

LOS ARCOS DE TABLERO INTERMEDIO

Por CÉSAR VILLALBA GRANDA, Ingeniero de Caminos.

Nos presenta el autor una descripción muy completa del interesante puente de Peñafiel, proyectado y dirigido por él mismo. Por su extensión le dividiremos en dos artículos, publicando en éste las consideraciones preliminares sobre la elección de tipo de puente; una relación de los que del mismo tipo existen ya construidos, y las características generales de la obra, con el estudio del sistema de montaje adoptado; y dejamos para el próximo la exposición referente a los métodos de cálculo adoptados en tan importante trabajo.

El nuevo puente del Duero, en Peñafiel.

El nuevo puente sobre el río Duero en Peñafiel (Valladolid), terminado hace poco tiempo, presenta diversas particularidades, aparte de su importancia general, por lo que creemos será interesante dar a conocer esta obra, que en la Jefatura de Puentes y Estructuras he proyectado y dirigido, continuando así la exposición, ya bien dilatada, por cierto, de obras que en dicho Servicio he realizado en más de quince años de ininterrumpido trabajo.

Tres son las características más destacadas de esta obra: el tipo adoptado para la estructura, arcos empujados de piso intermedio, la disposición del tablero, con junta central, y el tipo de armadura de montaje, rígida, construida con electrosoldadura en taller y montada con pernos.

La carretera de Esguevillas a Peñafiel cruzaba el río Duero por un antiguo puente en deplorables condiciones, tanto en lo que se refiere al ancho del puente como al ruinoso y peligroso estado de sus apoyos y bóvedas, aquéllos con enormes socavaciones, si bien, contra todo lo previsible, la obra sigue en pie, corroborando el aserto de la "tendencia de las obras a no caerse".

Desagüe.

En el proyecto se realizó un detenido estudio de los desagües precisos, como corresponde a un río de la importancia del Duero. Fué estudiado el desagüe lineal en función de la longitud de la corriente por aplicación de las fórmulas de Sejourné, ferrocarriles franceses; el que es función de la superficie de cuenca, fórmulas de Sejourné, Durand, Claye y Bouffet; el que es función de la superficie de cuenca y de la pendiente, según los estudios experimentales del Tarn-et Garonne. El caudal máximo fué deducido: 1.º, por el caudal máximo según el estudio de la lluvia máxima, siguiendo el criterio de Gay; 2.º, por la superficie de cuenca, utilizando las fórmulas de Kuichling y los datos de Atvord y Burdick. Se obtuvieron tam-

bién cifras del desagüe superficial y lineal mediante el empleo directo de datos de la zona estudiada, por comparación con otras obras; por el estudio del régimen de crecidas, aprovechando la circunstancia de estar instalado en el antiguo puente una estación de aforos. Del estudio de los datos de esta estación en período de diez años, se determinó la frecuencia, intensidad de crecidas y régimen, lo que sirvió para el estudio de los desagües de crecidas, época y forma de construcción. También sirvieron estos datos para determinar los valores probables de la máxima avenida en una centuria, mediante aplicación de la fórmula de Fuller. Y, por último, se estudiaron los máximos caudales y velocidad, mediante aplicación de las fórmulas usuales de hidráulica.

En definitiva, y para dar idea de la cuantía y mayor o menor discrepancia de los valores obtenidos, resumimos a continuación los resultados obtenidos:

Desagüe lineal . . .	{	En función de la superficie de cuenca	177 m. 105 m. 120 m.
		En función de obras análogas (puente antiguo)	116,60 m.
Desagüe superficial .	{	En función de obras análogas (puente antiguo)	696 m. ² .
		Por la línea de máximas crecidas extraordinarias	900 m. ² .
Caudal máximo . . .	{	Según la lluvia máxima	2646 m. ³ /seg.
		Según la superficie de cuenca, 3409 ÷	4015 ídem.
		Según valores observados . .	
		Superior a	352 ídem.
		Según el cálculo de probabilidades	2340 ídem.
		Según las fórmulas de hidráulica	2376 ídem.

Vistos estos resultados, y analizado el mayor o menor coeficiente de exactitud que a cada uno de ellos hay que aplicar, fijamos para desagüe lineal útil el de 116,70 m., y el superficial útil, 900 m.², con huelgo de 1,50 m. bajo el borde inferior de tablero.

Fundaciones.

Teniendo en cuenta los resultados de los sondeos, los desagües adoptados y la topografía del cauce se eligieron tres tramos de 40 m., cuyos dos estribos y pilas se fundaron por aire comprimido, mediante los cajones de hormigón armado que estudiamos y hemos empleado en tantas cimentaciones y que son ya clásicos.

El terreno se compone de una capa superficial que en la margen derecha es de grava, gravillas y arenas, y en la izquierda, una arena conglomerada, sin llegar a arenisca, floja y deleznable, cubierta en las márgenes por otra de tierras muy arenosas, todas ellas, por lo que a socavaciones respecta, inadecuadas para fundar, siendo la adecuada la de areniscas arcillosas rojizas situada a cotas de 14 m. en la margen derecha, 6 a 9 m. en el cauce y 11 m. en la izquierda.

La presencia de yesos, especialmente en los terrenos básicos de la fundación, obligó al empleo de cemento aluminoso en cámaras de trabajo y en una envoltente de 1 m. de espesor en los bloques, así como en la base del relleno de cámaras.

Dadas las dimensiones de los estribos y el valor elevado, tanto del sistema de fundación como del hormigón de cemento aluminoso que forma parte del bloque, aconsejaba reducir en lo posible el volumen de la cimentación. Por ello, para cada uno de los estribos, se hincaron dos bloques gemelos en vez de un gran bloque único, separados 2 m. entre paramentos interiores y uniendo sus enrasas en la zona precisa para formar el frente único corrido del alzado del estribo, mediante una losa armada. Esta disposición la hemos empleado en muchos casos, previendo, en caso preciso, la socavación bajo la losa y hacia el terraplén por una pantalla vertical de cierre, como en el puente del Arlanza, en Lerma (Burgos), y en la práctica ha resultado más ventajosa que otra disposición análoga que empleamos, por ejemplo, en el puente del Guadalquivir, en Brenes (Sevilla), efectuando el enlace mediante una bóveda, lo que puede dar lugar a empujes oblicuos y además precisa mayor altura. Requiere, en cambio, armaduras, pero éstas son escasas, dando a la losa cierto espesor.

Las cámaras de trabajo de los bloques gemelos son de $6,40 \times 10,40$ m.

La cimentación de las pilas se efectuó por bloque único, de $14,20 \times 5,40$ m.

Como los muros de acompañamiento del estribo derecho son cortos, su fundación se hace en el mismo bloque del estribo, salvo una ampliación de 3,50 m. en la zona de ladera. Pero, por la forma de ésta, los muros de la margen izquierda son de mayor longitud, por lo cual su fundación se efectuó mediante dos bloques idénticos, uno para cada muro, hincados directamente por agotamientos en cajón de hormigón armado, enclavado en la capa de margas. La situación, ya

alejada del cauce, de estas fundaciones, aconsejó su hinca por agotamientos.

Estos cajones, en planta de $4,35 \times 9,65$ m. llevan, como los de apoyos, su envoltente y base en 1 m. de espesor, de hormigón de cemento aluminoso de 300 kilogramos; el relleno, de portland de 200.

