

Proyecto de refuerzo y ampliación del puente sobre el río Llobregat en Sallent

Design of the widening and retrofit of the existing bridge over the Llobregat River at Sallent

Francisco Javier Jordán García^a, Jordi Pons Gabarrón^b, Jose Vera Saura^c, Benjamín Domínguez Santana^d, Juan Víctor Tirado Gascón^e

^a Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Pedelta. Director Técnico. jjordan@pedelta.com

^b Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Pedelta. Director Departamento Rehabilitación. jpons@pedelta.com

^c Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Pedelta. Ingeniero especialista en puentes. jvera@pedelta.com

^d Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. COMSA. Responsable puentes, Área Técnica e I+D. benjamin.dominguez@comsa.com

^e Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. COMSA. Jefe Dpto. Técnica, Área Técnica e i+D. juan.tirado@comsa.com

RESUMEN

Pedelta redactó para la Dirección General de Carreteras de la Generalitat el “Proyecto Constructivo del puente sobre el río Llobregat en la carretera B-430 en Sallent, Barcelona”. El proyecto define un ensanchamiento del puente existente de uno a dos carriles, incluyendo también una zona lateral para bicicletas y peatones, pasando de 6 a 12.15m de anchura de tablero. El puente original se construyó en un momento no documentado entre los años 1922 y 1940 según la colección de puentes de Eugenio Ribera. La construcción fue realizada por COMSA, con asistencia técnica de Pedelta para la realización de algunas adaptaciones y mejoras constructivas.

ABSTRACT

Pedelta was retained by the Roads Administration of Catalonia for the Design of the widening of the existing bridge of the B-430 road over the Llobregat River in Sallent, Barcelona. The existing bridge carries one traffic line and is 6m wide, and the widening is 12.12 m in width and accommodates two carriageways and a sidewalk. The existing bridge was built sometime between 1922 and 1940. It was built following the catalogue of bridges prepared by Eugenio Ribera in 1922. The bridge was built by COMSA, who retained Pedelta for construction engineering and updated the design with some modifications to improve its constructability.

PALABRAS CLAVE: Reparación y refuerzo de estructuras

KEYWORDS: Structures repair and retrofit

1. Antecedentes y motivo del proyecto

La carretera B-430 salvaba su cruce sobre el río Llobregat en el municipio de Sallent, en la provincia de Barcelona, mediante un puente de

6m de ancho de plataforma. Este ancho era insuficiente para el tráfico y necesidades de movilidad actuales. Con fecha de diciembre de

2016 Infraestructures.cat encargó a Pedelta la redacción del proyecto de ampliación de este puente y adecuación de la carretera en sus accesos.

Con fecha de marzo de 2019 se completó el proyecto constructivo, que se licitó para su construcción en septiembre de 2019, resultando adjudicataria de la misma la empresa COMSA.

Tras el análisis del Proyecto Constructivo, COMSA identificó una serie de mejoras y adaptaciones necesarias tanto para sus medios y procesos como para los del prefabricador de parte de los elementos estructurales del puente, que fue Alvipte.

COMSA contrató a Pedelta los servicios de actualización o modificación de ciertos aspectos del diseño estructural de la ampliación del puente.

La finalización de la construcción del puente y su puesta en servicio se realizó a finales de 2021, alcanzándose así el propósito inicial de adecuar el puente a las necesidades actuales, tanto en lo referente a la viabilidad como a la seguridad estructural y requerimientos hidráulicos.

2. Estado del puente existente

Previamente a las actuaciones realizadas, el puente existente para el cruce de la carretera B-430 sobre el río Llobregat en Sallent era un puente de hormigón armado construido en un año desconocido entre el 1922 y el 1940 según información fotográfica encontrada. Se trataba de un puente de 6m de ancho de plataforma tipo arco con diversos vanos y construido según la colección de puentes del Ingeniero Eugenio Ribera, Colección de puentes de hormigón armado, publicada el año 1922 [1]. Se trataba por lo tanto de un puente que forma parte de nuestro legado cultural, siendo una muestra de la tradición de los primeros puentes de hormigón armado, utilizando los propios elementos constructivos de acero de sostenimiento de cimbra y peso de hormigón

fresco como elemento de armado embebido en el hormigón estructural.



