

Puente sobre el Río Magdalena en Puerto Berrío (Colombia)

Bridge over the river Magdalena in Puerto Berrio. Colombia

Javier Muñoz-Rojas^a, Silvia Fuente García^b, Santiago Rodríguez Lorente^f,

Jorge Delgado García-Pomareda^c, Javier Ortiz^e

^{a, b, d} Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Carlos Fernández Casado S.L. Madrid

^{c, e} Máster de Ingeniería de Estructuras. Carlos Fernández Casado S.L. Madrid

^f Ingeniero Civil. Msc Estructuras Universidad Nacional de Colombia

RESUMEN

El proyecto del puente sobre el río Magdalena consiste en la construcción de un puente carretero de longitud total 1360 m. La distribución de luces es $17 \times 40.0 + 140.0 + 2 \times 200.0 + 140.0$.

El tramo principal originalmente estaba constituido por un pórtico con un vano de 200 metros de luz y vanos de compensación de 100 m, con pilas en V empotradas en el tablero. Durante la construcción de las cimentaciones, se produjo la socavación esperable en 100 años, lo que hizo inviable la construcción de las cimentaciones que no estaban ya terminadas, y obligó a modificar la distribución de luces y con ello la configuración frente a cargas horizontales, con aisladores sísmicos de núcleo de plomo.

ABSTRACT

The Project of the Bridge Over the River Magdalena consists on a road Bridge 1360 m long, being the span distribution $17 \times 40.0 + 140.0 + 2 \times 200.0 + 140.0$.

The main bridge was initially conceived as a frame, with a main span 200 m long and two side spans of 100 m, and two V piers encastred into the deck. While the foundations were under construction, the expected 100 years scour occurred, so it was not possible to finish the remaining foundations. This compelled to modify the span length distribution and the horizontal configuration, that was changed to seismic isolation of the deck, using lead bearings and vertical piers over the constructed foundations.

PALABRAS CLAVE: Voladizos sucesivos, socavación, aislamiento sísmico, núcleo de plomo.

KEYWORDS: Balanced cantilever, scour, seismic isolation, lead rubber bearings

1. Introducción

El proyecto del puente sobre el río Magdalena forma parte de la actuación Autopista Río Magdalena, una vía en calzada sencilla que se inicia en Remedios en el departamento de

Antioquia, en Colombia, y se extiende hasta el municipio de Cimitarra en Santander. Consiste en la construcción de un puente carretero, incluyendo sus accesos, de longitud total

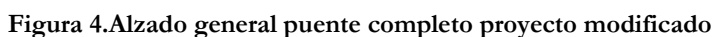
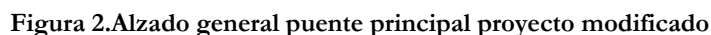
Existía un proyecto inicial de APIA XXI con la configuración de puente siguiente:

- En el puente principal la vinculación del tablero-pilas en el vano principal es del tipo aporticada realizada sobre pilas con diafragmas dobles en forma de V.

Durante la ejecución de las cimentaciones del puente principal se produjeron crecidas excepcionales que provocaron una gran socavación del lecho del cauce, alcanzando los niveles previstos para un periodo de retorno de 100 años.

Esta situación provocó que en la práctica no fuera posible continuar con las cimentaciones no realizadas en la margen derecha, cuya primeras pilas se situaban sobre el mismo cauce (denominadas en el proyecto original P21 a P26).

OHL encargó en ese momento a Carlos Fernández Casado S.L. el apoyo técnico para plantear una solución a este problema.



Después de evaluar diversas alternativas la conclusión a la que se llegó fue que era recomendable duplicar el vano de 200 m extendiendo el nuevo vano hacia la margen derecha para salvar la zona donde en el proyecto inicial estaba prevista la implantación de pilas en el agua. Esta situación se presentaba además favorable para poder cubrir de una forma más adecuada una posible modificación en el futuro de las márgenes del río por la dinámica fluvial, algo habitual en la zona, que podría llevar a hacer pasar el cauce principal del mismo por las zonas donde no se habían previsto grandes luces.