La separación entre ambos bloques es de 5,30 m. entre paramentos próximos, no precisando enlace uno con otro por sustentar los muros paralelos independientes. No así el enlace de cada bloque con el correlativo del estribo, el cual se efectúa, como entre los bloques gemelos de los estribos, mediante una losa armada de 5 m. de luz libre y 0,80 m. de espesor. Las discontinuidades de cimentación, que se traducen en diferencias de asiento, se salvan en los alzados mediante juntas.

Elección de luces y tipos de tramos.

Resultado del estudio del cauce, desagüe y coste de fundación, se vió la conveniencia de la adopción de tres tramos de unos 40 m. cada uno, luz que ya aconsejaba el empleo de arcos, pero la gran diferencia entre el nivel de estiaje y el de máximas avenidas, 7,54 m., obligaba, para no establecer los arranques de los arcos excesivamente sumergidos, a elevarlos, y, de no elevar también la rasante del tablero, con el consiguiente encarecimiento por la mayor altura de apoyos, y ser ello innecesario para el desagüe y para el acceso, a emplear arcos muy rebajados. Así, por ejemplo, con el arranque de los arcos sólo sumergido 1,30 m. en crecidas extraordinarias y nada en las ordinarias, mínimo que hemos aceptado, hubiese sido preciso, con la rasante del tablero, establecer arcos rebajados a $1/12$.

Ahora bien; la ventaja de la adopción de los arcos de tablero intermedio adoptada en esta obra es la de disponer con libertad del rebajamiento más conveniente, no solamente por el mayor coste intrínseco, ya que, como afirma R. Vallette ("Constructions en arc. Pont en arc: Determination des caractéristiques optimales". *Memorias de la A. I. P. C.*, 1933-34), para una resistencia, por ejemplo, de 80 Kg., un arco de 100 m. precisa secciones cuatro veces mayores con un rebajamiento de $1/10$ que con otro de $1/5$, sino porque el aumento de oblicuidad de los empujes de las bóvedas produce no solamente un aumento en las dimensiones de las pilas, sino especialmente en los estribos, cuya cimentación es la de mayor coste por la profundidad a que se encuentra el terreno apto para fundar, y teniendo además en cuenta que son cimentaciones caras, cuyas dimensiones convenía afinar en lo posible.

Disponiendo, en definitiva, los arcos con tablero intermedio, pudimos elegir libremente el rebajamiento más conveniente, tanto desde el punto de vista de

los arcos propiamente dichos como de sus empujes en lo que a sus apoyos respecta, aunando ambas circunstancias del modo más conveniente.

No fué preciso, en este caso, llegar a la solución de arcos atirantados que hemos empleado en los casos en que así lo requiere la altura de rasante u otras circunstancias (puente del Guadalquivir en Brenes, del Pedrido, etc.), por disponer en este caso de algún espacio entre el nivel de crecidas y la rasante, sin necesidad de utilizar los arcos atirantados, en los cuales es sabido que los aparatos de apoyo y, especialmente el tirante, encarecen la solución.

Ventajas de las soluciones de arcos con tablero intermedio.

Insistimos en la ventaja, en gran número de casos, de los arcos de tablero intermedio, ya que es tipo poco empleado, especialmente en España.

Indudablemente el arco atravesando el tablero requiere una mayor anchura en la estructura y cimentación para dejar paso a la circulación entre dos arcos gemelos, y presenta alguna mayor dificultad en la ejecución, traduciéndose la mayor libertad en la elección de la flecha en más gasto de cimbra. Pero construyendo los arcos con armadura de perfiles estricta para el montaje, como hemos hecho en Peñafiel, y haciendo los arcos primero, según el método empleado en Francia y montando después las viguetas colgadas de péndolas metálicas, para hormigonar lo último el tablero, apoyando el encofrado en dichas viguetas, como hemos hecho en el Pedrido y en éste de Peñafiel, la obra resulta más económica, de fácil ejecución, al abrigo de las avenidas, y la solución más conveniente en muchos casos, especialmente por la disminución de empujes que proporcionó el adoptar el rebajamiento más conveniente compatible con el estado funcional del arco, particularmente en lo que respecta a los esfuerzos transversales debidos a la acción del viento, a los que, por otra parte, proporciona una buena parte de su arriostramiento el propio tablero, permite reducir la dimensión longitudinal de los cimientos; y esto tiene especial importancia en las obras de sustitución de superestructuras, bien por reconstrucción de obras u otros casos en los cuales debe aprovecharse la cimentación, pues siempre será más conveniente a la estabilidad el ensanche con ménsulas en sentido transversal (caso del puente del Tajo, en Añover; Guadalquivir, en Brenes y en Posadas, etc.) que requiere, como hemos dicho, el mayor ancho entre bóvedas gemelas, que el ensanche con ménsulas en el otro sentido, descentrando peligrosamente el paso de la resultante.

Algunos tipos de puentes de piso intermedio.

Como hemos dicho, en España es sistema apenas utilizado. No conocemos más casos, aparte de este puente de Peñafiel, que el del Narcea, en Requejo (Asturias), arco de 42 m. con articulación única en clave (Ingeniero Sr. Sánchez del Río) (fig. 1.^a); el de reconstrucción sobre el Ebro, en Mora, 5 arcos, los tres centrales triarticulados (fig. 2.^a) (Ingeniero señor Serrano Súñer).

Francia. — En Francia se ha empleado en casos verdaderamente notables, como el puente de la Roche-Guyon (fig. 3.^a), construido en 1934, de 161,40 metros de luz, *record* actual de puentes de este tipo, rebajado a 1/7, proyectado por R. Vallette y primera aplicación integral del estudio científico del arco, con arcos de espesor menor en arranques que en clave, por determinación de esfuerzos mediante las leyes de semejanza generalizadas y de las relaciones entre el área de las secciones; es decir, la masa del arco a sus dimensiones y a la resistencia del material empleado, analizando la variación de la sección media del arco en función de sus dimensiones y la resistencia del hormigón. Este análisis permite fijar las características del arco según las condiciones precisas. El análisis de las variaciones de esta sección y por otra parte de los esfuerzos del arco, permite determinar el perfil óptimo del arco. Este puente fué volado en 1940.

El puente de Port-d'Agries, sobre el Lot (fig. 4.^a), arco triarticulado de 91 m. y péndolas oblicuas, construido en 1925. Presenta la particularidad de la disposición especial de las tres articulaciones dispuestas por debajo del tablero y ninguna en la clave de los arcos, que crean una autocompresión por gravedad, interesante artificio que pudiera aplicarse a las vigas simples y en pórtico, para comprimir el cordón inferior, que sufre después tracciones. Se puede igual-



Fig. 1.^a. — Puente del Narcea, en Requejo (Asturias).

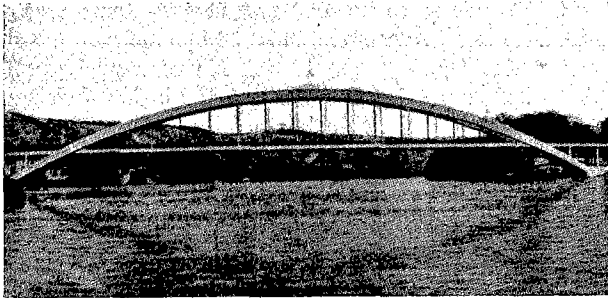


Fig. 3.^a. — Puente de la Roche-Guyon (Francia).



Fig. 4.^a. — Puente de Port-d'Agries, sobre el Lot (Francia).

