"El puente del Guadalquivir en Brenes (Sevilla)"

César Villalba Granda

Revista de Obras Públicas vol.90, nº2.725, mayo de 1942, pp. 234-240

EL PUENTE DEL GUADALQUIVIR EN BRENES (SEVILLA)

POR CÉSAR VILLALBA GRANDA, INGENIERO DE CAMINOS

Consideramos muy interesante la información que sobre esta importante obra, recién inaugurada, nos remite el autor del proyecto, cuya disposición puede considerarse precursora del sistema de tensión previa, tan en boga hoy en las construcciones de hormigón armado.

Inauguración del puente.

El día 4 de abril ha sido inaugurado solemnemente el nuevo puente sobre el río Guadalquivir, en la carretera de Carmona a Villaverde del Río, de la provincia de Sevilla, por el Excmo. Sr. Ministro de Obras Públicas, D. Alfonso Peña. Bendijo las obras Su Eminencia el Cardenal Segura, asistiendo al acto el Excmo. Sr. Capitán general de la Región, Marqués de Bóveda de Limia; los Ilmos. Sres. Directores generales de Caminos y de Puertos, Sres. Rodríguez López y Delgado Brakenbury; los Ingenieros jefes de Sevilla, Confederación del Guadalquivir, puerto de Huelva y los de Puentes y Estructuras, por cuyo Servicio fueron realizadas las obras.



Acto inaugural del puente.

Cortadas las cintas que cerraban ambas entradas del puente por las distinguidas hijas del Ministro de Obras Públicas y del Capitán general, quedó esta obra abierta al tráfico público.

La importancia de este puente y las características que presenta, al emplearse arcos atirantados de hormigón armado, nos induce, al igual que con otros de los numerosos puentes que llevamos proyectados y construídos, y que presentan alguna peculiaridad, a exponer también a los lectores de la REVISTA DE OBRAS PÚBLICAS una descripción de éste.

Sistema adoptado.

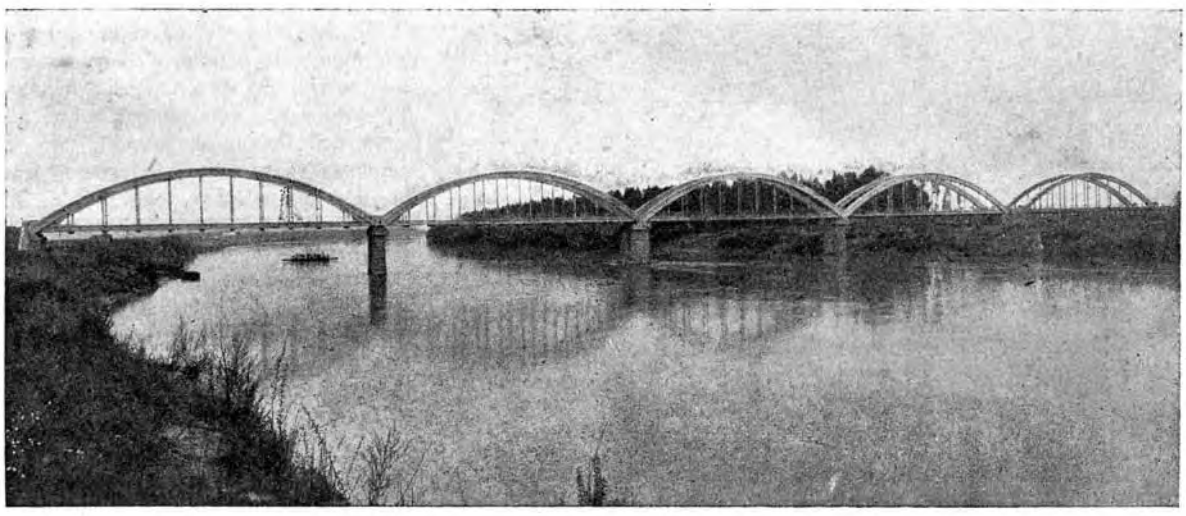
El criterio seguido en la elección del tipo de puente fué el siguiente: la configuración de las márgenes, obras de acceso y altura de máximas avenidas aconsejó la adopción de una rasante lo más baja posible, para no aumentar desmesuradamente la altura e importancia de los terraplenes, inclinación de rasantes y altura de los elementos de apoyo. Por otra parte, las luces de los tramos, dada la naturaleza y circunstancias del firme, habían de estar comprendidas entre los 40 y 60 m.