Figura 1. Fotografía del puente existente.

Los primeros trabajos realizados por Pedelta fueron la realización de una inspección principal, recogida de información geométrica y de ensayos en el puente, y evaluación estructural del estado actual del mismo. La reglamentación no recoge claramente la evaluación de puentes existentes de carretera en España, aunque hay diferentes recomendaciones a nivel internacional [2].

Fruto de esos trabajos se pudo determinar que el puente no tenía capacidad estructural suficiente en su estado según la normativa vigente en el momento de la redacción del estudio. Ninguno de los elementos del puente, losa superior, montantes y arcos, cumplían con los requerimientos estructurales. Se trasladó al titular de la obra de fábrica las conclusiones para acelerar el proceso de ensanchamiento y reparación del puente o tomar otras medidas que considerase oportunas.

A nivel de daños, el puente presentaba desconches de hormigón en diversas zonas, sobre todo en arranque de los arcos. No parecían muy graves y tampoco se detectaron descalces o movimientos en cimentación debido a erosión fluvial.



Figura 2. Algunos de los daños detectados en el puente.

Se comprobó asimismo la capacidad hidráulica del puente, resultando adecuada para el caudal de diseño de $1191 \text{ m}^3/\text{s}$ (Q500).

3. Estudio de alternativas

Tras identificar la problemática del puente y las necesidades se procedió a realizar un estudio de alternativas para la solución a desarrollar. Las dos principales propuestas fueron demoler completamente el puente existente construyendo uno nuevo y aprovechar en la medida de lo posible el existente ampliándolo.

La alternativa de construir un puente totalmente nuevo resultaba mucho más sencilla desde el punto de vista de cantidad de trabajo de ingeniería necesario, pero más cara desde el punto de vista de la construcción. El motivo principal no era estructural, sino hidráulico. Según requerimientos de la *Agència Catalana de l'Aigua* en el caso de diseñarse un puente nuevo, sus estribos se tenían que ubicar fuera de la zona de intenso desagüe, y por lo tanto la longitud del puente tenía que ser del orden del doble que la del puente existente. Además, la luz principal debía ser de 45 m, siendo la del puente existente de 24 m. Aún con la alternativa más económica como es la de un puente de vigas de hormigón prefabricadas, el coste de construcción del nuevo puente duplicaba el coste de aprovechamiento parcial del existente.

La otra opción, que proponía conservar la geometría y elementos principales del puente existente y fue la seleccionada, consistía en la demolición del tablero y montantes del puente, conservando estribos, pilas y arcos. Entre los dos nervios de los dos arcos se ejecutaba un nuevo nervio del mismo canto en hormigón armado sobre cimbra que se colgaba de los arcos existentes.

Los nuevos montantes apoyaban en ese arco y se reponían los del puente existente sin que fuesen estructurales, solo para conservar el aspecto del mismo en la mayor medida. Es decir, no se conectaban estos al tablero.

El tablero, construido en hormigón armado también, se apoyaba en los nuevos montantes y nervio central. Sobre pilas y en estribos y embebidos en los mismos se ejecutaban unos micropilotes que soportaban la carga de la nueva estructura del puente.