La configuración prevista en el diseño original con pórticos en V para el vano principal de 200 m se mostró que no era conveniente para el puente con cuatro vanos, dado que la reducida altura de las pilas aportaba una excesiva rigidez del sistema frente a los movimientos longitudinales provocados por la temperatura y efectos reológicos, que producía un nivel de reacciones incompatible con las cimentaciones ya construidas. Por ello se cambió el diseño de estas pilas a elementos verticales con apoyo único en el que se recurrió, para optimizar el comportamiento sísmico, a una solución de aislamiento y amortiguamiento por medio de LRB.

En paralelo se propuso ajustar los vanos de compensación extendiéndolos para que fueran superiores a la mitad del vano central, configuración favorable de cara al pretensado y a evitar las reacciones de levantamiento en las pilas extremas. Esto llevó a que la P18 del proyecto inicial no fuera necesaria.

Una vez aprobada la solución por las autoridades CFC desarrolló el correspondiente proyecto modificado para OHL y a la vez ha realizado las labores de apoyo técnico a la construcción.

Para el viaducto de acceso, realizado con un tablero de vigas prefabricados, se ha mantenido la solución prevista por APIA XXI llevándose a cabo solo ajustes y comprobaciones de obra en las vigas prefabricadas, losa y aparatos de apoyo con aislamiento sísmico finalmente dispuestos.

2. Descripción de la solución

La nueva disposición del puente reducía a dos las zonas del puente:

- El viaducto de acceso de la margen izquierda cuya configuración se respetaba íntegramente salvo la eliminación del vano extremo de conexión con el puente principal que pasaba a estar por ocupado por la extensión del tramo con sección cajón. Por tanto la disposición final consta dos unidades de 9 y 8 vanos cada uno de 360 m y 320 m de longitud con junta intermedia sobre la pila 9, todos ellos resueltos con tableros de vigas prefabricadas de 40 m

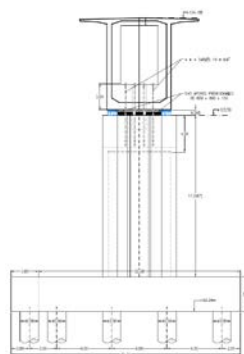


Figura 5. Imagen de la pila 19 y la dovela 0

- El puente principal de 680 metros de longitud con sección cajón de canto variable de hormigón pretensado con distribución de luces 140 - 200 - 200 - 140 m de luz,
- Estructuralmente la configuración ante cargas horizontales, especialmente sismo, se modificó, pasando de una configuración de pórtico empotrado a una solución aislada.

Como se ha referido la solución con pila empotrada no era adecuada y se cambió a pilas verticales con apoyo único. Como apoyos se previeron aisladores, estudiándose la opción de péndulos de fricción o apoyos de neoprenos con de núcleo de plomo (LRB) siendo esta solución la finalmente adoptada.



Figura 6. Voladizo de P19 llegando a zona de cimbra
La configuración longitudinal del tramo de acceso se mantuvo. Se trata de vigas prefabricadas con continuidad sobre pilas, apoyadas en aisladores sísmicos de neopreno zunchado de alto amortiguamiento, excepto en pila 9, estribo 2 y pila de conexión con el tramo principal, en el que se han dispuesto apoyos tipo pot con topes transversales para evitar desplazamientos transversales en las juntas.
La construcción del tablero final se ha ejecutado por voladizos sucesivos simétricos consecutivos de 100 metros a cada lado desde las tres pilas 19, 20, y nueva 21A, y con cimbra cuajada en los tramos de 40 metros entre la pila 17 y la antigua pila 18 eliminada, y desde el final del voladizo de P21A hasta el estribo 2.

Con este nuevo puente se consigue una solución más diáfana, cumpliendo todos los gálidos requeridos y, viable constructivamente. Además dado el carácter divagante del río, cuyo cauce parece más centrado ahora en el último vano, es más razonable y estéticamente más adecuada la configuración de luces.

Además de socavación en el nuevo vano principal, se produjo un relleno en el vano inicial, modificando la zona de calado máximo y trasladando el canal de navegación real al vano contiguo.

La compensación conseguida con los vanos de 140 metros ha permitido eliminar los anclajes verticales en las pilas de juntas.

El puente se encuentra inscrito en un trazado recto en planta y tiene pendientes constantes en los vanos de acceso y un acuerdo vertical parabólico en los vanos centrales.