Rechazada desde el primer momento la solución de arcos de piso superior, que hubiesen exigido, aun con arcos a 1/10, unas pilas de más de 15 m. desde el arranque de arcos a cimientos, se recurrió a estructuras de reacciones verticales, arcos atirantados de hormigón armado.

La rasante del puente fué fijada de tal modo que sobre el nivel de avenidas extraordinarias dejase 1,40 m. de resguardo, teniendo en cuenta que la capacidad de desagüe fijada como máximo en 8 000 metros cúbicos por segundo, según los datos del régimen del Guadalquivir, tendría que alcanzar los 14 000 $m.^3/seg.$ para que la altura fuese un metro más que la considerada.

La altura fijada demostró su insuficiencia en la riada de 1936, una de las mayores conocidas.

Adoptados los cinco arcos atirantados de 51,30 metros de luz teórica, con un desagüe suplementario de tres tramos de 6 m. en la margen izquierda, la gran crecida del año 1936 aconsejó la sustitución de parte de terraplén y de los pequeños tramos por otro arco idéntico a los anteriores, modificando los desagües del primitivo proyecto de Martín Gil y quedando con el puente definitivamente constituído por seis arcos atirantados de 51,30 m. de luz teórica.

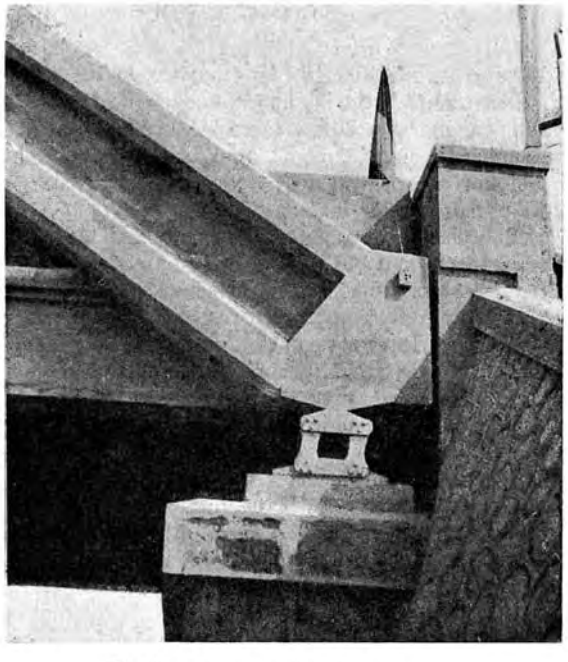


Vista general del puente.

Cimentaciones.

Se han ejecutado las cimentaciones mediante aire comprimido, atravesando los bloques la capa de grava y empotrándose en la arcilla azul. La profundidad media de hinca ha sido de 10,73 para las pilas y 13 metros para estribos.

Las cámaras de hinca tienen 8,10 × 4,10 en planta y son de hormigón armado. La cimentación de los estribos ofrece la particularidad de que se han empleado dos bloques gemelos, en vez de un cajón único, que hubiese ofrecido extraordinarias dimensiones en sentido normal al eje del puente, 21,70 metros, mientras que cada cámara utilizada tiene 8,55 m. en este sentido. Para restablecer la continuidad para los alzados, se voltea una bóveda de hormigón de 5 m. de luz libre, entre las coronaciones de sus bloques respectivos.



Detalle del apoyo de un tramo.

Apoyos.