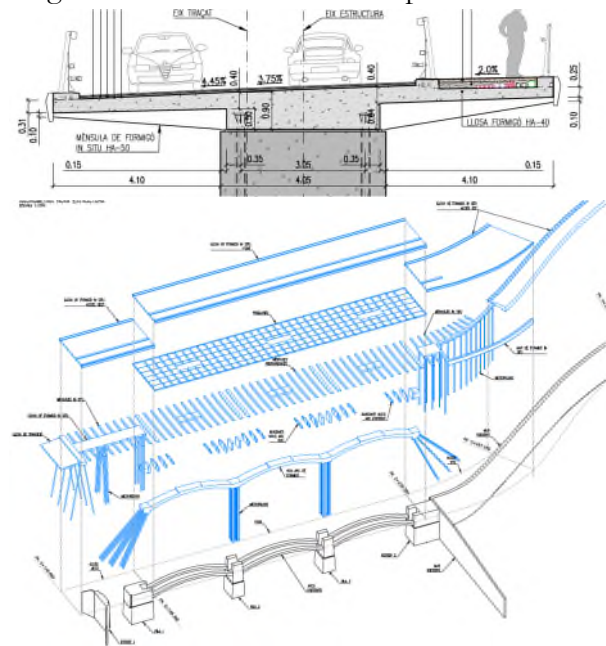


Figura 3. Sección del puente propuesto y despiece de los elementos a conservar y nuevos.

4. Proyecto constructivo

Se desarrolló el proyecto constructivo de esta alternativa de nuevo tablero con nuevo arco central cimentado sobre micropilotes. Las dimensiones generales del puente se

conservaron, siendo su ancho de 12.15 m con un canto en su núcleo central de 0,68 m en general y 0.85 m en el acceso Oeste, y su anchura de 2.00 m. El proyecto incluía un proyecto de demolición de parte del puente existente y comprobaciones de las partes a conservar que se aprovechaban como sostenimiento de encofrado del nuevo arco [3].

El tablero se apoya en el arco central mediante montantes verticales. Tanto estos montantes como el nuevo arco quedan ocultas tras los del puente existente, pues aprovechan el espacio libre de 1.90 m entre sus dos arcos. El canto de los montantes es de 0.55 m para los unidos rigidamente al tablero y 0.40 m para el resto.

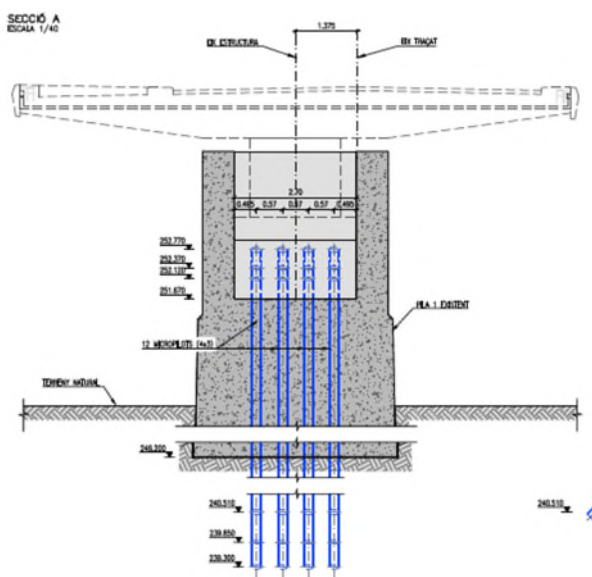


Figura 4. Detalle de sección transversal del tablero sobre pilas.

El canto del arco es de 1.00 m en arranques y 0.70 m en clave, variando progresivamente entre ambos puntos. Los arcos presentan continuidad estructural entre los diferentes vanos, pero se disponen juntas ocultas en el tablero sobre pilas para minimizar los efectos por deformaciones impuestas. En clave, el arco se une al tablero y ambos funcionan monolíticamente.

Se pueden diferenciar tres zonas en el puente: su acceso oeste con dos vanos de tablero biapoyado en estribos y pilas existentes, un tramo central o puente principal con tres

arcos, y un acceso en el lado este con losa en voladizo sobre el muro paralelo a la carretera en su borde norte.

El acceso oeste está formado por dos tramos con una luz máxima de 10 m y una longitud total de 19.50 m.

El puente principal está formado por tres tramos con una longitud entre juntas de 24.88 m, 24.45 m y 24.77 m de luz respectivamente. El tablero tiene una anchura de 12.15 m y conserva la posición y forma de arcos y pilas existentes.

El acceso este tiene una parte que apoya sobre el estribo del puente principal seguida de una losa hormigonada directamente sobre el terreno con un voladizo sobre un muro existente paralelo a la carretera en su lado norte. Este voladizo tiene nervios como los del tablero y aunque lo componen elementos prefabricados del mismo tipo, estos elementos prefabricados se apoyan durante construcción sobre una cimbra en esta zona. El conjunto de esta losa ortótropa se apoya en al final de la construcción sobre el terreno y sobre unos micropilotes que garantizan la estabilidad del muro existente de mampostería.

