

Diseño conceptual y proyecto de licitación del Nuevo Puente Pumarejo sobre el río Magdalena en Barranquilla. Colombia

Project of the New Pumarejo Bridge over the Magdalena River in Barranquilla. Colombia.

Javier Manterola ^a, Javier Muñoz-Rojas ^b, Sara Fernández ^c, Juan A. Navarro ^d, Silvia Fuente ^e, Miguel Angel Gil ^f, Álvaro Viviescas ^g

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

^g Ingeniero Civil. UIS. Bucaramanga. Colombia

RESUMEN

El nuevo puente Pumarejo sobre el río Magdalena en Barranquilla sustituye al construido por Riccardo Morandi en 1972 con dos objetivos principales: facilitar la navegación y ampliar la capacidad de la carretera. CFC desarrolló el proyecto constructivo (Fase III en Colombia) de la mayor obra del país con sus casi 4km de estructuras, el tablero de mayor anchura (38 m) y el vano con más luz (380 m). La escala de la obra fue una oportunidad para introducir tanto en los viaductos de acceso como en el puente principal atirantado soluciones tipológicas y sistemas constructivos industrializados no habituales hasta entonces en Colombia. (vigas de lanzamiento, cajones únicos de gran anchura, ...etc.).

ABSTRACT

The new bridge over the River Magdalena River replaces the previous bridge built by Riccardo Morandi and has two main purposes: improve the navigational channel and the road capacity with new lanes. The Detailed Design (named Phase III in Colombia) developed by CFC established the configuration of the bridge that turned to be the longest (more than 4 km), the wider (38 m deck) and with the longest main span (380 m) of the country. These circumstances brought the opportunity to define structural configurations and construction systems up to then not frequent in the country (launching gantries, large full-section box girders, ...etc.).

PALABRAS CLAVE:

Puente atirantado, construcción industrializada, viga lanzamiento, vano a vano, voladizos

KEYWORDS:

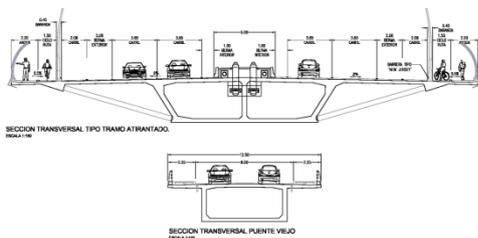
Cable-stayed bridge, industrialized construction, launching gantry, span-by-span, cantilever

1. Antecedentes

El proyecto del nuevo puente Pumarejo es una de las mayores actuaciones realizadas por el INVIAS, organismo encargado de las carreteras en Colombia. En el objetivo del mismo es por un lado eliminar el obstáculo que supone el puente actual construido por Riccardo Morandi en 1972 [1] a la circulación de navíos de gran tamaño por el río Magdalena comunicando así el interior de país con el Atlántico.



El segundo objetivo, enmarcado en el desarrollo general del transporte por carreteras, persigue ampliar y mejorar la capacidad de la principal vía que conecta el Oriente norteño con el resto de la red nacional, actualmente limitada en el cruce de su principal obstáculo, el río Magdalena, a dos carriles



Todo esto daba como resultado una obra con dimensiones excepcionales, las mayores del país hasta la fecha con un puente que al final sumaba casi 60000 m² y una longitud total cercana a los 4 km de estructuras.

El proyecto Fase III (equivalente al proyecto de licitación en España) se licitó en el año 2011,

siendo adjudicado al consorcio hispano-colombiano ECOPUENTES formado por las firmas IVICSA, JF SA y Estructurador Colombia SA). Dicho consorcio encargó a su vez a CFC el desarrollo conceptual y de detalle del puente.

El estudio se desarrolló en el periodo 2012-2014, lo que abarcó justificar primero la procedencia de cambiar la propuesta aprobada en la fase anterior (Fase II, equivalente a proyecto de trazado en España), un posterior estudio de alternativas y, una vez seleccionada la solución, el diseño detallado a nivel de proyecto de licitación. Esta fase incluyó estudios singulares como el ensayo en túnel de viento, impacto de buques, proyecto de instrumentación y monitorización y proyecto de iluminación.