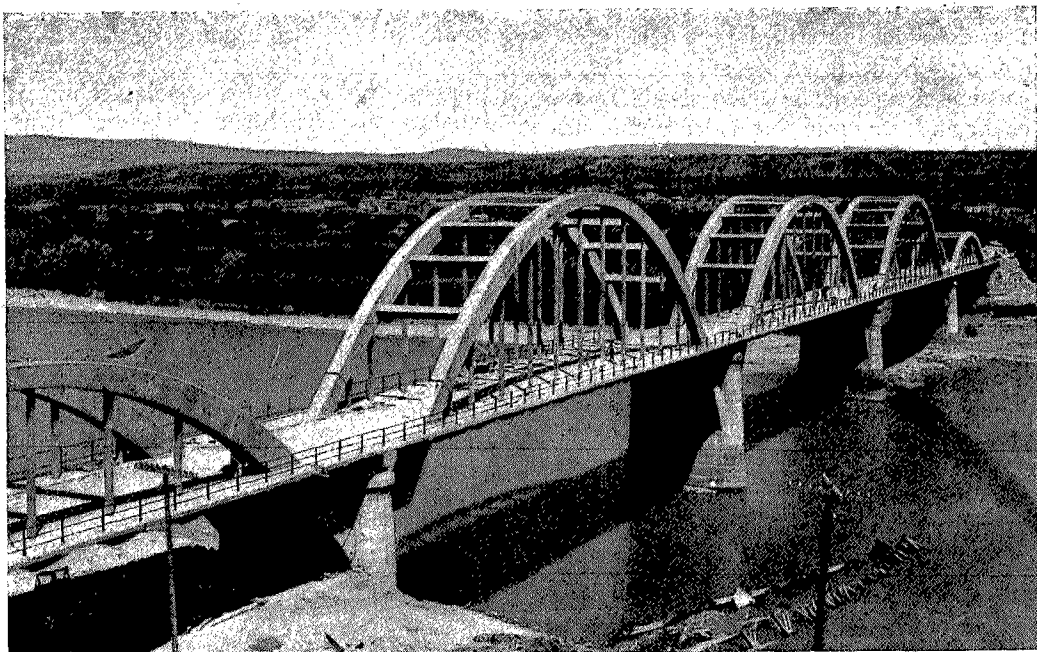


Fig. 2.^a. — Puente del Ebro, en Mora (Tarragona).

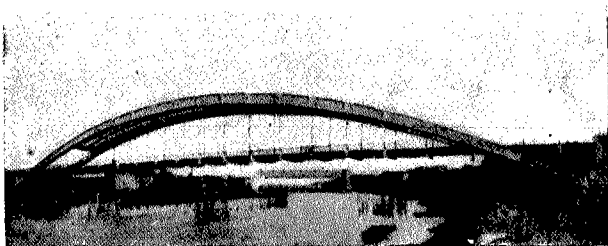


Fig. 5.^a. — Puente del Oise, en Conflans-sur-Seine (Francia).

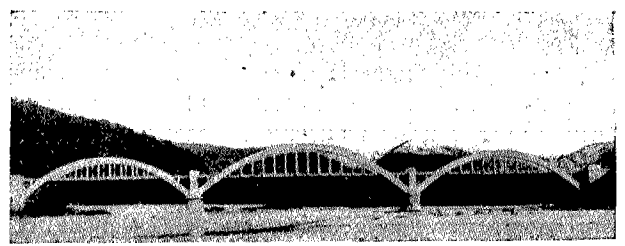


Fig. 6.^a. — Puente de Sequals, en el Torrente Meduna (Italia).

mente utilizar esta compresión por gravedad en los otros sistemas en arco (es la base de la estabilidad de las bóvedas de mampostería), para obtener ciertos efectos correctores por inclinación de los montantes de los pórticos, etc.

El puente de Castel-Morón, de 143,35 m., rebajado a 1/5,5, con tablero suspendido en péndolas oblicuas, sistema variable; arco triarticulado, construido en 1933.

El puente sobre el Oise, en Conflansin d'Oise (fig. 5.^a), de 126 m., terminado en 1929, de realización análoga a la del puente de La Roche-Guyon, de arco empotrado con sección menor en arranques, debido al mismo Ingeniero y también destruido en la guerra actual, en 1940.

Y el de Saint-Pierre de Vauvray, obra de Freysinet, bien conocida. Construido en 1923, destruido en la guerra actual y vuelto a reconstruir, es un arco de 131,80 m. de luz y 25 de flecha, empotrado, presentando la particularidad de ser el primer puente que se construyó con arcos huecos de paredes delgadas.

Italia. — El más característico es el puente de Seguals, en el torrente Meduna (fig. 6.^a). Tres arcos triarticulados y vanos de 46,20-56,00-46,20 m., proyecto del Ingeniero Feliciano Bianchi, y construido en 1921. Este puente ofrece un ejemplo de las ventajas de la reducción de empuje que puede lograrse en los arcos de piso intermedio, ya que se eligió precisamente para aprovechar las fundaciones de un puente metálico de 4 vigas continuas construido en 1875 y destruido en la guerra del 14 por los austríacos en la jornada de Vittorio Veneto, sin más que una ampliación con placa de hormigón armado. Por cierto que en el reconocimiento de las antiguas fundaciones se presentó un caso digno de mención: en la pila derecha, al llegar con la demolición al cajón de hincas, resultó la sorpresa de que la cámara de trabajo, metálica, estaba completamente vacía, por



Fig. 7.^a. — Acueducto Pugliese, sobre el Ofanto (Italia).

destrucción y arrastre del relleno a través de alguna placa corroída por la acción del tiempo y del agua. La fábrica del cuerpo de la pila apoyaba en el techo del cajón, cuyas paredes transmitían a la roca la carga superior. Interesante lección que demuestra la cautela con que se deben aprovechar viejas cimentaciones, nunca sin un detallado reconocimiento y sondeo a través de sus fábricas.

El puente de Villa-Santina, sobre el Tagliamento, construido en 1916, según proyecto del Ingeniero Mario Baroni; ofrece la particularidad de ser un arco solidario con el estribo, de 38,40 m. y tablero con barandilla de resistencia. Este puente fué destruido durante la retirada italiana de Caporetto, en la guerra anterior.

El acueducto Pugliese, sobre el Ofanto (fig. 7.^a), construido por el Ingeniero Antonio Garboli, es una obra de 7 arcos empotrados de 25 m. de luz y 4,25 m. de flecha, que presenta la particularidad de soportar, en tablero intermedio, un canal rectangular y tablero superior para carretera.



Fig. 8.^a. — Puente de Kill van Kull, N. Y. (E. U.)

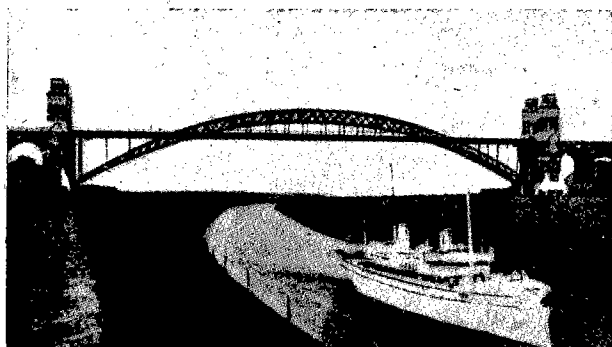


Fig. 9.ª. — Puente de Grünenthal en el Norddootsee Kanal (Alemania).