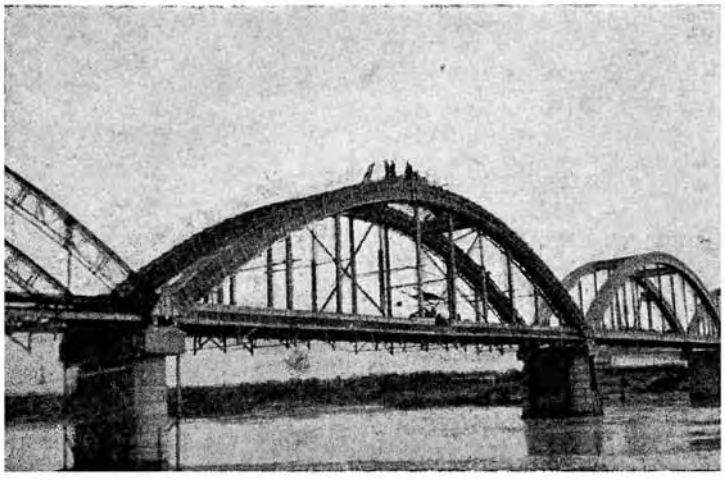
No siendo aceptables, por razones de dificultad y aun de estabilidad, los cimientos tubulares, la adopción del tipo de tramos de piso inferior tiene el inconveniente de alargar las pilas y sus cimientos, por la mayor separación de los aparatos de apoyo. Se ha disminuído este inconveniente apoyando los tramos sobre fuertes ménsulas colocadas encima de las pilas, como puede verse en algunas de las fotografías que se acompañan. De seguir el sistema corriente, las pilas habrían de tener 7,20 m. de longitud y además los tajamares; de esta manera aquella dimensión se reduce a 4,10 m., con economía de 3,10 metros en la longitud de la pila.

Las pilas están coronadas, como hemos dicho, por unas fuertes ménsulas de hormigón rico y armaduras robustas capaces de sostener por sí solas los tramos. La idea ha sido la de formar una gruesa placa de apoyo tan rígida que la repartición de presiones sea lo más uniforme posible.

Tramos.

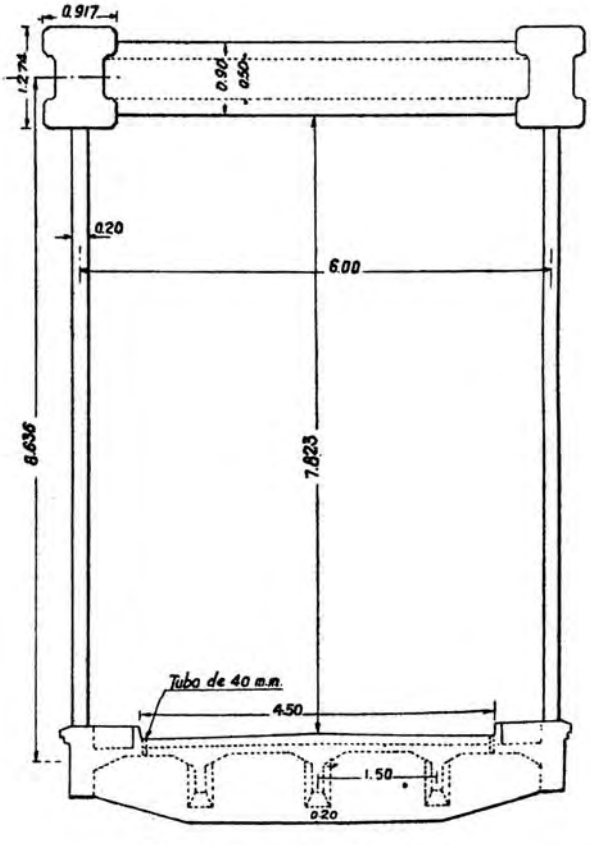
Los arcos atirantados, de 51,30 m. de luz teórica, tienen por directriz una parábola de segundo grado, ya que esta curva es casi coincidente con la antifunicular cuando, como aquí ocurre, el tablero y tabiques constituyen un peso soportado casi constante por unidad de luz.