2. Viaducto de Acceso



Figura 7. Vista del tramo de vigas

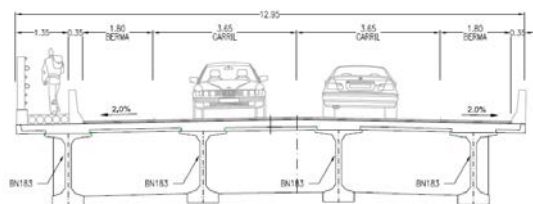
Las luces de los vanos de acceso de 40.0 m permiten optimizar la relación de costes de un tablero de vigas pretensas que facilite la construcción independiente de las condiciones del terreno en cuanto a la situación de inundación, y un coste de pilas y cimentaciones elevado por las malas condiciones resistentes de un suelo de tipo aluvial.

La disparidad de luces obliga a disponer juntas estructurales separando los vanos de acceso de los principales.

Los vanos de acceso tienen un canto constante de 2.0 m. La sección está configurada por 4 vigas pretensas separadas 3,45 m de 1.87 m de canto. Las almas tienen un espesor constante de 0.15 m y la losa superior de 0.23 m, con vuelos de 0.70 m.



Figura 8. Vista aérea del tramo de vigas



TABLERO, TRAMOS DE APROXIMACION

Figura 9. Sección tipo del tramo de vigas



Figura 10. Pila 17 de transición

Las vigas de los vanos de acceso están pretensadas con cordones de 14 mm con un trazado recto adaptado a la construcción, dando la continuidad entre vigas mediante una riostra de hormigón armada.

Las pilas del viaducto de vigas tienen una geometría rectangular, de tal forma que las pilas de P1 a P15 son de 5x2m de sección maciza; la pila P16 es de 5x2.5m y la pila P17 de transición al tramo de voladizos es de 6x3m, con una sección hueca de 0.75m de espesor.

El estribo izquierdo se propone como un estribo pilotado clásico cerrado con un encepado y pilotado.

3. Puente Principal

La distribución de luces del puente principal es 140.0 + 2 x 200.0 + 140.0.

El encaje de luces final ha permitido dar respuesta técnica adecuada a todos los condicionantes planteados en el estudio de alternativas. Al duplicar el vano de luz principal sobre el río, de 200.0 m, se ha evitado la construcción de las cimentaciones de las pilas intermedias con medios flotantes.



Figura 11. Vista de tramo P19 y P20 y tramo de acceso

También cumple las condiciones de navegabilidad requeridas en río tanto para el gálibo horizontal como vertical tanto en el vano entre pila 19 y 20 requeridos por el proyecto, como entre las pilas 20 y 21A, vano de actual



Figura 12. Vista aérea del puente principal y cimbra calado máximo. La anchura total del tablero es de 12.95 m. Los vanos principales tienen una variación de canto parabólica entre 10.0 m en la sección de apoyos y 3.0 m en la sección de centro de vano.

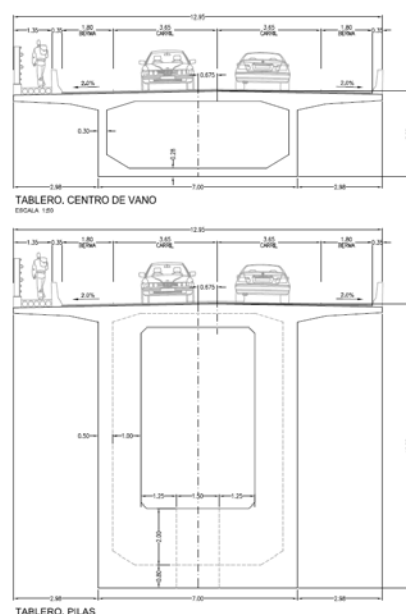


Figura 13. Sección de pila y centro de vano del puente principal

Debido a la relación de ancho y canto, las almas se plantean verticales. El ancho de la losa inferior es de 7.0 m y su espesor varía entre 0.80 m en la sección de apoyos a 0.28 m en la sección de centro de vano. El espesor de las almas, por su parte, varía entre 0.50 m y 0.30 m en las mismas secciones. La losa superior varía su espesor entre 0.34 y 0.20 m. Los vuelos tienen una longitud de 3.0 m y los espesores varían entre 0.20 y 0.34 m.