Otros países. — Citaremos, entre otros casos interesantes de puentes de hormigón armado de tablero intermedio, el puente de Chippis, sobre el Ródano, en Suiza, para ferrocarril, arco empotrado de 60,44 metros de luz, con tablero colgado de los arcos y junta de dilatación en el centro, como en nuestro puente de Peñafiel, pero con otra disposición de montantes, distinta de la usada por mí, ya que aquél presenta dos montantes inmediatos a la junta.

El tramo central del puente sobre el río Váh, en Pistany (Checoslovaquia), arco empotrado de 53,40 metros y 10 m. de flecha. Construido en 1931.

En Alemania no hay ejemplos importantes; podemos citar el puente de Wirkung, el de Saar en Völklingen, ambos con junta central de tablero, pero también, como el de Chippis, con dos péndolas centrales; el de Hängesäulen, etc.

Resumen.

Hemos citado los casos más destacados, por presentar alguna disposición interesante, además de la posición intermedia del tablero, ya que este mero hecho no merece en sí mención especial, pues tanto da una u otra posición relativa del tablero respecto al arco. Estos son unas veces articulados; otras, los más, empotrados, pudiendo clasificarse los arcos tipo Va-

lette (Roche-Guyon) como intermedios entre los articulados y empotrados.

Desde luego la solución de arcos de tablero intermedio será, en general, la obligada para los grandes arcos del porvenir, ya que la gran luz precisará disponer del rebajamiento adecuado, y ello obliga a rasantas de excesiva altura. Ya Freyssinet, en su genial concepción del arco de 1.000 metros presentado al Congreso de Lieja en 1930, se refería a un arco de tablero intermedio. Por la misma razón, los grandes arcos metálicos actualmente *record* mundiales, son de tablero intermedio (puentes de Kill van Kull (figura 8.ª) N. Y., de 503 m. y de Sydney, 503,25 m.), permitiendo esta disposición, en puentes metálicos, bellas realizaciones, como las logradas con los puentes de La Roche-Bernard, en el río La Vilaine (Francia), de 198 m. de luz; el de Bonn, en el Rhin (Alemania), con 188 m. de luz; el de Grünenthal (figura 9.ª), en el Norddootsee Kanal (Alemania), etc., etc.

Estimamos, en definitiva, que la solución de arcos de tablero intermedio debe ser tenida en cuenta con más frecuencia que hasta ahora, y sin que prejuzguemos la cuestión tan debatida de preferencia por los

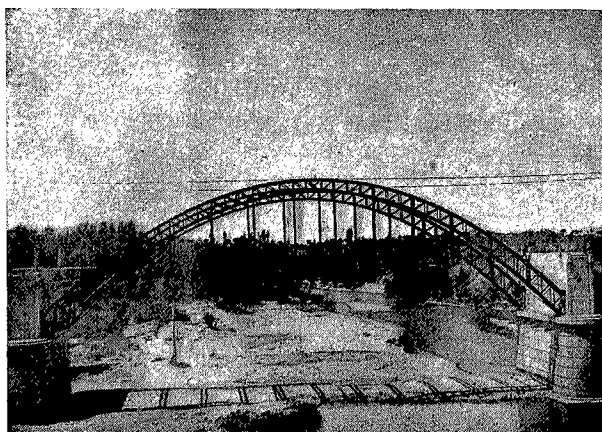
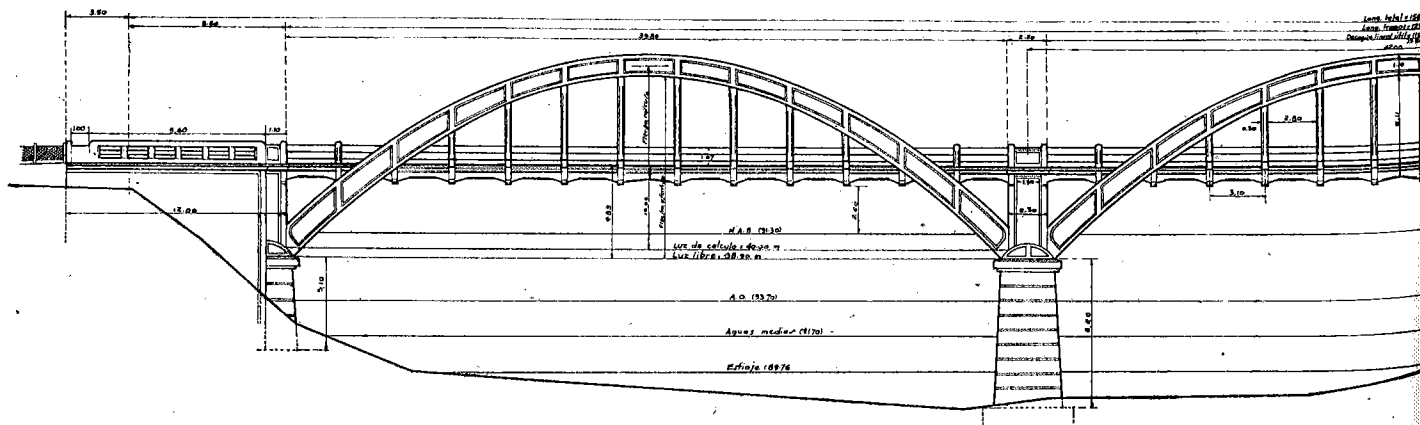


Fig. 11. — Armaduras de montaje para arcos y péndolas.



arcos empotrados o articulados, creemos más conveniente el empleo de aquéllos, si bien hemos visto en los ejemplos citados la utilización de arcos con una a tres articulaciones. El empleo de arcos tipo Vallette da, a nuestro juicio, una solución muy conveniente, especialmente para arcos de gran luz y cimentación no muy fija, que esperamos aplicar pronto en España en algún gran puente en estudio por la Jefatura de Puentes. De no ser así, creemos preferible el arco empotrado. El estudio de las deformaciones plásticas del hormigón ha permitido apreciar los inconvenientes del arco triarticulado, entre ellos el peligro de pandeo, a que lleva el efecto de la plasticidad (H. Lossier, *Le Génie Civil*, 1 y 8 de febrero de 1941; "El desarrollo cíclico del hormigón armado"), proscribiendo su empleo en arcos de gran luz.

Debe observarse, por otra parte, que, contrariamente a la hipótesis utilizada en el cálculo de los puentes articulados, las articulaciones no definen un punto del paso de la línea de presiones, sino una zona de paso y, contra lo que se podría creer, este paso está mejor definido en los arcos empotrados, como dice Sejourné.

El montaje deberá facilitarse con el empleo de las armaduras rígidas, estrictamente precisas, con viguetas constituidas igualmente, para hormigonar el tablero, sirviendo éstas de andamio.

Características generales.

La parte de puente propiamente dicha, comprende, entre muros de acompañamiento, una longitud de 156 m. con 116,70 m. de desagüe lineal útil, y consta de tres arcos de hormigón de 40 m. de luz de cálculo, cada uno, correspondiente a 38,90 m. de luz libre, rebajados a $1/4$ y con disposición de tablero intermedio, arcos apoyados sobre estribos y pilas de hormigón en masa (fig. 10).