La flecha es de 9,33 metros, que equivale a un rebajamiento de 1/5,5. Se unen los arcos mediante fuertes riostras situadas próximamente a 0,40 y 0,70 de la luz, que marcan tres trozos, el central de menor longitud, lo que es natural, además de razones de suficiencia de gálibo, porque por su menor sección es también el que presentará menor resistencia al pandeo, de tener longitud igual a los tramos extremos.



Construcción de un tramo sin andamiaje.

La separación entre ejes de arcos es de 6 m. y la sección de los mismos es tal que, siendo la altura constante 1,25 m., su ancho varía en la misma relación que el coseno del ángulo de las respectivas secciones con la clave, desde 0,90 m. en clave a 1,112 en arranques. Chaflanadas sus aristas, presenta la forma de dos cabezas unidas por un alma de relativamente grande espesor.



Corte transversal por la riostra.

De los arcos cuelga el tablero por intermedio de péndolas colocadas entre los ejes de los arcos, distanciadas 4,664 m. entre ejes, distancia que resulta de adoptar el número par de péndolas (para evitar la central, que produce mal efecto), y de que su separación esté comprendida entre 4 y 5 m., que es la distancia óptima para que el tablero se acerque al mínimo de peso, dado el ancho del mismo.

El tablero lo forman las viguetas que, colgadas de las péndolas, sostienen los largueros y los tirantes. El número de largueros se fijó en tres, porque de un estudio comparativo con otro de sólo dos largueros intermedios, resultó aquél el de menor peso. Todas las dimensiones de forjados, largueros y viguetas, se ha procurado reducirlos para evitar carga muerta sobre arcos y apoyos.

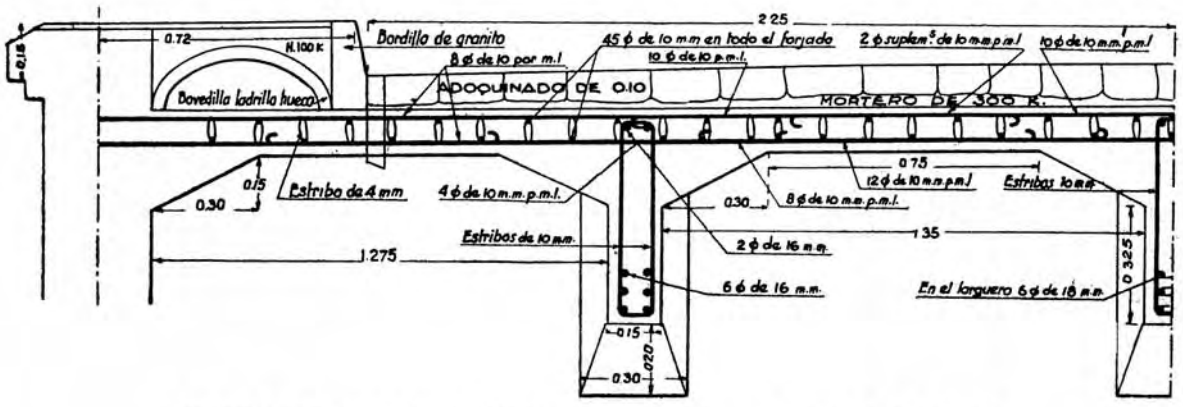
Los tramos van sustentados en aparatos de acero fundido, fijos y móviles, colocados de modo que sobre una misma pila todos los aparatos sean de igual clase. El régimen del río, la profundidad del agua en estiaje, bajo casi todos los tramos, ya que solamente dos permanecen fuera del cauce de aguas medias, la altura de avenidas, la flexibilidad en la ejecución y otras razones, determinaron la adopción de dos clases de armadura: una laminada en parte de los arcos, péndolas, tirantes, viguetas y riostras, y otra, en redondos, complementaria de la anterior, en las piezas dichas y única en largueros y forjados.

