

Los modelos de puentes económicos de hormigón armado para caminos vecinales de Juan Manuel de Zafra y Esteban

Francisco José Domouso de Alba

La trayectoria profesional del ingeniero de caminos Juan Manuel de Zafra y Esteban (1869-1923) estuvo ligada desde muy pronto al hormigón armado.

Obtuvo el título de ingeniero de caminos canales y puertos en 1892 como número uno de su promoción. Trabajó en el puerto de Sevilla hasta 1908, donde realizaría sus primeras obras en hormigón armado. Posteriormente ingresa como profesor en la Escuela Especial del Cuerpo de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, encargándose de la clase de «Construcciones de Hormigón Armado y Puertos y Señales Marítimas», que sería el primer paso de la asignatura «Construcciones de Hormigón Armado y Puertos», inaugurándose de esta manera en España la formación universitaria en esta disciplina en el curso 1910-1911.

Ingeniero de amplia y rigurosa formación científica, aplica sus sólidos conocimientos de mecánica a la construcción de estructuras de hormigón armado.

Publica en 1911 *Construcciones de Hormigón Armado* primer tratado de carácter científico sobre hormigón elaborado por un técnico español,¹ que posteriormente completaría con la que se considera su obra maestra (en palabras del también ingeniero Enrique Colas) *Cálculo de Estructuras*.

Juan Manuel de Zafra trabajó siempre desde el conocimiento y la curiosidad por las construcciones de hormigón armado que se realizaban fuera de España, ajeno en cierta manera al negocio que se generó en torno al nuevo material y a la explotación de patentes.

Zafra nunca pretendió la exclusividad del conocimiento empírico de los procesos de cálculo y constructivos del hormigón armado que ocultaban muchas patentes y sistemas licenciados. Al contrario, sus proyectos, no demasiados pero de calidad excelente, resultaban de la aplicación de conocimientos científicos relacionados con el hormigón armado obtenidos de fuentes francesas y alemanas principalmente.

Es importante destacar el rechazo de Zafra a «inventar». Su rigor le llevó a conocer con precisión obras contemporáneas realizadas en hormigón armado fuera de España, como el puente de Chatellerault, los proyectos y obras en hormigón de un incipiente Eugène Freyssinet, los Grandes Molinos de Nantes (construidos en 1895), los ejemplos de puentes para ferrocarril publicados por von Emperger en «Handbuch für Eisenbetonbau» (lectura de cabecera de Zafra, a la que se remite en muchos de sus escritos y artículos), así como las realizaciones más relevantes documentadas en Europa y Estados Unidos hasta el momento. Estamos hablando de los años anteriores a 1910.

Zafra nunca ocultó sus fuentes, al contrario cita como referencias destacadas necesarias de conocimiento los trabajos de Considère y Rabut, así como el de las comisiones francesa y suiza de hormigón armado. Este conocimiento y asimilación profunda del estado de la cuestión le permitió desarrollar proyectos y obras fundamentales en la consolidación en España del hormigón armado, así como sentar las bases

de la enseñanza reglada y rigurosa del proyecto y cálculo de estas estructuras.

Fue conocida su beligerancia con la condición de «producto» del hormigón armado en los últimos años del siglo XIX y primeros del XX.

Esta condición de producto se tradujo en la proliferación de patentes de sistemas de construcción en cemento y hormigón armado. Se contabilizan en España hasta 152 patentes específicas sobre piezas y procedimientos de construcción en cemento y hormigón armado entre 1884 y 1913.² A pesar de este rechazo a la condición de «producto» del hormigón armado, Zafra depositó en 1902 cuatro patentes, en mi opinión de excepcional calidad.

Posteriormente, Zafra declaró la guerra abierta a lo que denominó «formulas-receta» ligadas a los «sistemas privilegiados», yuxtaponiéndolas a las «formulas racionales-experimentadas».