Las pilas tienen alturas de 13,20 m. la primera, y 10,09 la segunda, con arranques de arcos a 7,45 m. y 4,25 m., respectivamente. Los anchos vienen fijados



Fig. 12. — Detalle de las armaduras de montaje en arcos, péndolas y viguetas.

por los planos verticales exteriores de los arcos, más los tajamares, y la dimensión normal por el estudio de las pilas como pilares de arcada triple.

Las fábricas son: el hormigón hidráulico de portland de 200 Kg., salvo tajamares, donde se refuerza la dosificación a 300 Kg. en 0,50 m. de espesor, por ser los elementos más expuestos a la acción de las aguas y arrastres sólidos.

Tramos. — Cada arco lo constituyen dos bóvedas gemelas con espesor constante de 1 m. en el retallo de moldura y 1,10 en el vuelo de la misma, y alturas crecientes desde clave, 1,10 m. a arranques.

Los frentes de las bóvedas son verticales a 8 m. de distancia entre planos verticales axiales.

Para curva directriz se adoptó la parábola de segundo grado, ya que siendo sensiblemente coincidente con la antifunicular, cuando el tablero y tabiques constituyen un peso soportado casi constante por unidad de luz, y ya que en esta clase de arcos no ocurre como en los de piso superior, donde el incremento del centro del arco a los arranques conduce a soluciones antimecánicas al utilizar la parábola de segundo grado. Aquí, por el contrario, la disminución de peso por unidad de longitud de proyec-

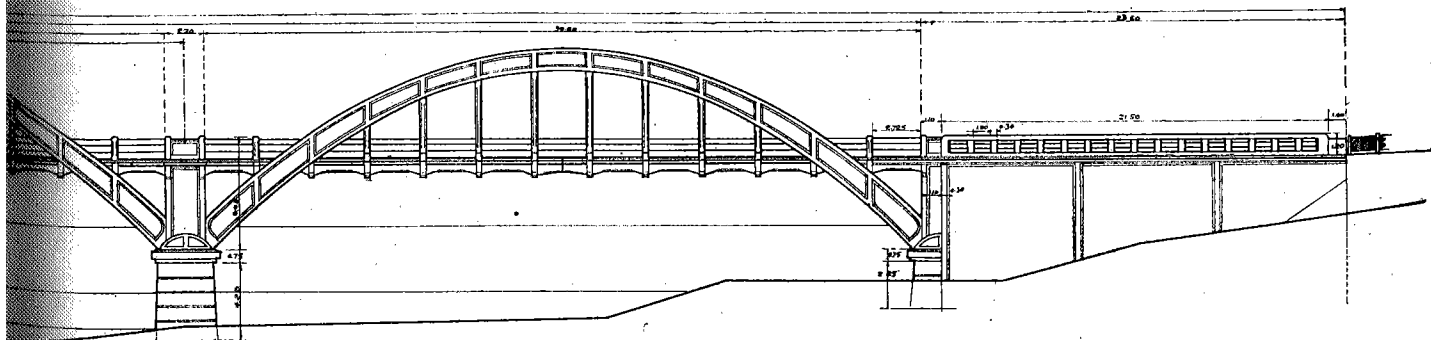


Fig. 10. — Alzado general.

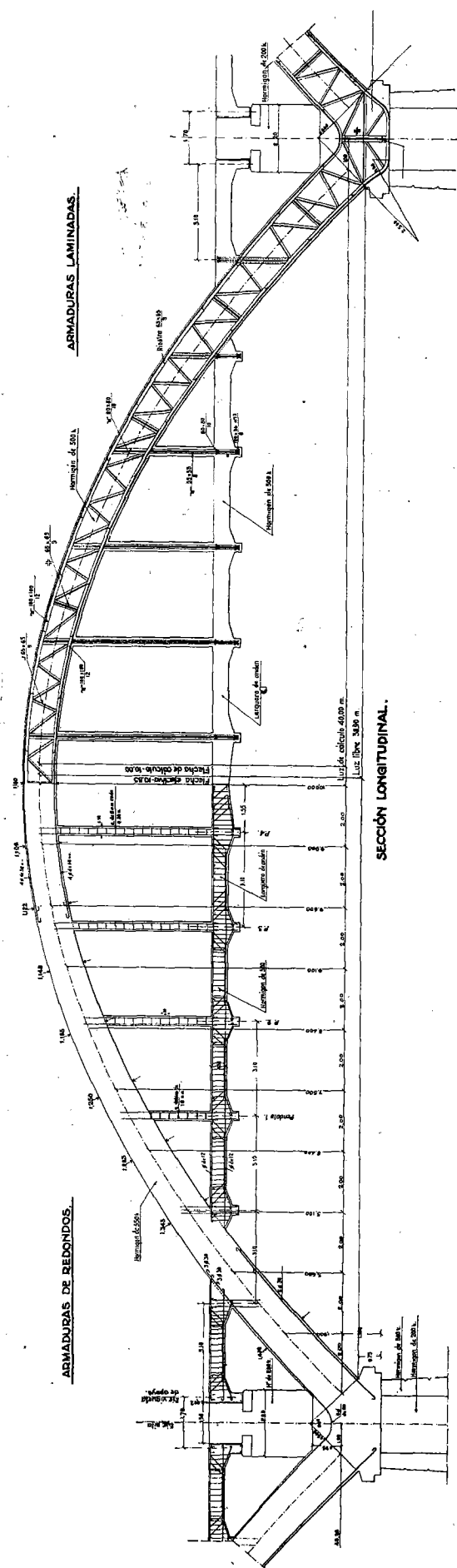


Figura 13.

ción de la directriz del arco, desde la clave hacia los arranques, viene compensada por la mayor longitud de las péndolas hacia el centro del arco y el peso de sus riostras. Compensadas unas y otras causas, en definitiva puede adoptarse, como curva directriz del arco, la parábola de segundo grado, al obtener un peso soportado casi constante por unidad de luz.

Montaje. — El estudio realizado del régimen del río y de sus curvas de frecuencia de crecidas, nos aconsejaron el empleo de un sistema de montaje sin cimbra. En efecto: si consideramos las alturas por crecidas, pasan los aumentos de nivel de los 5 m., 57 veces en el decenio estudiado (1921-30), esto es, cerca de 6 veces por año, y no podía contarse con bajos niveles para trabajar en el centro del río más que en el mes de agosto, habiendo en el anterior oscilaciones de 4 m. de alturas de agua, y en el siguiente, de 4.53 m., así como grandes crecidas en junio con alturas superiores a 9.5 m. Necesitando, por otra parte; tan corto período de estiaje seguro para el primer período de fundación de los apoyos situados en el centro del río, construcción de islas, cámaras de trabajo y primeros metros de hinca, para tener clavado en parte el bloque al venir las crecidas, se vió la conveniencia de construir los arcos sin cimbra alguna, ya que, aun prolongando el período de construcción en un mes o dos, a lo sumo, de cada estiaje, no había tiempo material de montar cimbras y andamios, hormigonar y fraguar.

Estas crecidas van acompañadas, además, de arrastres voluminosos que hacen peligrosa la instalación de apoyos intermedios.

Vemos, pues, el interés que tiene, en obras de importancia, el estudio y conocimiento previo del régimen del río, crecidas y su frecuencia, arrastres, etcétera, para fijar el sistema, plan de construcción y programa de trabajo.