La armadura de los arcos la forman, de una parte, cuatro cordones compuestos con un angular de $\frac{90 \times 90}{9}$ en cada uno de los vértices de la sección, y otro, formado por dos ángulos de la misma dimensión anterior en el centro de la cabeza superior. Este último tiene como principal objeto el coser con facilidad las péndolas. Todos los cordones están arriostrados por celosías en las cuatro caras del rectángulo que forma su sección, constituyendo puntos especiales los empalmes con las péndolas.

El complemento de la armadura de los arcos lo forman redondos de 30 mm.

Por intermedio de las péndolas se cuelgan los tirantes y viguetas del arco. Las péndolas están formadas por cuatro angulares en cruz de $\frac{50 \times 50}{7}$; el agrietamiento del forro de hormigón se ha evitado disponiendo cuatro redondos longitudinales de 14 milímetros y cercos de seis cada 0,40 m.

Los tirantes tienen también dos clases de armadura: una, formada por tres cordones de dos] de 10 cm., que sirvieron para el montaje de la armadura, capaz de sostener encofrados y hormigones, y otra, complementaria, de redondos de 34 mm., con tensores que permiten regular el esfuerzo de cada una de las dos armaduras, y aun producir uno suplementario que anule algunos momentos flectores perjudiciales en los arcos. Se trata, pues, en defini-



Forjados, largueros y tirantes. Semisección transversal por el centro de un larguero.

tiva, de una disposición precursora del sistema de tensión previa tan en boga hoy en las construcciones de hormigón armado, y que mereció entera aprobación al exponerlo el que suscribe en el Congreso de Puentes y Estructuras de París.

Las viguetas tienen también doble armadura: la parte laminada, destinada a servir de andamio, y la de redondos, que completa la anterior.

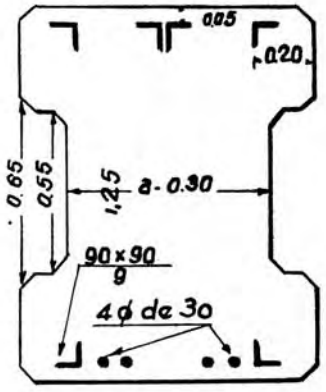
Forjados y largueros tienen únicamente armadura de redondos.

El espesor del forjado se ha reducido a 0,125 metros, el ancho de largueros a 0,15, con altura de 0,60, y las viguetas tienen 0,30 m. de ancho, con altura máxima de 1 m.

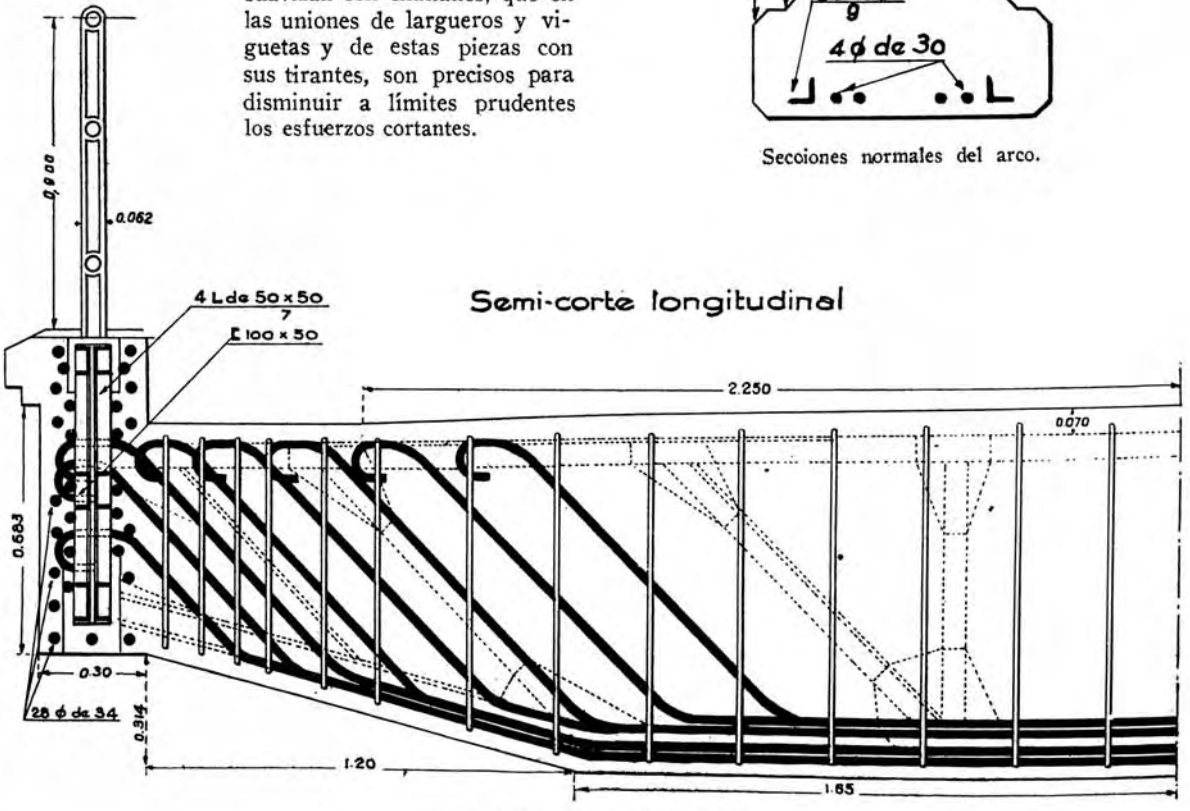
Todos los ángulos entrantes se suavizan con chaflanes, que en las uniones de largueros y viguetas y de estas piezas con sus tirantes, son precisos para disminuir a límites prudentes los esfuerzos cortantes.