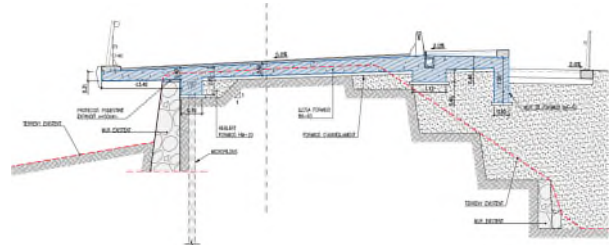


Figura 5. Secciones en acceso lado este.

La cimentación está formada por 16 micropilotes de 225 mm de diámetro de perforación que atraviesan cada una de las pilas existentes y de 12 micropilotes del mismo diámetro en los estribos. Las pilas existentes son de hormigón ciclópeo con pozos de cimentación y no contribuyen a la resistencia del nuevo puente.

Para materializar la conexión entre el arco, las pilas y la cimentación se llevó a cabo una demolición de la parte superior de las mismas que permitió el paso de los

micropilotes, y la construcción de una viga de atado.

En cuanto a los materiales, los hormigones fueron de 40 MPa de resistencia característica los que fueron ejecutados in situ, y 50 MPa los prefabricados. Las armaduras pasivas fueron del tipo B 500 S utilizándose acero inoxidable Duplex EN1.4362 de 600 MPa de resistencia última en las rótulas entre montantes y tablero.

Las acciones eran las habituales en este tipo de puente, existiendo sismo, aunque éste no resultó condicionante. Muchos de los elementos estaban expuestos a ambiente con sales fundentes.

Entre los aspectos críticos del diseño destaca las dimensiones estrictas del nuevo arco central que se limitaron al canto de los arcos existentes y ancho entre los mismos. En ese arco resultó crítica la verificación a flexión combinada con torsión, que era elevada dado el ancho de más de 12 m del nuevo tablero respecto a la dimensión de este arco central.

En los montantes, que conservaron la separación de los existentes, se tuvo que prever una articulación en su conexión con tablero y arco en algunos de ellos, para minimizar los esfuerzos hiperestáticos causados por la retracción y temperatura diferencial entre tablero y arco.

En lo referente al tablero, estaba constituido por unos nervios transversales y losa superior, ambos de hormigón. Sobre los nervios se apoyaban unas prelosas para el hormigonado de la losa in situ para evitar la necesidad de colocar un encofrado para construir esos elementos. Los nervios transversales eran pretensados y el diseño de ese pretensado con cumplimiento de niveles tensionales según normativa para las diferentes fases constructivas, en vacío y en servicio, resultaba el aspecto más crítico del diseño.

También fueron especialmente complicadas de detallar las uniones entre los

distintos elementos in situ y prefabricados, así como el detallado de armado.

5. Modificación del proyecto constructivo

Tras la adjudicación de la construcción del puente, Comsa propuso una serie de adaptaciones que requerían de un rediseño de la solución, no en su concepción global y general, pero sí en los detalles y en ciertos elementos. Las principales modificaciones fueron dos.

En primer lugar, el tablero se hormigonaba in situ sobre losas prefabricadas apoyadas sobre los montantes en los 3 vanos de arco y sobre cimbra en los vanos de acceso. Dichas losas prefabricadas son una estructura realmente singular desarrollada ad hoc para esta obra. Están formadas por la losa que hace de encofrado colaborante (la prelosa propiamente dicha) que encofra tanto la parte principal o núcleo del tablero como los voladizos laterales. Para dotar de la rigidez y resistencia a dicha prelosa se dispone de nervios tanto en dirección longitudinal como transversal. Los nervios longitudinales se sitúan en los bordes del núcleo del tablero. Por lo tanto, tienen función resistente y función de encofrado lateral de dicho núcleo. Los nervios transversales sobresalen por encima de la prelosa de encofrado colaborante, pero también por debajo en los voladizos. Dichos nervios transversales por debajo de los voladizos reproducen el aspecto de las costillas transversales del tablero concebido originalmente en el proyecto. Con esta configuración se consigue una prelosa bidireccional de comportamiento marcadamente ortótropo durante el hormigonado del tablero. Otro rasgo singular de estas prelosas son los huecos de sus nervios transversales que permiten la colocación de armadura longitudinal para proporcionar continuidad longitudinal a dicha capa de armadura. Este sistema modificaba el del