En vista de esto, se dispuso la estructura del puente de manera que todo él se ejecutase sin cimbra ni apoyos accesorios, para lo cual, establecida la armadura rígida de los arcos, montada mediante castilletes erigidos sobre los estribos, de donde parten los cables sustentadores, se cuelgan de las armaduras de los arcos las armaduras rígidas de las péndolas y, uniéndolas transversalmente, la armadura rígida de las viguetas, estableciendo así un sistema que permite la colocación de los encofrados en el tablero (figs. 11 y 12).

Por estas razones, las armaduras de cada arco se estudiaron para el montaje en voladizo y pertenecen al sistema semirrígido; esto es, capaces de sostener el peso propio y el producido durante el moldeo, sin deformación sensible, mediante una estructura de perfiles laminados y completada luego con armadura de redondos con tensores igualatorios de cargas, ya que los redondos son más económicos, por lo cual

resulta más bajo el precio que si toda la armadura fuese rígida, y más adaptable a las modalidades de tensión en cada sección.

Dicha armadura laminada consiste, para cada bóveda, en dos cerchas formadas por dos angulares por cabeza de cercha de $\frac{100 \times 100}{12}$, arriostrados entre sí en sus planos verticales por una triangulación de angulares de $\frac{65 \times 65}{9}$, y transversalmente por angulares normales a cada cercha, que sirven para enlazarlas, también de $\frac{65 \times 65}{9}$.

Cada cercha, para los efectos de montaje, está dividida en varios trozos de longitud suficiente para permitir su fácil transporte y colocación en obra. En las verticales correspondientes a los montantes y péndolas, constituyen los elementos de la celosía para amarre de las piezas laminadas de aquellos montantes y péndolas dos angulares de $\frac{80 \times 80}{10}$, para cada cercha, y a las que se empalman los de aquellos elementos (fig. 13).

Sistema mixto. Soldadura y pasadores. — Se adoptó el sistema constructivo mixto de piezas soldadas en taller y el montaje en obra mediante empalmes por bridas, angulares, platabandas y tornillos. Este sistema mixto de soldadura en taller y montaje en obra por pasadores se ha empleado en este puente por primera vez en España.

El montaje de las construcciones soldadas en taller es realizado frecuentemente en el extranjero por medio de roblones o tornillos, porque el empleo de la soldadura en obra no siempre es económico. Cuando es necesario hacer uso de la soldadura en obra es preciso tenerlo así en cuenta en el proyecto y no prever a este efecto más que cordones de soldadura cuyas posiciones correspondan al grado de habilidad de los soldadores, para que éstos puedan hacer su trabajo con seguridad y sin defectos. Las soldaduras de techo, las más difíciles de hacer, no pueden evitarse generalmente en las soldaduras del montaje en obra; en el taller, con los tambores de soldadura, pueden no ser precisos en ningún caso.

Según L. Kopecek y F. Faltus, Ingenieros de la Sociedad Anónima de la Casa Skoda y Plzeň, C. S. R. ("L'Application de la Soudure aux constructions métalliques", París 1932), sería indicado para los montajes por soldadura en obra someter a los soldadores-montadores a pruebas especiales de aptitud y proceder, si es preciso, en los casos difíciles, a ensayos de prueba en la misma obra. Es necesario, además, instalar para los soldadores una buena y sólida plataforma de trabajo, así como establecer un abrigo conveniente contra el viento y las influencias at-

mosféricas. Ciertamente un soldador puede hacer su trabajo sin estos medios, pero entonces su atención es desviada inútilmente.

Dice a este respecto el Dr. Ingeniero Albert Dörnen, de Dortmund-Derne ("L'Economie de la soudure dans les constructions en acier". Informe final del Congreso de París, año 1932, de la Asociación Internacional de Puentes y Estructuras, págs. 312 a 314): "no se debe pretender, en una construcción soldada, realizar todos los ensamblajes sistemáticamente por soldadura *exclusivamente*. En numerosos casos, un roblón, un pasador, permite obtener el mismo resultado que una buena longitud de cordón de soldadura. En particular conviene recurrir a los ensamblajes roblonados o con pasadores cuando permiten evitar la utilización de la soldadura en obra. Para los puentes de grandes mallas, encuentro muy aceptable la disposición siguiente: ejecutar las vigas longitudinales, las vigas transversales y los elementos de las mallas independientemente con perfiles convenientes, ensamblarlos por soldadura y lue-



Fig. 14. — Montaje en obra, con pasadores, de las armaduras soldadas en taller.

go realizar el montaje de las diferentes piezas entre sí, en obra, adoptando el cosido. La reducción de sección que resulta de los agujeros de los pasadores puede ser compensado por refuerzos locales realizados de tal modo que se pueda contar en todo caso con la sección llena". Es exactamente lo que hemos realizado en Peñafiel (fig. 14).

El sistema de puentes soldados en taller y cosidos en obra ha sido muy empleado en Bélgica, siendo el caso típico el puente de Lanaye, primera obra de importancia así realizada en aquel país (viga central, 68 m. de luz). La Administración Belga de Puentes y Calzadas decidió en este caso el empleo de la soldadura en taller y montaje cosido en obra, para no exponerse a las dificultades de un trabajo realizado en obra en condiciones técnicas y económicas poco seguras y con medios, *a priori*, desconocidos (esta construcción se realizó en 1930) para combatir las deformaciones térmicas eventuales (Alox. Spoliansky. *Les Ponts soudés en Belgique*, año 1935, pág. 388-400).

Este puente, cuyo modelo de nudo fué ensayado por el profesor Campus, de la Universidad de Lieja, fué el primero de importancia construido en el mundo, en el cual se ha admitido la soldadura.

Siguen a éste el puente de Muide, puente giratorio, célebre por los ensayos experimentales de comprobación de los cálculos teóricos del puente, que tiene una forma bastante complicada, ejecutados por Magnel en la Universidad de Gante, por medio de su microinfluenciómetro sobre modelo de celuloide, y los dos puentes de Schooten (1932).

La localización de las deformaciones por soldadura es fácilmente realizada al emplear el sistema adoptado para la armadura del puente de Peñafiel.

En cuanto a la adopción de la soldadura en taller, una estructura soldada presenta las conocidas ventajas inherentes a toda construcción soldada, tales como reducción de peso de un 20 a un 33 por 100, nudos más compactos y fáciles de realizar, etc.; pero, además, como se trata de armaduras que quedan dentro del hormigón, reducen al mínimo posible los inconvenientes de las estructuras rígidas dentro del hormigón, se suprimen las cartelas y reducen los planos de deslizamiento posibles en el hormigón por supresión de cartelas y por la compacidad de los nudos. Desde luego se consideró preferible la soldadura eléctrica al arco con electrodo revestido, por las mayores garantías que ofrece. Desde que en 1907 se empleó por primera vez el electrodo revestido, invento del Ingeniero sueco Oscar Kjellberg, fué ganando la confianza de los técnicos y aceptada finalmente, después de gran experiencia con electrodos sin revestir, por los constructores americanos desde 1930, por las siguientes razones: 1.º, limpieza de la superficie del metal base, por eliminación del óxido durante la soldadura; 2.º, protección del metal de la

soldadura en fusión contra la acción atmosférica, evitando la formación de fallas que puede producir la constitución de óxidos y de nitruros; 3.º, fusión del revestido a baja temperatura, evitando su presencia ulterior en el cordón de soldadura en forma de inclusiones de escoria; 4.º, posibilidad de regular fácilmente la cantidad y repartición de los elementos no metálicos con adición de agentes de desoxidación; 5.º, posibilidad de realizar la aportación de elementos adicionales destinados a construir las aleaciones, imposible en los electrodos desnudos a consecuencia de la falta de soldabilidad en el polo negativo, etcétera (1).

