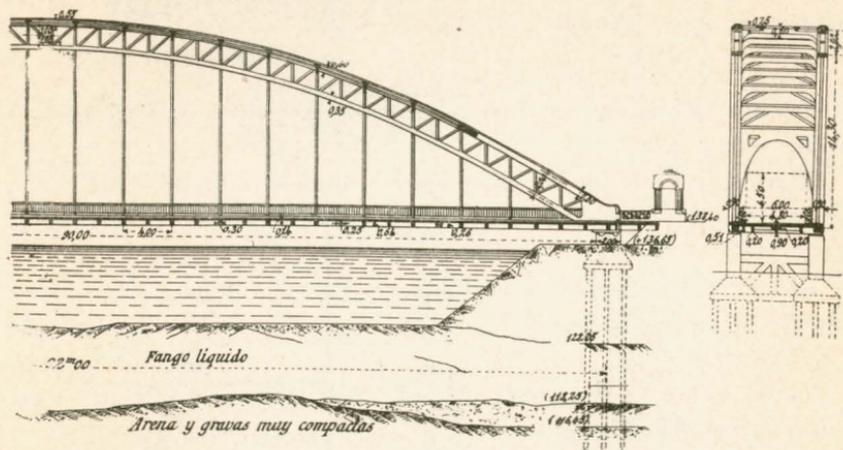


Fig. 209.—Puentes sobre el río Melegue (Túnez).

luz excepcional de 92 m., sobre someros estribos cimentados cada uno con 18 pilotes.

La flecha máxima al descimbrar fué solo de 58 mm., o sea $\frac{1}{1.580}$ de la luz; pero en la ejecución se observaron las especialísimas precauciones que exige una obra tan delicada que requiere unos moldes y una mano de obra perfectos (1).

§ IV.—CON PUENTES COLGADOS

Mejor que explicaciones valen ejemplos.

Puente-acueducto colgado sobre el río Guadalete (Jerez).—

Este puente-acueducto, proyectado y construido por la Compañía de Construcciones Hidráulicas y Civiles, para la conducción de aguas de Jerez, tiene un tramo *colgado* de 57 m. de luz, con dispo-

(1) Detalles, en *Génie Civil* de 17 de septiembre de 1927.

siciones nuevas y originales, debidas a mi aventajado discípulo y colaborador D. Eduardo Torroja (figs. 210 y 211).

El acueducto es un cajero de H. A. con la disposición preconizada por el autor hace treinta años (1); las paredes laterales son las vigas del tramo; la losa superior sirve al mismo tiempo de pasarela y de cabeza de compresión del tramo; en la losa inferior se apoya la tubería de fundición de 0,42 m., así abrigada de la intemperie y cómodamente inspeccionada por agujeros de hombre cada 20 cm., cerrados con tapas móviles de H. A.

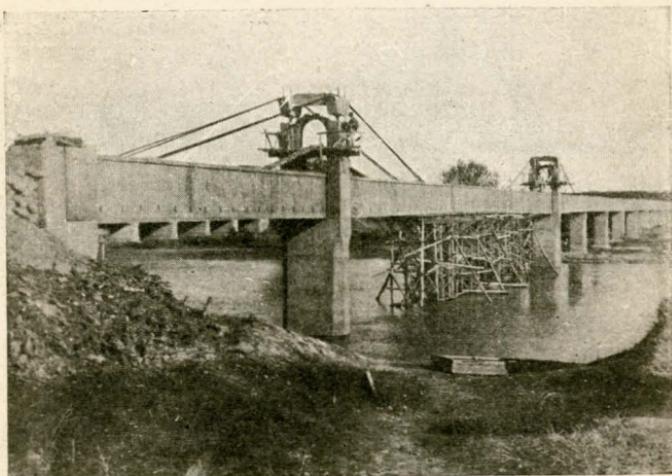


Fig. 210.—Puente colgado del Guadalete.

El tramo colgado está constituido como un *cantilever*, con dos ménsulas de 20 m. en voladizo y un tramo central de 17 m. apoyado en aquéllas (fig. 211).

Los tramos en ménsula están sostenidos por tirantes de cable hormigonado que apoyan sobre la pila.

Cada tirante lleva cuatro cables de acero de 63 mm. de diámetro formado por siete cordones de treinta y siete alambres de 3 mm.

Los tramos de cajero que constituyen las ménsulas se apoyan sobre la pila por una rótula que anula los esfuerzos debidos a los cambios de temperatura o a los alargamientos elásticos del cable.

(1) Véase el acueducto de Araxes, capítulo IX.