El forjado tiene la misma forma que la capa de rodadura para evitar desiguales espesores y aumento innecesario de peso.

Se ha procurado, por consiguiente, evitar que



Secciones normales del arco.



Sección del tirante y de la vigueta.

graviten cargas innecesarias en los arcos, afinando dimensiones, y al mismo criterio obedece la disposición de aceras, volteando bovedilla de una hoja de ladrillo para formar el andén, haciendo huecas las riostras, etc.

Cálculos justificativos.

Sólo diremos del estudio del entramado que constituye el tablero, forjado, largueros y viguetas, que se ha hecho el cálculo de lo que los largueros alivian a la vigueta cargada directamente por transmitir su efecto a las viguetas próximas, del cual resulta la necesidad de reforzar los largueros en su unión con las viguetas; también se ha tenido en cuenta para las viguetas la flexibilidad de las péndolas.

Para el cálculo del arco se ha seguido la teoría y fórmulas que expone Zafra en su cálculo de Estructuras (vol. II, págs. 77 y siguientes).

Se desarrolla este cálculo siguiendo los estados del proceso constructivo que luego indicaremos, y para ello se empieza por suponer que se ha montado la armadura y se calculan las cargas en el arco debidas al peso propio del arco, viguetas y tirantes, péndolas y moldes; para ello se han calculado las líneas de influencia de las reacciones V y H en el apoyo y m en todas las secciones de amarre de las péndolas. Estos pesos dan cargas de trabajo muy moderadas.

Después se cuentan los efectos del moldeo de los arcos, para lo cual se calculó el efecto de cada trozo entre péndolas (suponiendo siempre que se moldean al mismo tiempo los trozos simétricos), y vistos sus efectos, se escoge el orden de moldeo más favorable, cegando a una carga específica máxima en la amadura de 912 Kg./cm.^{2}, lo que demuestra que ésta sirve perfectamente de andamio para el moldeo.

Se realizó también el interesante cálculo de las deformaciones de la armadura durante el vertido del hormigón en los arcos y el peso propio de la armadura laminada, llegando solamente a la cifra de 0,042, algo menor que una milésima de la luz.

Al moldear los arcos, la tensión en las barras laminadas alcanza a 1140 Kg./cm.^{2}, y entonces se actúa sobre los manguitos, que al ir aumentando la tensión en las barras, disminuyen la soportada por la armadura laminada y llegan a igualar las respectivas tensiones.