Resto del montaje. — Montada la armadura rígida del arco, de las péndolas y viguetas, se colocó la de redondos que completa aquélla, en las secciones donde se precisan, mediante barras de 30 mm. en número de 6 en cada plano, como máximo, en las secciones de arranque, y 4 de igual diámetro en la clave. Completada la armadura del arco y colgados los moldes de las bóvedas, se hormigonaron, en la forma que detalla la figura 15, procurando, por tensados de manguitos, igualar las condiciones de trabajo en ambas clases de armaduras.

El hormigón de las bóvedas es de 350 Kg., y la carga máxima que en las mismas se produce, 48,37 kilogramos por centímetro cuadrado. Las bóvedas gemelas de cada tramo van arriostradas por dos vigas de 44 X 45 cm., armadas con barras y dejando una altura mínima de gálibo de 5,662 m.

Péndolas y montantes. — Entre la bóveda y el tablero se establecen los elementos verticales, situados los de una misma bóveda a 3,10 m., constituyendo 8 péndolas por bóveda, correspondientes a la zona de tablero inferior a los arcos, y dos de longitud libre nula que corresponden al encuentro del tablero y las bóvedas. Los montantes, correspondientes a la zona del tablero superior a la bóveda, son también dos por bóveda. Distan los ejes de los elementos verticales gemelos lo que los planos axiales de las bóvedas respectivas, esto es, 8 metros.

La sección horizontal de las péndolas es la rectangular, de 0,30 m. en el sentido del eje del puente por 0,60 en el normal a éste. Su armadura es, como la del arco, del tipo semirrígida, por la misma razón que en aquél; es decir, una armadura rígida de perfiles laminados para el montaje, y otra suplementaria de redondos tensables (fig. 16). La primera, igual

(1) Las ventajas que presentan los electrodos revestidos, y mejor los de alma especial, respecto a los otros, han sido expuestos especialmente en los trabajos de Godard ("La Soudure dans les constructions métalliques"); Dustin; Bryla ("Action combinée d'assemblages rivés et soudés"); J. L. Bruff ("Recorded failures of electrically welded wrought-iron and mild steel bridges"), etc.

PLAN DE HORMIGONADO DE LAS BÓVEDAS.

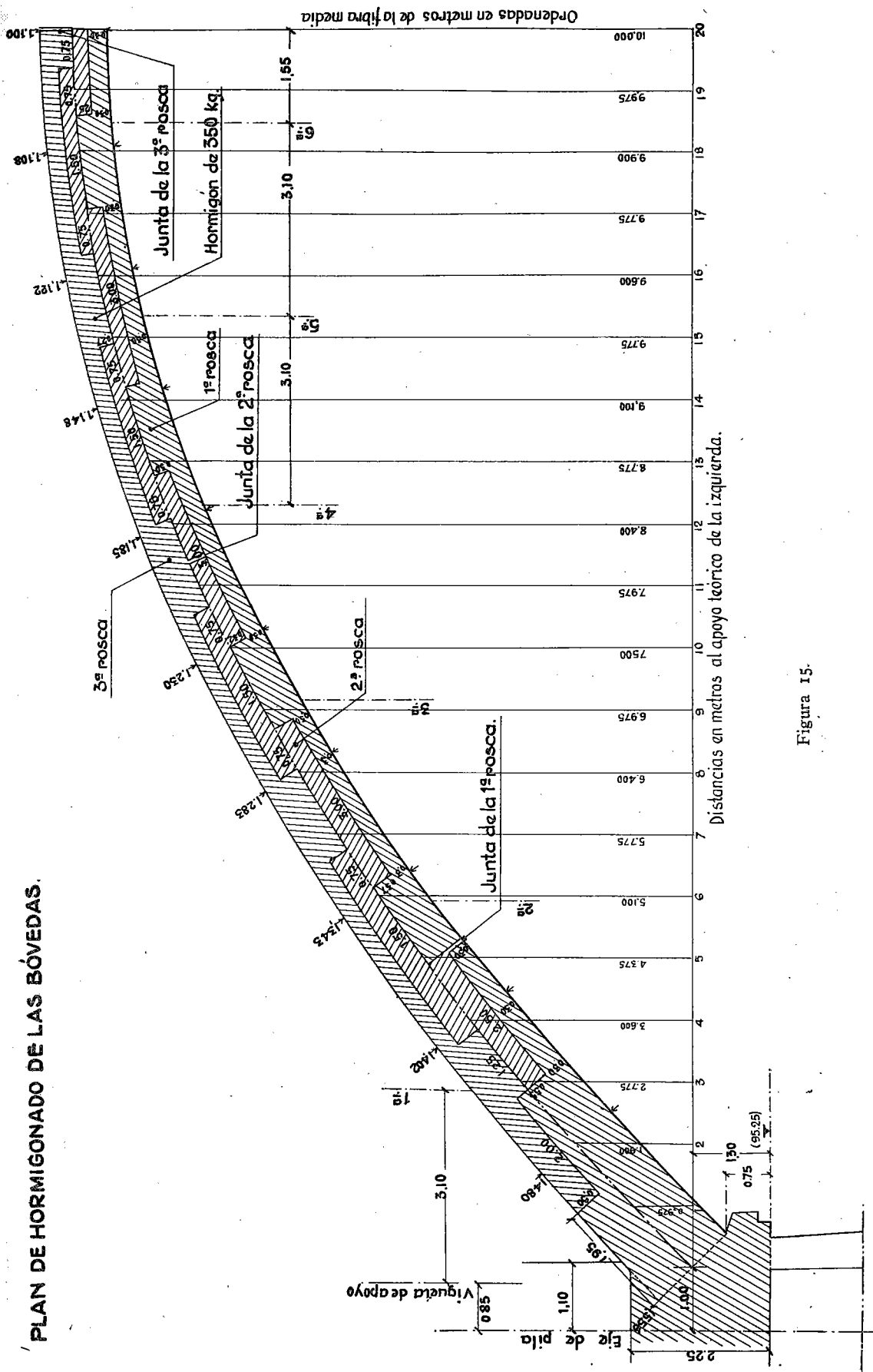


Figura 15.

para todas las péndolas, salvo en lo que a su longitud se refiere, está constituida por una cercha con dos angulares en cada cabeza de $\frac{55 \times 55}{8}$ y arriostramiento triangular de angulares de $\frac{40 \times 40}{6}$.

Esta armadura se une al arco por los angulares situados al efecto en la armadura laminada del mis-

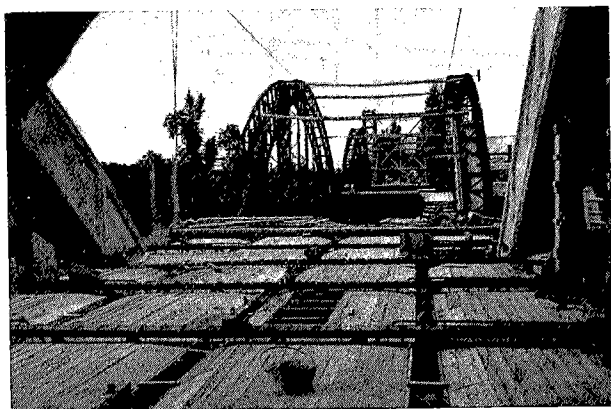


Fig. 17. — Encofrado para el tablero, sostenido por las viguetas.

mo, y soldados en fábrica a los trozos correspondientes de dicha armadura del arco, o se unieron en obra con pernos y placas, según la longitud de las péndolas respectivas. De todos modos, montada la armadura rígida del arco y los de las péndolas, se unen en su otro extremo a las armaduras laminadas de las viguetas mediante pernos y placas, y el resto de la armadura de péndolas venía soldado en taller.