Una vez concluido y aprobado, el proyecto Fase III sirvió para la licitación de los obras en 2015 que fueron adjudicadas a un consorcio liderado por Sacyr, habiéndose concluido en algo más de cuatro años a finales de 2019. Durante la fase de ejecución -en la que por motivos que no vienen al caso CFC no ha podido intervenir- el contratista ha introducido algunos ajustes a lo previsto en el proyecto de licitación tal como se explica en [10] lo que ha implicado entre otras cosas cambios en los ramales de conexión en la margen izquierda y acortamiento del viaducto de acceso de la margen derecha.

Debido a que en las obras públicas de Colombia no son posibles cambios profundos del proyecto de licitación durante la ejecución, la obra finalmente construida recoge de forma general el diseño planteado por CFC, principalmente en el cuerpo del puente así como su configuración general, conservando

así, en nuestra opinión, el diseño y el sello que

se había pretendido dar a esta relevante obra.



Fig. 3. Infografía del puente principal. CFC 2013

En tanto CFC no ha participado en los ajustes de obra el presente artículo intenta limitarse a describir los antecedentes y condicionantes del proyecto, el diseño conceptual y su desarrollo durante del proyecto de detalle, describiendo las singularidades constructivas y estructurales introducidas en esta obra. No hay por ello pretensión alguna de atribuirse los indudables méritos del equipo de construcción para resolver los retos y problemas que ha sido necesario abordar durante la construcción tal como se detallan en [10] [11] y [12] pero si se quiere reivindicar la contribución de CFC mostrando cómo ésta ha configurado y hecho posible de forma decisiva este singular puente, completando la información y presentaciones previas de los autores recogida en [3] [4] [5] [6] [7] [8] [9].

2. Planteamiento de la solución

El nuevo cruce sobre el río Magdalena era el puente más grande construido hasta la fecha en Colombia y el de vano con mayor luz. La complejidad técnica que implica realizar una obra de esta magnitud llevaron desde el principio a defender ante el INVIAS la necesidad de aprovecharlo como una oportunidad y escaparate para introducir en el país alguno de los sistemas que la ingeniería de puentes ofrece actualmente para realizar obras de forma económica, rápida y segura.

En este sentido se tuvo claro desde el inicio la importancia de recurrir a procedimientos constructivos industrializados para así poder realizar la obra de forma económica dentro del corto plazo que inicialmente se estableció como condición del proyecto de licitación (32 meses). Es procedente recalcar la importancia de este aspecto pues en el contexto de la ingeniería colombiana algunas propuestas pudieran ser controvertidas y objeto de debate dado que en el país lo más habitual es la construcción in situ por voladizos sucesivos de secciones cajón de tableros no muy anchos.

Finalmente las propuestas fueron recogidas con entusiasmo por los responsables del proyecto,

llevándose en paralelo por parte de CFC con la colaboración de la UIS una labor de difusión entre los técnicos del INVIAS, la profesión y centros académicos de procedimientos constructivos actuales de puentes como los que se incorporaron al proyecto [2] [3] [4] [5] [6] [7] [9].

Por otro lado y ya desde el punto de vista tipológico-conceptual, otra contribución de CFC a esta obra es la de haber planteado un puente con una solución formalmente unitaria manteniendo a lo largo del todo el tronco principal un mismo tipo de tablero y una unidad en los detalles. Este planteamiento ha sido ya empleado en otras obras de la firma (puentes de Cádiz, Danubio, Córdoba) buscando en ellos una continuidad formal como estructural, entre las distintas partes de un puente –accesos, puente principal, ramales– evitando las interrupciones que suelen ser habituales en obras ante el puente principal –en este caso atirantado– y los viaductos de acceso a ambos lados.

3. Descripción general.

Las nuevas condiciones de navegación requerían un canal libre de más de 300 m en el brazo de la margen izquierda así como levantar

la rasante de la nueva carretera para dejar un gálibo de navegación vertical de 45 m. Por otro lado las previsiones de crecimiento del tráfico de vehículos realizadas llevaron a la necesidad de un tablero capaz de alojar 6 carriles. Después de diversas iteraciones y propuestas en coordinación con el equipo de trazado se estableció una disposición en la que se distinguían varias partes:

- Viaducto de acceso de la margen derecha de 830 m de longitud.
- El puente principal sobre el canal de navegación de 830 m con un vano central de 380 m.
- El viaducto de acceso de la margen izquierda que cuenta con tres vanos de 70 m, el último de los cuales sirve de elemento de transición para enlazar con diversos ramales.
- Finalmente cuatro ramales, que habilitan los distintos movimientos de con la carretera y viales de la ciudad.