proyecto constructivo que consistía en vigas transversales prefabricadas pretensadas y prelosas apoyadas en ellas.

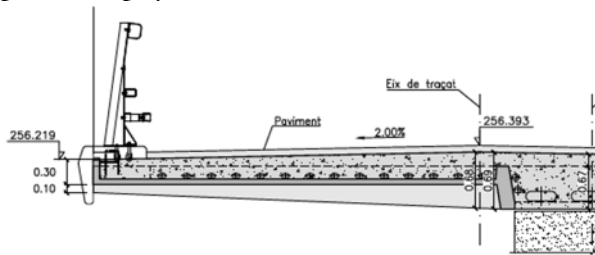


Figura 6. Sección transversal del tablero, incluida la prelosa que es de ancho completo.

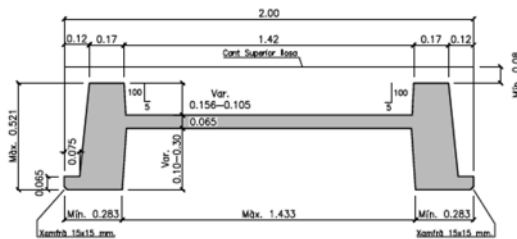


Figura 7. Sección transversal de la prelosa en los voladizos.

En segundo lugar, se propuso que los montantes estuvieran empotrados en el arco y articulados en el tablero en lugar de biarticulados en sus dos extremos como se preveía en el proyecto constructivo. El empotramiento en la base elimina la necesidad de apuntalar temporalmente los montantes biarticulados durante la construcción del tablero. Al eliminar la articulación inferior, aumenta la rigidez de los montantes y los consiguientes esfuerzos por deformaciones impuestas. Por ello se tuvo que modificar su espesor de 0.25 a 0.40 m.



Figura 8. Imagen de arco, montantes y prelosas.

Con la modificación el tablero está formado por una serie de prelosas prefabricadas de 2.00 m de ancho que apoyan sobre los montantes en los tramos en arco, con una zona central maciza. Las prelosas prefabricadas cuentan con un nervio cada dos metros de 580 mm de espesor. Sobre la prelosa se hormigona una losa in situ que varía en espesor entre 300 mm y 350 mm.

También se modificó ligeramente la cimentación. La inyección de los micropilotes fue del tipo IGU (inyección global unificada). Dos de los micropilotes en el estribo este fueron del tipo Titán debido a su gran inclinación y la dificultad de sostener el terreno durante la perforación.

6. Modelización estructural

Para analizar el comportamiento estructural del puente se utilizaron dos modelos:

Por un lado, se preparó un modelo que representa el tablero con un único nervio central y una sección evolutiva por fases, teniendo en cuenta las acciones reológicas existentes en la estructura. Se consideró el proceso constructivo, contemplando en una primera fase el arco como único elemento estructural, en una segunda fase los montantes, y finalmente el tablero con sus diferentes fases de hormigonado. Este modelo se utilizó para el cálculo del arco y los montantes, así como del tablero en dirección longitudinal.

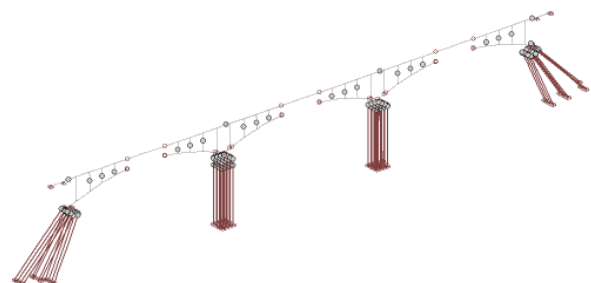


Figura 9. Imagen modelo global.