La armadura complementaria de redondos se compone de ϕ de 24 mm., cuyo número varía según la sección y la péndola, así como los estribos, sencillos o dobles, de 10 y de 8 mm.

La distancia fijada entre péndolas de una misma bóveda es resultado de adoptar un número par de péndolas, para evitar la central que produce muy mal efecto, y de que su reparación sea la óptima para que el tablero tenga el mínimo peso.

El hormigón de los elementos verticales es de 300 Kg., por no requerir mayor riqueza las cargas máximas obtenidas por el cálculo.

Tablero. — Constituyen el tablero las viguetas enlazadas por sus extremos a los elementos verticales, y sostienen los largueros unidos al forjado del piso. El número de viguetas es el de elementos verticales, más los de los extremos. Estos de los extremos sirven de apoyo del tablero en las pilas o estribos, y podría haberse prescindido de ellas apoyando cada extremo del larguero, pero establecemos así una ma-

nera uniforme de trabajar los largueros y forjado, localizando, además, la dilatación en los extremos de la vigueta que son sus apoyos en pilas o estribos (y no en toda la longitud de vigueta); así lo efectuamos en varios tableros de otros puentes, el de las vigas Vierendeel, de la Riera de Caldas (Barcelona), por ejemplo, y así lo hemos visto efectuado en otros puentes análogos en el extranjero, el de Meduna entre otros.

Estas viguetas de apoyo no precisan armadura rígida de montaje, ya que ésta se efectúa sobre apoyos. Su luz de cálculo es de 8 m. y su sección transversal la rectangular y constante de 0,30 m. de espesor por 1,10 m. de altura, incluso forjado, armado con 8 ϕ de 30 mm. en la zona central inferior y 4 de 30 en la superior.

Las restantes viguetas son de sección transversal rectangante, de 0,30 m. de ancho por 0,90 metros de altura, incluso forjado, y 8 m. de luz de cálculo. Su armadura obedece al mismo criterio que la de arcos y péndolas; esto es, una parte laminada para poder colgar de ella los moldes y colocar la de redondos y las de largueros, procediendo, sin más andamios, al hormigonado (fig. 17), y formada la primera de un cordón superior de dos angulares de $\frac{80 \times 80}{10}$, y otro inferior de dos C de $\frac{120 \times 55}{7}$, enla-

zados ambos cordones por montantes y diagonales de angulares de $\frac{50 \times 50}{7}$, y en cuanto a la armadu-

ra de redondos está formada por 8 ϕ de 24 mm., regulable con tensores de $\frac{1}{3}$ de la luz.

Para la dilatación del tablero entre arcos, se establece una junta central de dilatación en el plano transversal del tablero correspondiente a la clave. Para esta junta, donde el tablero queda cortado en su centro, suelen disponer en algunas obras las péndolas sosteniendo los extremos del tablero correspondiente, lo que hace preciso adoptar dos péndolas centrales y muy próximas (ejemplos: puente de Wirkung, puente del Saar en Völklingen, etc.), solución de deplorable efecto estético al disponer péndolas centrales y además dobles, y más cara que la adoptada por nosotros en Peñafiel. En este punto se resuelve el problema conservando la distribución general adoptada para las péndolas y estableciendo la junta mediante una prolongación del tablero en voladizo desde la última péndola hasta el centro del vano, limitando dicha ménsula transversalmente por una semivigueta que enlaza los extremos de los largueros en voladizo y limita el forjado correspondiente.

No supone esta solución más aumento que el pequeño debido al mayor espesor de los largueros en voladizo y el refuerzo que han de llevar los inmediatos, compensado con creces al no emplear doble pén-

dola, precisamente la de mayor longitud en el centro del vano. La semivigüeta extrema es de 0,15 m. de ancho y 0,52 m. de altura, incluso forjado.

El número de largueros es de cinco: uno, central; dos, intermedios, y dos, laterales, correspondientes a los andenes. Los ejes distan entre sí 2 m. El número de largueros fué fijado para obtener el tablero más económico. Basta decir, al efecto, que al suprimir un larguero, el espesor del forjado tendría que ser de 0,20 m. en vez de 0,16 (luz 2,51 m.). El incremento de peso por metro lineal de tablero sería de $(0,20 - 0,16) 8 = 0,32$, y la economía por la supresión de un larguero $0,15 \times 0,50 = 0,075$, y aun realmente nuevos, ya que habrían de ser de mayor sección los largueros restantes al ser menor su número.

Los largueros laterales, que transversalmente limitan el tablero, se unen a los extremos de las viguetas en los nudos de éstas con los montantes o péndolas.

En todos los largueros, la luz libre entre paramentos interiores de viguetas es de 2,80 m., que corresponde a los 3,10 m. que, como ya dijimos, era la separación entre ejes de viguetas y la de los extremos en ménsula desde el arranque del larguero, de 1,39 m. hasta el extremo libre de la junta de dilatación.

Todos los largueros llevan cartelas en su unión con las viguetas, aumentando, en virtud de ellas, no sólo la altura de los largueros, sino su anchura, para los efectos de los esfuerzos cortantes, salvo en los largueros de andén, donde sólo hay incremento de altura por no ser necesario el de la otra dimensión. Disposición es ésta adoptada en los tableros que construimos para el puente de Brenes sobre el Guadal-

quivir y en las vigas principales de los tramos rectos de acceso en el viaducto del Esla, y que tiene la ventaja de no aumentar innecesariamente el ancho de los nervios en toda la longitud.

El forjado tiene 0,16 m. de espesor. Debido a la diferencia de las dimensiones de los recuadros que entre largueros y viguetas quedan en los tramos corrientes y en los correspondientes a las ménsulas, el armado y la dirección de las barras principales es distinto en ambos casos, en sentido normal al eje del puente, o sea entre larguero y larguero para los primeros; en sentido del eje del puente, o sea de vigüeta extrema a semivigüeta extrema, para los segundos.

La disposición adoptada en el tablero, así como las dimensiones del forjado, largueros y viguetas se proyectó procurando reducir el peso para evitar carga muerta sobre arcos y apoyos, aun sacrificando la sencillez de construcción. El hormigón es de 300 kilogramos.

Las juntas de dilatación que lleva el tablero van dispuestas del modo siguiente: los extremos del tablero se apoyan en las pilas o semipilas, mediante la vigüeta extrema por intermedio de dos placas de plomo por vigüeta situadas en sus extremos a 8 m. de distancia entre sus centros, que a su vez insisten en los sillares de apoyo, y dejando una junta entre estas viguetas y las fábricas de apoyo y una tercera junta, como hemos dicho, en el centro del tablero. Las primeras localizan los desplazamientos térmicos de las zonas de tablero situadas sobre los arcos, es decir, entre el trasdós de éstas y los apoyos. Se precisa lograr el mismo efecto para la zona del tablero bajo los arcos, o sea desde el intradós de éstos, lo que se consigue con una sola junta al disponerla centralmente.

(Continuara.)