Desde el punto de vista de la configuración longitudinal de la obra y a pesar de su gran longitud el tablero es continuo de estribo a estribo, fijándose exclusivamente en los pilonos del puente atirantado y liberando por medio de apoyos “pot” deslizantes el resto de pilas.

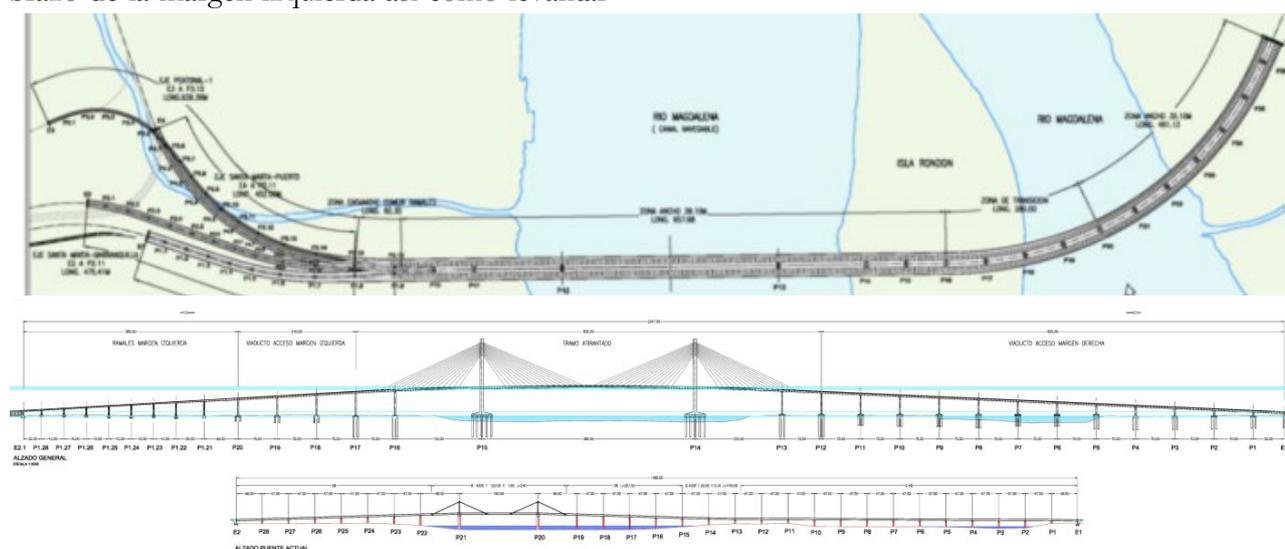


Fig. 4. Planta y alzados comparativos del puente actual y de la nueva obra

La configuración continua de toda la obra y la conexión monolítica con sus torres fue lógicamente validada por cálculos estructurales, con particular atención a las acciones sísmicas y a los acortamientos reológicos y térmicos. En el control de estos efectos es crítico poder incorporar adecuadamente la flexibilidad que aporta la interacción suelo-estructura. Esto se realizó por medio de estudios de sensibilidad teniendo en cuenta diversas condiciones posibles de rigidez de las capas atravesadas por los pilotes de cimentación.

4. Viaducto de Acceso

El acceso de la margen derecha de 830 m de longitud consta de trece vanos con distribución $12 \times 70 + 55$ m, presentando una planta curva de radio 461m. Durante la construcción al aceptarse bajar la rasante al reducir el gálibo de navegación se eliminó un vano de 70 m [9].

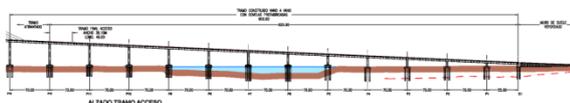


Fig. 5. Alzados de los vanos de acceso de margen derecha

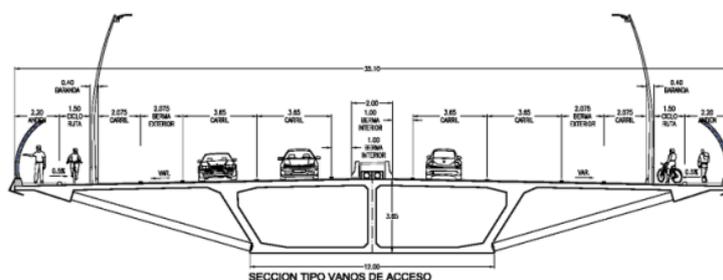
La anchura del tablero varía de 35.10 m en estribos a los 38.10 m en la conexión con la zona atirantada, para alojar doubles calzadas con tres carriles y aceras a ambos bordes.