La carga máxima que en el hormigón del arco se produce, ya en servicio con la sobrecarga más desfavorable, es de 54,2 Kg./cm.^{2} y corresponde a la sección de abscisa 0,27.

El cálculo de las riostras se ha hecho con arreglo a la teoría expuesta en *Genie Civil* (8 de febrero de 1930). Como el conjunto de arco y riostras forma, a los efectos del viento, una viga Vierendeel, calculadas así las riostras resultan unos momentos flectores poco más elevados que los obtenidos por el método anterior.

Por último, se completaron los cálculos del arco con el estudio del caso en que se encuentre moldeado todo o parte del arco y al mismo tiempo actúe sobre él la fuerza del viento en la dirección del eje del puente o normal a éste. Estas hipótesis hacen variar notablemente las leyes de momentos flectores obtenidas y exigen un refuerzo en las armaduras deducidas sin este supuesto.

Para realizar este cálculo, en el caso de viento en dirección del eje del puente, se utilizan las fórmulas que Zafra indicó en el *Cálculo de Estructuras* (pág. 96 y siguientes), y para el caso del viento actuando en sentido normal al arco, el método de Koechlin.

Construcción.

La armadura laminada se montó en obra, auxiliándose de andamios y cables, empleando castilletes donde no era de temer un arrastre por las aguas, es decir, en los tramos laterales de la margen izquierda.

Una vez montada la armadura laminada de arcos, péndolas, viguetas y tirante, de ella se colgaron los moldes y se completaron las armaduras de los distintos elementos.

Se moldean luego los arcos por dovelas completas, siguiendo el orden de moldeo que el cálculo demuestra ser más favorable.

Moldeados los arcos y riostras se efectúa la regulación de tensores del tirante y se procede a mol-



La máxima crecida, en 1936.



Un tramo en la fase de hormigonado.

dear el piso. Pero del examen de las líneas de influencia se deduce que, si no se tomase ninguna precaución y se procediera a hormigonar de un extremo a otro del tablero, habría para cada sección un estado de avance que produciría esfuerzos mucho mayores que los que se presentan una vez terminada la obra. La carga, en vez de ir avanzando con toda su magnitud de un extremo a otro del tramo, debe crecer en todo él de una manera paulatina y uniforme, para lo cual se carga por igual con pesos auxiliares, hasta representar una carga análoga al peso del hormigón; estos pesos se van retirando a medida que avanza el hormigonado. Claro está que este sistema sólo es preciso en el montaje sin apoyos intermedios.

Autocrítica.

No actuando de doctor Pangloss, indicamos algunas modificaciones que la construcción de estos tramos nos ha señalado.

Las riostras resultan demasiado gruesas, debiendo preferirse el empleo de mayor número y menor sección, hasta donde el gálibo permita. Esta misma observación ha sido formulada por Lossier a las fuertes riostras del puente sobre el Sena, en Saint-Pierre-Vauvray, al tratar de la estética de los puentes (*Le Moniteur des Travaux Publics*).

La economía que representa el empleo de los apoyos en ménsulas sobre las pilas, viene aminorada por la mayor dosificación del hormigón de la placa de apoyo y su fuerte armadura; así en este caso es solamente de 4 400 pesetas por apoyo, y en cambio el efecto estético no es agradable por la variación de inestabilidad que produce.

Por último, la regulación de tensión del tirante es preferible hacerla por actuación en el arco y variaciones de longitud de péndolas, colocando en ellas los manguitos tensores, si son de redondos, o bien con husillos, si laminados.

Conclusión.

El presupuesto de la obra ha sido el siguiente: 1 318 951,16 pesetas para la infraestructura, y 1 223 528,16 la superestructura. Total, 2 542 479,32 pesetas.

No terminaremos este artículo sin hacer constar que las obras han sido eficazmente realizadas con actividad y reconocido celo por la Sociedad que preside nuestro querido compañero D. José Entrecanales.



Vista general desde la entrada del puente.