El tablero de los vanos principales está pretensado con tendones de 19 cordones de 14 mm con una tensión de rotura $f_{pu}=1860$ MPa. Los cables se han agrupado en función de su posición y momento de puesta en carga:

- Pretensado Superior de Proceso: Pretensado en losa superior durante la construcción por voladizos sucesivos.
- Pretensado Inferior de servicio: Pretensado en losa inferior que se introduce una vez conectados los voladizos desde las pilas consecutivas.

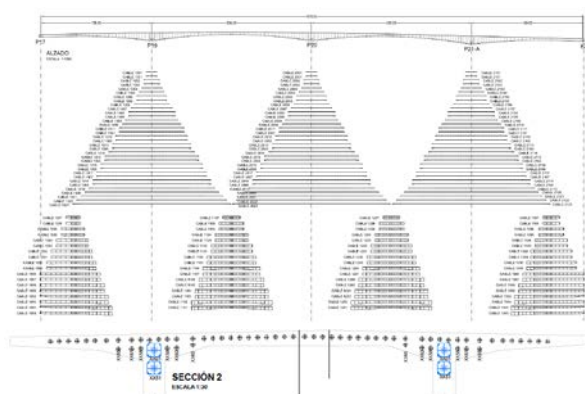


Figura 14. Distribución de cables de pretensado y sección de losa superior en dovela 1

El diseño de los cables se ha realizado para poder ejecutarse con una construcción simétrica de dovelas, siendo activos los anclajes desde las dovelas simétricas salvo en casos puntuales. Todos los anclajes superiores están dispuestos en el frente de dovela, en la cartela superior o en el alma.

La riostra de pilas se ha planteado como un marco en el que se recrecen las almas y se macizan los dos metros inferiores para disponer los anclajes de pretensado vertical provisional y

recoger la flexión introducida por los apoyos definitivos, ya que se han dispuesto 5 en la alineación central.

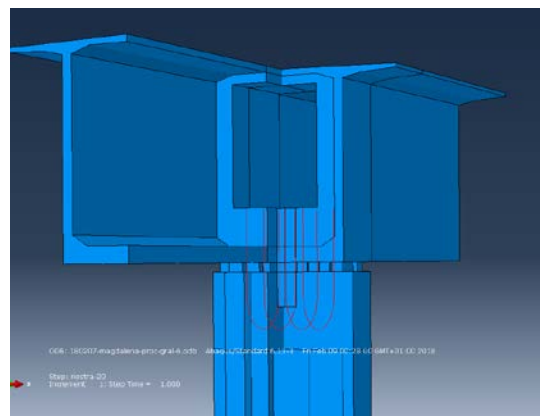


Figura 15. Modelo de la riostra de pilas

La calidad del hormigón del tablero es el correspondiente a una resistencia característica $f_{ck}=45$ MPa. La armadura activa se complementa con la armadura pasiva con acero de calidad $f_{yk}=420$ MPa, dimensionada para hacer frente tanto los efectos locales como globales del cajón.

Las pilas principales, de P19 a P21A, son de sección octogonal hueca en la base y maciza en la parte alta.

El estribo izquierdo se propone como un estribo clásico cerrado con un encepado y pilotado, y el estribo derecho, como un cargadero pilotado, con pilotes de diámetro 1.6m.

4. Aislamiento sísmico

El tablero se encuentra apoyado en los estribos y en las pilas 9 y 18 sobre aparatos de apoyo tipo neopreno teflón en caja con topes transversales. En las pilas 1 a 8 y 10 a 17 se disponen aparatos de apoyo de neopreno zunchado de alto amortiguamiento. En las pilas centrales del tramo principal, pilas 19, 20 y 21-A se dispone en cada una 5 aisladores sísmicos de neopreno con núcleo de plomo y alto amortiguamiento. Cada apoyo tiene una capacidad 25000 kN a carga vertical, con desplazamientos máximos admisibles de 40 cm para la combinación extrema.

Las acciones sísmicas son resistidas en los estribos y pilas transversalmente de forma individual mientras que la acción sísmica longitudinal es resistida por todas las pilas excepto la 9 y la 17.

En los extremos del puente así como en las pilas 9 y 17 se disponen juntas de dilatación de tipo elastomérico con la capacidad necesaria de movimiento.