Para recoger una plataforma tan ancha se recurrió a la solución de cajón único central de hormigón pretensado con tres almas prolongado lateralmente por vuelos sobre puntales.

La geometría del cajón es trapezoidal con canto constante con 3.65 m de canto, anchura de losa inferior 12,0 m almas exteriores ligeramente inclinadas para dar una anchura superior de 16,2 m. Se prolonga con sendos vuelos apoyados sobre puntales dispuestos cada 5.0 m en un nervio longitudinal triangular que recorre el vuelo. La variación de anchura de la sección se acomoda extendiendo simplemente los vuelos, manteniendo constante el cuerpo central y los puntales en todo el puente. Las calzadas se limitan por defensas tipo New Jersey y los bordes de las zonas peatonales se disponen pantallas antiviento metálicas que hacen las funciones de barreras laterales.

Los espesores de las losas, que se acartelan en todos los encuentros, varían entre 0.30 m y 0.25 m, los de las almas entre 0,40 y 0,65m.

El tablero se ejecuta en dos fases: primero el cajón central de 16.20 y posteriormente los vuelos in situ apoyados en los puntales prefabricados.



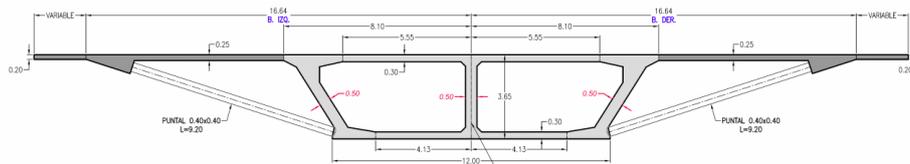


Fig. 6. Distribución funcional y estructural en el tablero

El acceso en la margen izquierda lo forman otros tres vanos de 70 m. Los dos primeros son idénticos a los del otro acceso, y el tercero es un vano especial con una planta variable que se va ensanchando progresivamente para enlazar con los cuatros ramales en los que se divide la plataforma para conectar con la red viaria de la ciudad. Este vano de transición es el único que se realiza in-situ para poder acomodar su geometría tan variable.



Fig. 7. Planta acceso margen izquierda

Las pilas son elementos verticales de hormigón armado con sección hexagonal hueca. En sentido longitudinal presentan una dimensión constante de 2,50 m y transversalmente variable, abriéndose en cabeza para disponer los aparatos de apoyo.

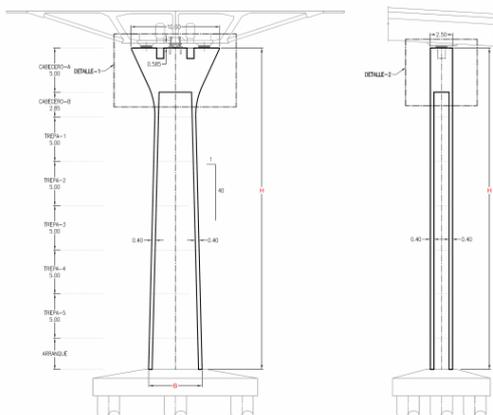


Fig.8. Pilas

La solución planteada para el cruce sobre el brazo principal del río situado junto a la margen izquierda por donde discurre el canal de navegación de 300 m es un puente atirantado simétrico con dos torres con un vano central de 380 m con un punto más alto sobre las aguas de 45 m. Tiene 830 m de longitud, compuesto por cinco vanos de luces 70-155-380-155-70, los tres centrales colgado de sendas torres centrales de atirantamiento por medio de tirantes dobles anclados en el eje de la sección.

La configuración del atirantamiento es en semiarpa con ventanas de 40 m sin tirantes en las zonas próximas a las torres. En el vano de compensación no se disponen pilas intermedias, simplemente una pila extrema. La proporción de luces de éste con el vano central (0,40 del vano principal) garantiza un comportamiento eficaz del sistema de atirantamiento y del control de las flexiones en tablero y pilono bajo cargas asimétricas.