En 1912, Zafra se opone abiertamente y por escrito a las «recetas» empleadas por Hennebique.³ Conoce en profundidad la instrucción francesa del 20 de octubre de 1906, así como la sentencia judicial que anuló en 1903 las patentes del sistema privilegiado Hennebique, aunque este siguiese anunciándolo.

Zafra defiende que no es suficiente que las fórmulas de Hennebique «tengan la sanción de la experiencia, y que esta sanción es más digna de confianza que muchas teorías aun no muy justificadas».

En este sentido, defiende que el hecho de que las construcciones no se caigan (máximo aval que ofrecía Hennebique en su publicidad) es necesario, pero no suficiente, recurriendo al concepto de «coeficiente de seguridad». Para Zafra, este coeficiente debía conocerse con precisión desde el análisis técnico y científico del comportamiento estructural de las obras de hormigón armado, y acomodarse a las circunstancias que en cada obra concurriesen.

La defensa de Zafra es clara: el rigor intelectual debe prevalecer sobre formulas poco científicas sancionadas por la experiencia y la codicia comercial. Como no podía ser de otra manera, Hennebique demandó a Zafra en los tribunales parisinos (demanda ineficaz por falta de jurisdicción, pero muy mediática).

En mi opinión, la polémica Zafra-Hennebique caricaturiza injustamente la capacidad técnica de las oficinas de Hennebique, que demostraron ser muy solventes, no solo por la seguridad y fiabilidad de las obras que realizaron, sino por las investigaciones so-

bre el hormigón armado que llevaron a cabo durante más de una década y que supusieron aportaciones de primer orden al conocimiento del material.

MODELOS DE PUENTES ECONÓMICOS DE HORMIGÓN ARMADO PARA CAMINOS VECINALES

Por Real orden de 31 de mayo de 1919 se encargó a Juan Manuel de Zafra, profesor distinguido de la Escuela espacial del Cuerpo, la elaboración de un catálogo de modelos de puentes económicos de hormigón armado de luces corrientes para caminos vecinales.

El objeto de este catálogo era proveer a los ingenieros de modelos de puentes económicos de hormigón armado que pudiesen emplearse automáticamente en proyectos y obras sin necesidad de repetir el trabajo de cálculo y definición proyectual.

De esta manera, la Administración, consciente del desarrollo que estaban teniendo las construcciones de hormigón, y ante la falta de implantación de un procedimiento universal y riguroso de cálculo y construcción en hormigón, garantizaba la seguridad y correcta ejecución de las estructuras de estos puentes vecinales.

Por este trabajo, además de cómo reconocimiento a su trayectoria profesional, Zafra fue galardonado por el Ilustre Consejo de Obras Publicas con la Gran Cruz de Alfonso XII.

El proyecto

Se proyectan 20 modelos de puentes. El principal criterio adoptado por Zafra fue el del rigor estructural y la economía, que en estos modelos de puentes económicos se traduce en:

- a) Limitación geometría de luces y anchos de tableros.
- b) Máxima eficacia de la tipología estructural.
- c) Economía de mano de obra: encofrados sencillos y reutilizables en las distintas luces de cada una de las tres tipologías estructurales que se describen más adelante.

Zafra buscó que el trabajo de puesta en obra fuese el más sencillo posible, y por consecuencia generase

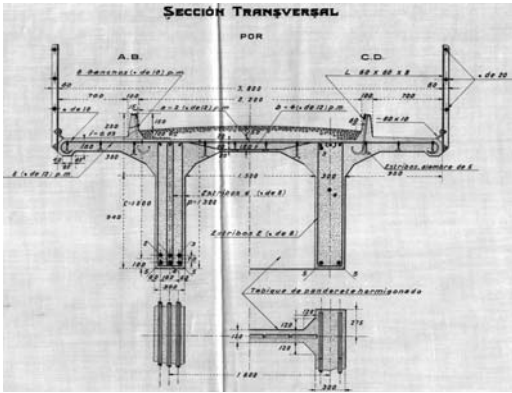


Figura 3

manera el cálculo del mismo es más preciso y sencillo, y «las cantidades de hormigón y de armadura... pueden ser aquilatadas hasta aproximarse mucho al ideal de lo necesario y suficiente». Se generan de esta manera dos piezas en «T», formadas cada una por un nervio y un tablero simétrico respecto al eje del nervio.