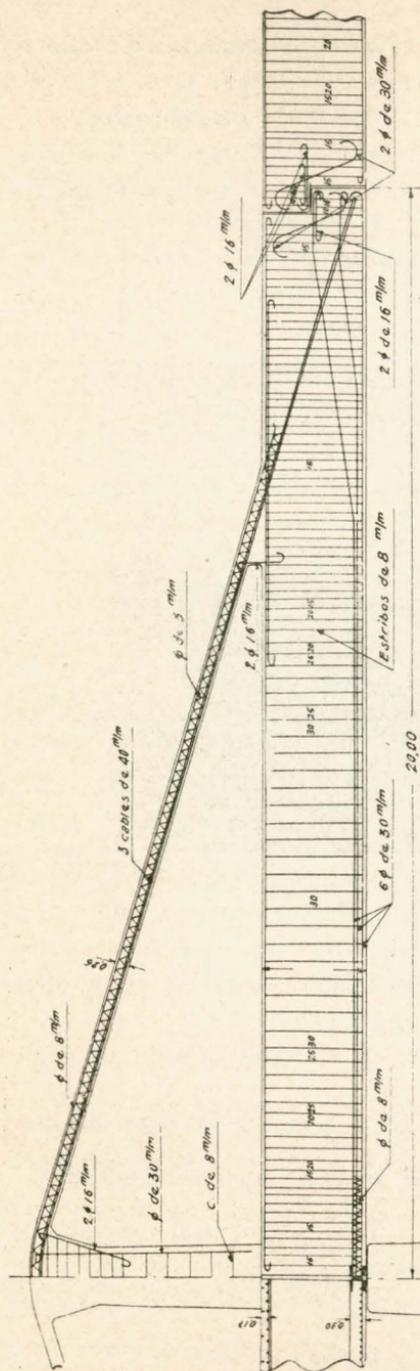


Fig. 211.—Sección longitudinal del puente de Guadalete.

La dificultad principal de estos tramos colgados estribaba en que debían tensarse previamente los cables, para que, al entrar en trabajo, no se alargaran excesivamente; pero este problema se resolvió con toda facilidad por el siguiente procedimiento, ideado por el Sr. Torroja, que dirigía también aquellas obras: la cabeza o parte superior de la pila se hormigonó separada del resto, de tal modo que pudiera desplazarse verticalmente, para lo que las armaduras verticales quedaban libres en tubos preparados al efecto y los cables apoyaban sobre camas de palastro empotradas sobre la cabeza de la pila.

Pasado el mes de fraguado de los tramos se levantaron las cabezas de las pilas con gatos hidráulicos, tensando con ello los cables hasta hacer despegar los tramos de la cimbra y se enclavó la obra, terminando de hormigonar las pilas y haciendo el revestimiento de los cables.

Esta interesante obra, que está prestando servicio desde 1926, fué contratada en 240.720 pesetas, o sean 1.350 pesetas por metro lineal.

Evidencia que pueden utilizarse en puentes de H. A. las enormes resistencias obtenidas con los cables de acero (1).

Paso superior colgado de Laon (Francia).—Posteriormente al puente-acueducto colgado que acabamos de describir, se construyeron en 1928 dos tramos colgados de 35 m. sobre las vías de la estación de Laon (figs. 212 y 213).

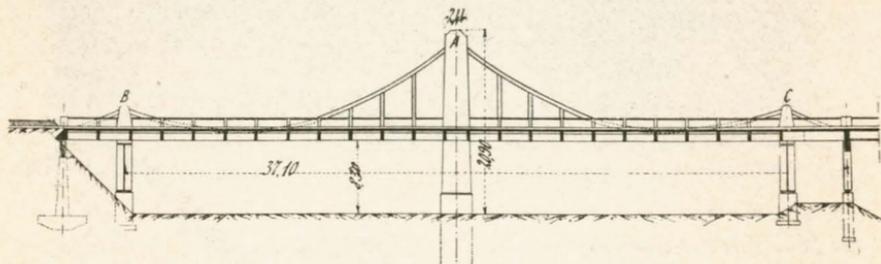


Fig. 212.—Paso superior colgado de Laon.

En estos tramos el tablero está colgado de los cables por medio de péndolas a 3,50 m. de distancia.

Los cables y péndolas están constituídos por aceros redondos de 13 mm. envueltos en mortero de cemento, que únicamente sirve en este caso para proteger el metal.

(1) Más detalles, en un artículo del Sr. Torroja, en la *Revista de Obras Públicas* de 1927, pág. 193, y en una nota al II Congreso Internacional de Puentes celebrado en Viena el año 1928, publicada en el *Boletín* correspondiente, pág. 683.

antiguo puente de este tipo que había que reconstruir. Las dos articulaciones de arranques estaban situadas cerca de los apoyos del arco sobre los pilares de estribos; la tercera articulación, en el centro del arco, donde éste viene a ser tangente al tablero; todas ellas son del tipo Mesnager.

El puente resultó más caro que con otras varias soluciones presentadas en el concurso de proyectos, como no podía menos de suceder, dada la inútil complicación de las tres articulaciones, que no ofrecen en este caso ninguna ventaja.

Puente de Montrose (Inglaterra).—Más que de puente colgado es del tipo *Cantilever* y para carretera. El tramo central tiene 65 m. de luz, y los laterales, 32,5 m. (fig. 215).