La función de retenida contra la pila extrema no se concentra en un único cable sino que se reparte entre los últimos cuatro que se anclan a ambos lados de la pila. De esta forma se evitan unidades excesivamente potentes en uno sólo cable y se posibilita una configuración simétrica

del atirantamiento con un mejor resultado formal. Los tiros verticales producidos por las sobrecargas actuando en el vano principal se contrapesan con rellenos en el interior del cajón.

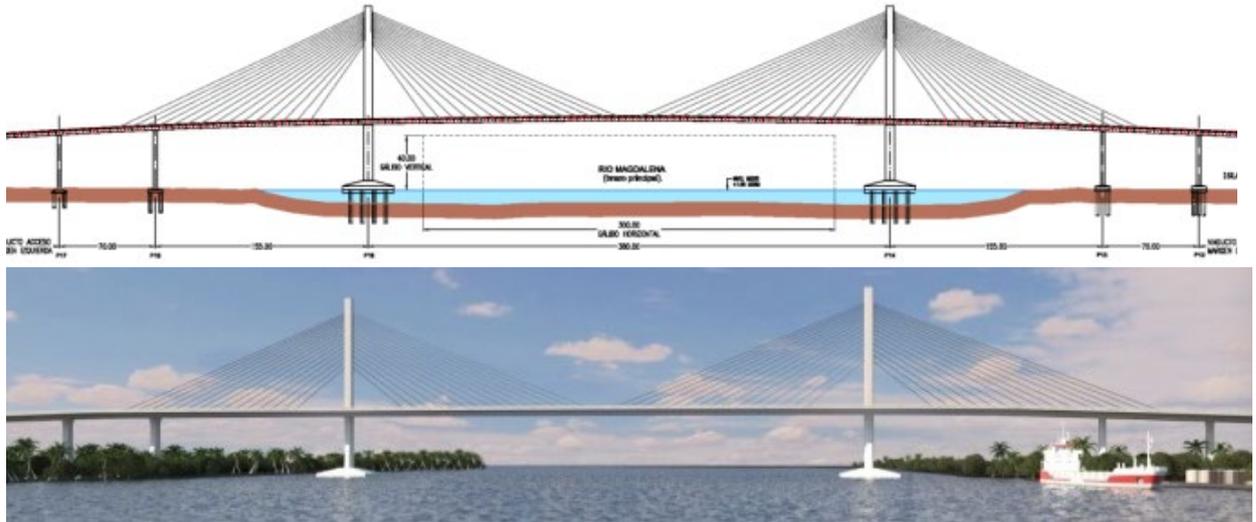
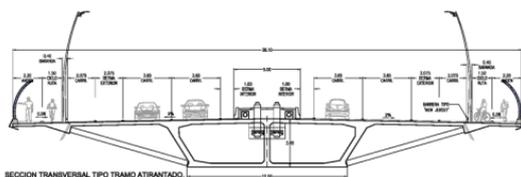


Fig.9. Alzado y vista del tramo atirantado.

Pilono y tablero están rígidamente unidos de manera que todas las acciones longitudinales (sismo, frenado...) del puente en su conjunto sean resistidos por ellos. A su vez, dada su altura, cuentan con flexibilidad adecuada para acomodar los desplazamientos por efectos térmicos y diferidos del hormigón sin introducir coacciones muy rígidas.

La sección del tablero es prácticamente idéntica a la de los vanos de acceso, con anchura constante de 38.10 m, incrementado desde los 35.10 m para dejar sitio a la torre de atirantamiento



Se anclan en el eje de la sección. Para referir las cargas de las almas laterales a los tirantes se disponen diafragmas transversales triangulares de conexión con los anclajes de estos, situados en el eje a uno y otro lado del alma central.

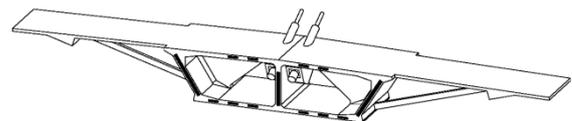


Fig. 11. Axonómetrica de dovela con tirante.