Estas dos piezas en «T», yuxtapuestas, forman una sola pieza en forma de «pi mayúscula» que define la sección tipo del puente.

Indistintamente de la luz del puente, la cabeza de compresión formada por el tablero y la parte superior del nervio es siempre la misma, solamente ajustándose el canto del tablero a la separación entre nervios resultante de proyectarse un puente de vía simple o doble.

De esta manera se genera una plataforma plana de hormigón sobre la que se apoya el firme, contenido lateralmente por 2 bordillos. La cabeza superior de los nervios en «T», parte resistente a compresión fundamental de la estructura, no forma escalones ni genera doblados de armaduras. Como puede observarse, la calidad geométrica de la sección es impecable, adelantándose a soluciones tipológicas que se emplearán décadas más tarde de manera genérica. Esta solución contrasta con la empleada hasta el momento por ingenieros de la influencia y calidad de Eugenio Ribera, con la consiguiente complejidad de encofrados y ejecución (imagen 4).

En todos los casos, la separación entre ejes de nervios es de 1,60 m. para puentes de una sola vía y

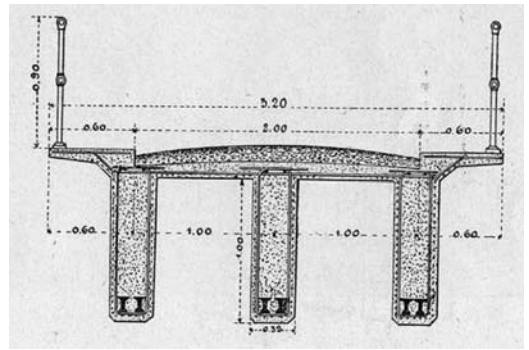


Figura 4

2,20 m. para puentes de doble vía.

3. Luces grandes: Zafra emplea losas nervadas con nervios aligerados o calados, generando una celosía rígida en «N» de hormigón. Esta solución ya la empleó en un puente para ferrocarril sobre el río Vélez, en explotación desde 1908, de dos tramos de 26,40 metros de luz, y la repitió posteriormente hasta en 18 puentes de tramo recto para la Compañía de ferrocarriles suburbanos de Málaga (imagen 5: Puente sobre el río Vélez. 1908).

Aun así, Zafra plantea una diferencia fundamental entre los puentes para ferrocarriles y los puentes para caminos vecinales que, según él, redundan en una mayor simplicidad y seguridad de ejecución: Se sustituyen los «montantes comprimidos y diagonales tensas» empleados en los puentes para ferrocarriles por «diagonales comprimidas y montantes estirados» (imagen 6 y 7).

Las condiciones del tablero y la cabeza de com-



Figura 5

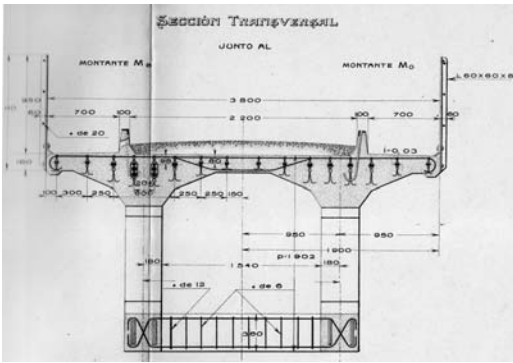


Figura 6

una separación entre ejes de los nervios aligerados de 1,90 m.

Bases de cálculo

Los puentes están calculados para las siguientes condiciones de uso simultaneas: Una sobrecarga estática homogénea (calzada y aceras) de 400 kg/m², además de una sobrecarga móvil formada por un cilindro compresor de 6 metros de longitud con ejes que cargan de 8 y 12 toneladas respectivamente, precedido y seguido por una carga de 880 Kg/m (imagen 9).