La fisuración se tuvo en cuenta en el modelo aplicando manualmente factores de reducción a la inercia calculados a partir del

nivel de esfuerzos y su armado. En este caso, se consideró una reducción del 70% de la inercia a torsión para los arcos y del 50% para los montantes. Asimismo, en el arco también se consideró una reducción de la inercia a flexión del 70% en los apoyos y del 30% en el tramo central.

Por otro lado, se generó un modelo 3D que representa el tablero con elementos lámina, y los nervios y otros elementos estructurales mediante elementos barra. Este modelo se utilizó para analizar efectos locales, así como para el análisis de la losa en dirección transversal.

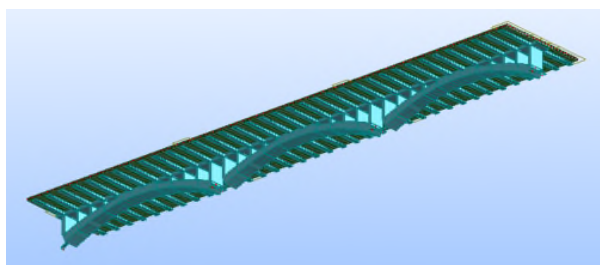


Figura 10. Imagen modelo con láminas y vigas.

El sistema tiene un comportamiento eficiente a torsión, efecto importante en tablero anchos y aún más con carriles no centrados como es el caso, al existir una acera de 2.50 m de ancho en uno de sus bordes, el ubicado aguas abajo. La torsión se resiste mediante la propia del arco, la del núcleo central de nuevo tablero y el par de fuerzas horizontales transversales transmitidas entre ambos [4].

7. Construcción

El proceso de construcción comenzó con la reparación de las superficies de las pilas antiguas y su refuerzo con un sistema de material compuesto de fibras de carbono.

El refuerzo se realizó antes de la ejecución de los micropilotes desde la plataforma de trabajo instalada sobre la calzada existente. Esto implicó perforar taladros en la subestructura original formada por hormigón ciclópeo.

La ejecución de micropilotes fue un desafío por la alternancia entre materiales muy duros, como los materiales de las pilas, primeras capas blandas de suelo debajo de ellas formadas por arenas granulares sueltas, pero con algunos cantos rodados de tamaño mediano, y nuevamente estratos de rocas arcillosas duras. En el proceso de perforación se utilizó un martillo hidráulico de alta capacidad y herramientas especiales en la punta de los pilotes.

En este sentido se registraron algunos problemas que obligaron a ejecutar micropilotes adicionales en el limitado espacio libre disponible en la subestructura.

Una vez terminadas las cimentaciones se procedió a la demolición de la losa del tablero existente y de los montantes verticales mediante diferentes métodos:

- Para los vanos laterales se utilizaron máquinas con cizalla hidráulica y trituradora que demolían el tablero y montantes directamente en el puente.
- Para el vano lateral, situado sobre el río, se realizaron cortes con hilo diamantado y sierra circular para formar piezas que después se retiraban con grúa y se demolían posteriormente en el suelo.

La demolición siguió un orden predefinido, comenzando desde el centro hasta el lateral del vano, pero manteniendo las piezas intermedias hasta el final. Antes de la demolición, los arcos existentes se arriostraron en una sección de los riñones para estabilizar dichos arcos ante la acción de cargas de construcción horizontales.



Figura 11. Vista del desmontaje de piezas de cubierta cortadas.

Tanto para el análisis de derribos como para los procesos constructivos de nuevos elementos estructurales, se estudió la respuesta estructural del sistema arriostrado de arcos existentes mediante modelos de elementos finitos. Además, se verificó su capacidad portante para definir la seguridad en la secuencia de demolición y construcción por tramos.

Antes de la construcción de los nuevos arcos, se perforó el cajeadado de los futuros encepados en el interior de la fábrica de las pilas existentes.

Cabe destacar la atención prestada a las interferencias de las armaduras por su alta densidad en los extremos empotrados del arco, encepados y armaduras de arranque de los montantes.