Los tirantes se anclan en el interior de la torre en estructuras metálicas formadas por cajones (“armarios”) conectadas monolíticamente a la sección de hormigón del mástil por pernos conectadores. El anclaje se sitúa sobre vigas de reparto soldadas a estos cajones inclinados según el ángulo de los tirantes con las correcciones oportunas por la catenaria del mismo.

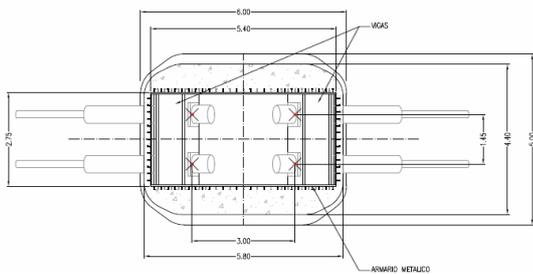


Fig. 12. Anclajes de tirantes en la torre.

Las torres de atirantamiento son verticales situadas en la mediana y con atirantamiento al centro del dintel. Tienen una altura total de 130.15 m. formados por una pila por debajo del tablero de 40.95 m. y un mástil a continuación de 89.20 m. Esta disposición produce un puente muy limpio y elegante que obliga a diseñar un dintel con rigidez a torsión para contrarrestar el efecto de la carga excéntrica que el atirantamiento no puede contrarrestar. Bajo el dintel la geometría de la torre es similar a la de las pilas de los accesos.

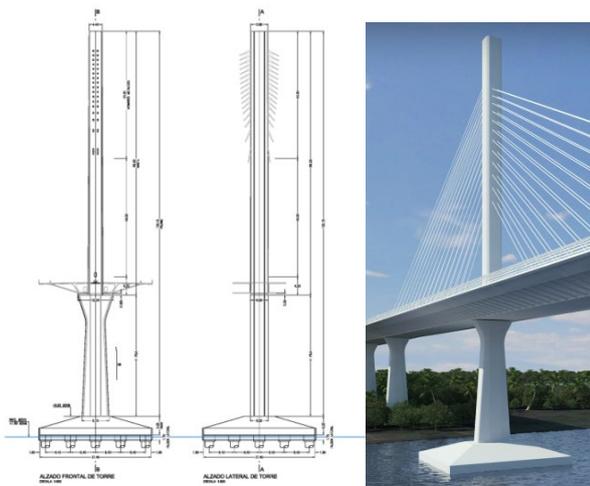
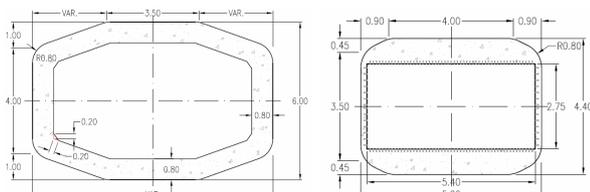
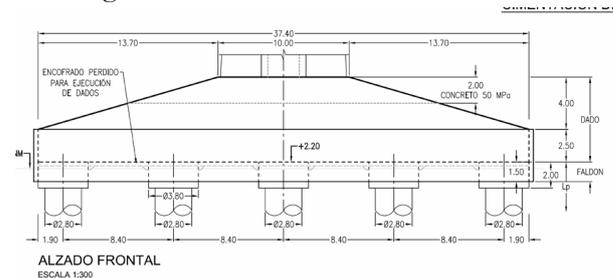


Fig. 13. Alzados de la torre de atirantamiento



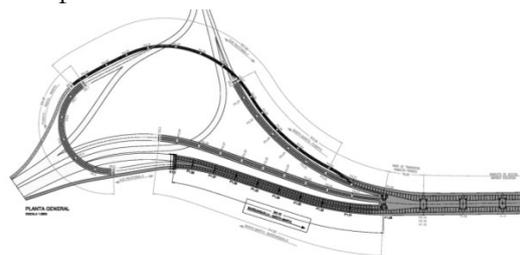
Las cimentaciones se realizan sobre pilotes de gran diámetro, ejecutando los encepados por

encima del agua con la ayuda de prelosas. Para ocultar la visión de los pilotes en aguas bajas se descuelgan en los laterales unos faldones.



6. Ramales

Para enlazar con los viales de la margen izquierda se habilitaban cuatro ramales con trazado en planta curvo. Tres de tráfico (Barranquilla-Santa, Santa Marta-Barranquilla, Santa Marta-Puerto) y uno peatonal, desaparecidos con los cambios de obra.