A tenor de esta hipótesis de cálculo resulta que la incidencia del peso propio de la estructura en función de la luz y la sobrecarga de uso es del 70% en el puente de 36 m, del 50% en el de 11,50 m y del 39% en el de 6 m.

Las condiciones de resistencia del hormigón y el acero se fijan en 40 kg/cm² para el hormigón y 1.000 kg/cm² para el acero, habituales en la época.

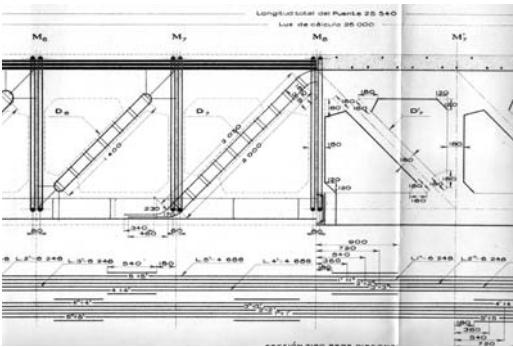


Figura 7

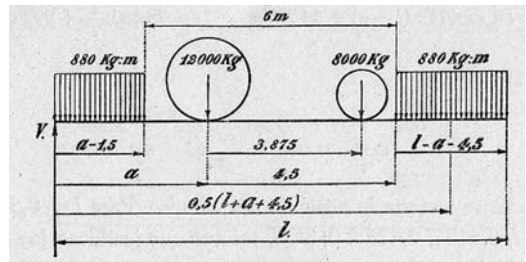


Figura 9

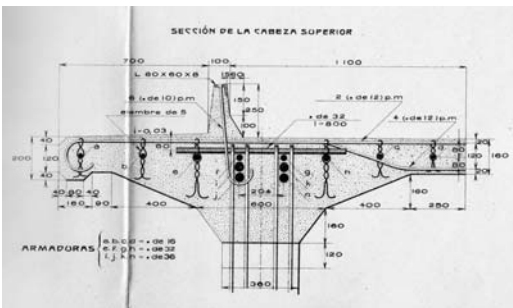


Figura 7

Condiciones facultativas

Zafra incorporo en su catálogo de modelos de puentes vecinales unas «condiciones facultativas», basadas en su propia experiencia y en las Instrucciones oficiales vigentes en España y otros países como Francia, Alemania y Suiza. A continuación destacamos algunos aspectos relevantes de las mismas.

Respecto a los materiales. Se definen las características granulométricas de las arenas y la piedra (preferiblemente canto rodado, aunque se acepta el machaqueo en condiciones determinadas), ambas de naturaleza silicea.

presión (imagen 8) son las mismas que las comentadas en el punto anterior (luces medianas y regulares), aunque en estos puentes es necesario introducir una viga inferior de atado de los nervios.

Estos puentes se proyectan de una sola vía, con

El cemento debe ser portland artificial de fraguado lento.

Las armaduras serán de acero de calidad dulce para construcciones, con una carga límite aparente elástica comprendida entre 2.500 y 3.000 kg/cm². Ninguna barra estará soldada, y se suministrará en la longitud prescrita en proyecto.

La composición del hormigón será la siguiente: 350 kg/m³ en puentes de nervios aligerados o calados, y 300 kg/m³ en el resto, determinándose las proporciones de arena y piedra experimentalmente: Se tomarán muestras de 10 litros, y se elegirá la dosificación que ofrezca un mayor peso de materias sólidas.

Respecto a la ejecución. La mezcla se realizará en seco, ligando el cemento y arena previamente, y añadiendo después la piedra. El agua se agregará lentamente, del modo más uniforme posible. El amasado podrá ser manual o mecánico.

Los moldes o encofrados serán de madera o metálicos, y se unirán entre ellos por medios mecánicos de manera sencilla. Serán suficientemente resistentes como para soportar sin deformaciones aparentes los empujes producidos por el hormigón.