5. Construcción

Los trabajos del puente sobre el río Magdalena se iniciaron con la construcción de las cimentaciones. Durante su ejecución, se produjo la socavación en el lecho del río y la subida del nivel de agua. La corriente produjo una socavación local que arrastró las tablestacas del recinto estanco instalado en la pila central. Debido a la dificultad de emplear medios flotantes se elevó la cota del encepado de la pila 20, recreciendo los pilotes ya construidos e independizando la construcción del encepado del nivel del agua, mediante prelosas apoyadas sobre una estructura auxiliar y esta a su vez en las camisas de los pilotes.



Figura 16. Prelosas para encofrado de encepados de pila P20 en el río

Las pilas se construyen con encofrado trepante. Los vanos de acceso se ejecutan vano a vano por medio de grúas que permiten independizar la construcción del tablero de las condiciones del terreno.

Los vanos principales se realizan por medio de voladizos sucesivos equilibrados desde las pilas P-19, P-20 y P-21-A. Además se construyen cimbrados un tramo de 40 metros entre la P17

y la eliminada P18, y el último vano de 40 m entre la última dovela de P21-A y el estribo 2.

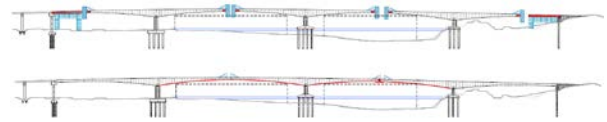


Figura 17. Proceso constructivo



Figura 18. Carro de avance vista lateral

Se han utilizado 6 carros de hormigonado que han permitido la construcción de los tres voladizos simultáneamente.



Figura 19. Carro de avance vista frontal

Las dovelas tienen una longitud variable de entre 2.75 m y 5.0 m, y un peso máximo de 180 t. Durante la construcción se ha previsto el empotramiento provisional del tablero en las tres pilas principales, materializado mediante un pretensado vertical con forma de lazo que cose la riostra del tablero a las cabezas de las pilas con una batería de apoyos de neopreno interpuestos, la misma solución diseñada para el puente sobre el Río Narcea [1]



Figura 20. Detalle de zona cimbrada de P17



Figura 21. Construcción de dovela 0 de P20 en el río



Figura 22. Pretensado vertical en empotramiento provisional

La configuración del puente con vanos de compensación mayores de la mitad de la luz principal, contruidos por voladizos sucesivos añade una complicación adicional al control geométrico del tablero, debido a que las contraflechas de construcción no son simétricas, es necesario tener en cuenta los giros

que se producirán al descimbrar los extremos de los vanos. Además las luces consideradas obligan a considerar así mismo la fluencia que se produce durante la construcción para la obtención de las deformaciones.

Una vez finalizada la construcción del cajón se procede a la sustitución de apoyos previo levantamiento del tablero con gatos hidráulicos.

8. Conclusiones

El proyecto del puente sobre el Río Magdalena en Puerto Berrio da solución a los problemas planteados en el cruce de un gran río navegable, con cauce divagante y problemas de socavación ocurridos durante la construcción.

Se plantea una solución que independiza la construcción del nivel de agua, con dos vanos principales de 200 metros y vanos laterales de 140 metros de luz, y un viaducto de acceso de vigas de 40 metros de luz.

El tablero principal se empotra provisionalmente en las pilas centrales para su construcción por voladizos sucesivos.

Una vez terminada la ejecución, la configuración en servicio del puente frente a esfuerzos horizontales se modifica, sustituyendo el empotramiento por el aislamiento sísmico del tablero con apoyos de núcleo de plomo de alto amortiguamiento.

Con esta solución se ha podido incrementar la luz de los vanos laterales aprovechando la cimentación originalmente construida para la distribución de luces inicial.



Figura 23. Vista general del tramo principal en construcción

Agradecimientos

Propiedad: Agencia Nacional de Infraestructura

Concesión: Autopista Rio Magdalena. Aléatica

Construcción: OHL Construcción y Sistemas especiales de construcción SEC

Aisladores: Maurer SE. Aisladores sísmicos

Referencias

[1] Martínez Cutillas A., Navarro González Valerio J.A. : *Viaducto sobre el Río Narcea en la Autovía A63 de Oviedo a La Espina*, VIII Congreso de ACHE de Puentes y Estructuras, Santander 2020.

[2] Muñoz-Rojas J, Fernández S et al : *Viaducto sobre el Río Miño en Lugo*, VIII Congreso de ACHE de Puentes y Estructuras, Santander 2020.