Figura 12. Colocación de las barras de espera de uno de los montantes.



Figura 13. Enfofrado del nuevo arco colgado de los arcos originales.

El nuevo arco se ejecutó sobre un enfofrado colgado de los arcos existentes. Los montantes también se ejecutaron in situ, colocando cuidadosamente las barras de conexión de acero inoxidable en las posiciones previstas en las secciones superiores de dichos montantes. Esta unión entre montantes y tablero era rotulada en los tres montantes intermedios entre pila y clave de arco, y empotrada en el montante más cercano a la pila. En este sentido, fue necesario replantear con precisión cada posición de las barras para evitar interferencias con la armadura inferior longitudinal del núcleo de la losa del tablero, como se muestra en la siguiente figura.



Figura 14. Vista de losas prefabricadas con armadura inferior longitudinal de tablero atravesada y uniones inox.

Una vez colocadas las prelosas, se completó el ferrallado del tablero y se hormigonó en dos etapas principales:

- Núcleo longitudinal en dos subfases:
 - parte inferior

- parte superior del núcleo y hombros de losa

- Voladizos

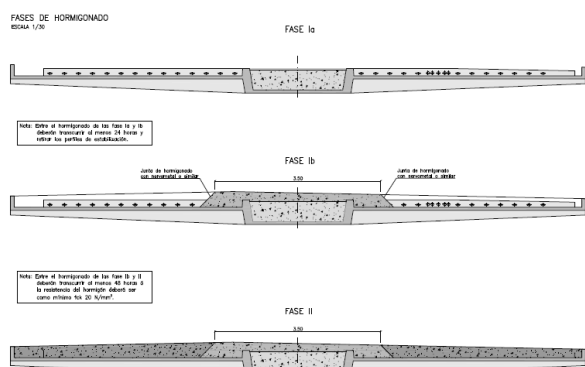


Figura 15. Fases de hormigonado en sección transversal

Para finalizar, antes del montaje del equipamiento, las instalaciones y los acabados, se ejecutó la reparación estructural y estética de los arcos antiguos, pilares y estribos.

8. Conclusiones

El diseño óptimo de un puente se inicia con la consideración de todos los condicionantes y no solo los estructurales, sino también los de requerimientos normativos en otros ámbitos, como el hidráulico en este caso.

Aprovechar las estructuras existentes en la medida de lo posible supone muchas veces un ahorro importante en la adaptación de las infraestructuras existentes a las necesidades actuales y la prolongación de la vida útil de las mismas.

A parte del ahorro en coste, y del menor consumo de recursos materiales y energía, el aprovechamiento, aunque sea parcial, de estructuras existentes permite conservar parte del patrimonio de la ingeniería de tiempos anteriores al nuestro.

Las actuaciones llevadas a cabo en el puente sobre el Llobregat en Cabrianes, pensamos que han respondido a todas las necesidades de ahorro, seguridad, integración en el entorno, y conservación de patrimonio.

Sería interesante sin embargo que no se pasase por alto que todo ello conlleva un mayor esfuerzo para todas las partes intervinientes respecto a una actuación más convencional e industrializada.

Agradecimientos

Agradecemos la confianza y apoyo del equipo de Infraestructures.cat tanto en la fase de redacción del proyecto como en la fase de obra en especial Jose Luis Nieto y Cristina Recuero. También la colaboración de todo el personal de Alvipre y especialmente Fernando Osán.

Referencias

- [1] Eugenio Ribera, Puentes de Fábrica y Hormigón Armado, 1ª edición. Madrid, 1922.
- [2] Paul Lauchinger et al., New European Technical Rules for the Assessment and Retrofitting of Existing Structures, European Commission, Luxembourg, 2015.
- [3] Demolición y Reutilización de Estructuras de Hormigón, GEHO, Madrid, 1997.
- [4] Millanes, F. & Matute, L. 1999. Ampliación de un puente arco histórico en Castelló de la Ribera”, Revista Hormigón y Acero, n. 232, 2º trimestre. Madrid, 1999.