Los encofrados se montarán con una contra flecha en el centro igual a 1/1000 de la luz, salvo en las lasas de 5 m o menos, que será de 4/1000 de la luz.

La máxima flecha producida 24 horas después del descimbramiento no superará la calculada bajo la acción del peso muerto, asignando al hormigón un coeficiente de elasticidad de 140.000 kg/cm² y a las armaduras otro 15 veces mayor.

Las armaduras de diámetro inferior a 2 cm se podrán curvar en frío, las demás, en caliente.

Hay una intención clara en estas condiciones facultativas de industrializar la configuración y disposición de armaduras, pudiéndose realizar este proce-

so, si es posible, en taller. De esta manera se garantiza la máxima fiabilidad y precisión de la obra.

Las barras redondas se empalmarán mediante manguitos terrajados, según las indicaciones de los planos (imagen 10).

En aquellos lugares donde se crucen muchas barras se recubrirán con mortero rico de cemento, previo a su hormigonado.

CONCLUSIÓN

Este catálogo de modelos de puentes económicos de hormigón armado para caminos vecinales no constituye una novedad técnica ni supone una revolución dentro del conocimiento del hormigón armado en el entorno europeo y americano de la segunda década del siglo XX.

No olvidemos que en 1907, Eugène Freyssinet proyecta y construye el puente de Prairéal-sur-Besbre, una celosía en arco de hormigón armado (imagen 11), o entre 1911-1912 el puente Boutiron, de tipología similar aunque mayor calidad proyectual (imagen 12).

La importancia de este catálogo de modelos de puentes económicos de hormigón armado para caminos vecinales reside, en mi opinión, en que supone el punto de inflexión definitivo en la regularización del empleo del hormigón armado en España como una técnica sujeta a normas y experimentación científica, y ajena a prácticas empíricas ligadas a patentes.

En este momento, Zafrá sitúa la ciencia y tecnología del hormigón armado en España a un nivel equi-

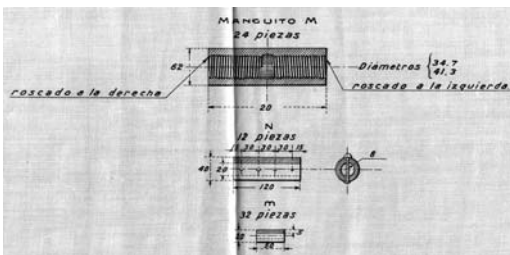


Figura 10



Figura 12



Figura 13

parable al del resto del mundo, sentando las bases de una escuela de grandes creadores de estructuras de hormigón armado (imagen 13: Puente sobre el río Vélez. 1908. Estado actual).

NOTAS

1. Algunos de los manuales sobre hormigón armado publicados en España por técnicos españoles entre 1900 y 1911 son:
 - Luengo, Juan. 1900. *Cementos armados, descripción y cálculo de las obras*. Madrid. Bailly-Bailliere.
 - Ribera, José Eugenio. 1902. *Hormigón y cemento armado. Mi sistema y mis obras*. Madrid. Imprenta de Ricardo Rojas.
 - Seco de la Zarza, Ricardo. 1910. *Cemento armado. Cálculo rápido, datos prácticos*. Madrid. P. Orrier editor.
 - Zafra, Juan Manuel. 1911. *Construcciones de hormigón armado*. Madrid: Imprenta de V. Tordesillas.
2. Martín Nieva, Helena. 2000. *Actas del Tercer Congreso Nacional de Historia de la Construcción*, Sevilla, 26-28 octubre 2000, eds. A. Graciani, S. Huerta, E. Rabasa, M. Tabales, Madrid: I. Juan de Herrera, SEdHC, U. Sevilla, Junta Andalucía, COAAT Granada, CEHOPU.
3. Destacamos los polémicos artículos publicados en la *Revista de Obras Públicas* entre el 2 de mayo y 12 de septiembre de 1912 por Zafra y Hennebique.