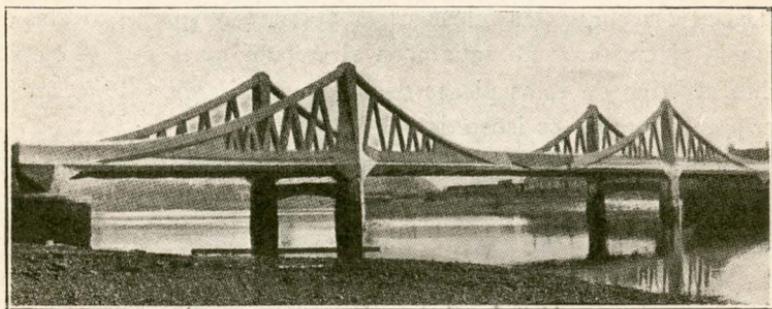


Fig. 215.—Puente de Montrose (Inglaterra).

Construido en 1930 por 90.000 libras, o sean más de 30.000 pesetas por metro lineal de tramo (1).

Resulta una disposición carísima, suponemos que por los cimientos, moldes y mano de obra.

§ V.—CONCLUSIONES COMPARATIVAS

Cualquiera que sea la disposición de estos arcos sin empuje, como son más caras que los tipos corrientes de tramos rectos o arcos inferiores empotrados, sólo deben aplicarse si las rasantes o los cimientos, u otras circunstancias, así lo exigieran.

(1) *Concrete and Constructional Engineering*, febrero, 1931.

Con arcos inferiores.—Son muy contados los ejemplos que figuran en libros y revistas, y los que se citan no han sido muy reproducidos; ello parece demostrar que son discutibles sus aparentes ventajas.

Con pórticos.—Son puentes muy científicos; pero con sus formas variadas, con arreglo a las exigencias de cada caso, resultan caros de cimbras y moldes.

Con arcos superiores.—Se han generalizado bastante, y son desde luego más airosos de aspecto que los tramos rectos con vigas aligeradas de forma rectangular, de que nos ocupamos en el capítulo primero.

Deben desecharse las celosías trianguladas, cuyas diagonales complican la ejecución y no satisfacen al cálculo, pues que el empotramiento efectivo de estas piezas desvirtúa la hipótesis de la articulación, por lo que no es isostático el entramado.

Son preferibles y se aplican con más frecuencia las vigas curvas tipo Vierendeel, con montantes verticales, para luces comprendidas entre 20 y 40 m.

Para reducir el coste de estos tipos de puente es muy conveniente unificar las luces; así las cimbras y moldes puedan amortizarse en varios tramos.

Cuando sea forzoso proyectar arcos superiores con luces mayores de 40 m., resultará más económica la disposición de tablero suspendido por medio de ligeras péndolas.

Pero insistimos en que debe huirse de la alucinante propensión a las grandes luces para estos arcos.

Si se ejecuta un solo tramo, no sólo los volúmenes de hormigón y peso de hierro son mucho mayores que dividiendo la luz en dos o más tramos, sino que en un solo arco el coste de cimbras y moldes tiene que amortizarse de una vez, mientras que dividiendo la luz en varios tramos, este gasto es mucho menor y se amortiza en los varios tramos en que puede sucesivamente emplearse.

Verdad es que entonces habrá que añadir una o varias pilas suplementarias; pero como al reducir las luces de los tramos su peso disminuye sensiblemente, el coste de estas pilas intermedias de pe-

queña altura será casi siempre inferior a la gran economía obtenida por la subdivisión del tramo único en varios tramos.

Puentes colgados.—Se creía que los considerables alargamientos que sufren los cables de acero cuando se tensan impediría su empleo en puentes de H. A.

Pero el original procedimiento imaginado por D. Eduardo Torroja para poner en tensión previa los cables anula aquel inconveniente.

Queda siempre, sin embargo, la desventaja de que el hormigón con que se envuelven cables y péndolas no contribuye a la resistencia y aumenta el peso del puente y sus moldes y mano de obra.

Así es que sólo cuando por la escasa consistencia del terreno de cimientos convenga suprimir empujes oblicuos en los apoyos y reducir el peso de los tramos en arco, puede recurrirse a los puentes colgados.

Deberá, sin embargo, compararse su coste con el de la solución enteramente metálica de puente colgado, en el que se limite el empleo del H. A. al forjado del piso, que para mayor ligereza puede pavimentarse con losetas de asfalto comprimido (1).

Aun así, y para tramos que no excedan de 50 m. de luz, esta solución metálica de puente colgado es más cara que los tramos rectos y arcos de H. A., según pudimos comprobar en un estudio comparativo que hicimos para los puentes que construimos en Fernando Poo y Guinea.

(1) Esta fué la solución proyectada y construída por el autor en su puente de Amposta, sobre el Ebro, con un tramo colgado de 135 m., descrito en la *Revista de Obras Públicas* de 1914, págs. 527, 539 y 551.