La menor altura del tablero sobre el terreno en estas obras permitía modularlos con luces más reducidas. Se ha adoptado el vano tipo de 40 m, en número variable según el ramal, que enlaza con los vanos del tronco con dos vanos de transición de 50 y 60 m.

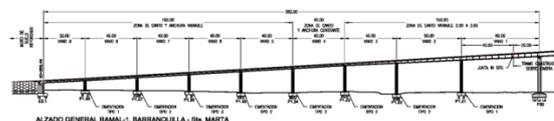


Fig. 17. Alzado típico de ramales de la margen izquierda.

En los vanos de 40 m el canto es de 2 m de canto. En los dos vanos siguientes de 50 y 60 m se dispone canto variable hasta enlazar con los 3.60 m del tronco.

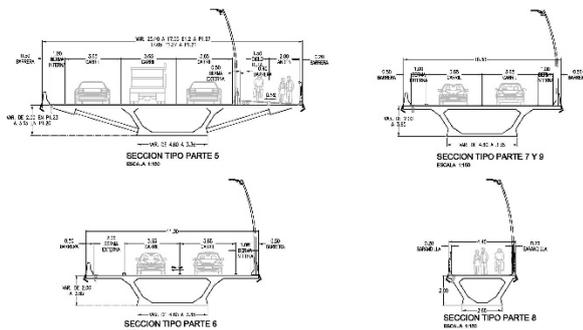


Fig. 18. Secciones tipo de los tableros de los distintos ramales.

7. Construcción

Como se ha referido anteriormente, se buscó uniformizar y estandarizar, en la medida de lo posible, la construcción con el objetivo de optimizar costes y plazos.

7.1. Vanos de Acceso

Se compararon varios de los procedimientos de construcción viables para vanos de hormigón de 70 m: voladizos y vano a vano, con versión in-situ (carros de avance o autocimbras) y prefabricada (carros de izado, vigas de lanzamiento para montaje en voladizo o vano a vano).

Un estudio comparativo realizado con la colaboración con la empresa BERD mostró que la construcción vano a vano resolvía de forma mejor este problema a pesar de la potente viga de lanzamiento que sería necesaria para 70 m de luz.

Fijada esta variable, la comparación global entre la construcción in-situ -con autocimbra- con la prefabricada con dovelas se inclinó por la última. En esta conclusión influían además del menor plazo los menores requerimientos para la viga de lanzamiento frente a las de una autocimbra al evitar el peso los encofrados y la mayor facilidad de manipulación y traslado en un trazado curvo como presentaba la obra.

Se tuvo no obstante la precaución de incluir en la memoria del proyecto una mención expresa a abrir la puerta a otros sistemas de construcción para facilitar que el constructor pudiera realizar propuestas en este sentido [7]. Hay que indicar que esto fue lo que ocurrió, pues una vez adjudicado el contrato el contratista propuso el cambio a una ejecución in-situ con autocimbra y así fue ejecutada la obra [10] [11].

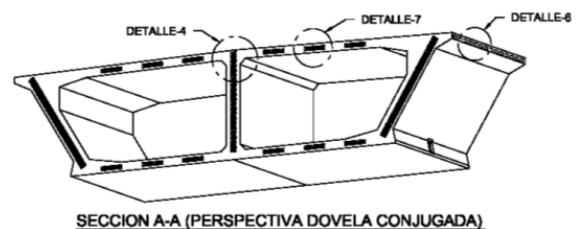


Fig. 19. Dovelas prefabricada del vano de acceso

En la validación de la propuesta pesó lógicamente la positiva experiencia previa en el puente de Vidin sobre el río Danubio realizado por FCC, obra de tamaño y dificultad homologable y ejemplo de la viabilidad de abordar una obra prefabricada exitosamente en entornos donde tampoco haya experiencia o tradición previa en este tipo de soluciones [7].



Fig. 20. Colocación de dovelas del tramo principal. Puente de Vidin. (CFC-FCC 2011)

7.2. Tramo Atirantado

Para la construcción del tablero atirantado es necesario recurrir al procedimiento de voladizos sucesivos simétricos, pero igualmente empleando dovelas prefabricadas, en este caso incorporando los vuelos desde el parque y dejando en esta zona unas juntas húmedas de 30 cm a realizar en obra.

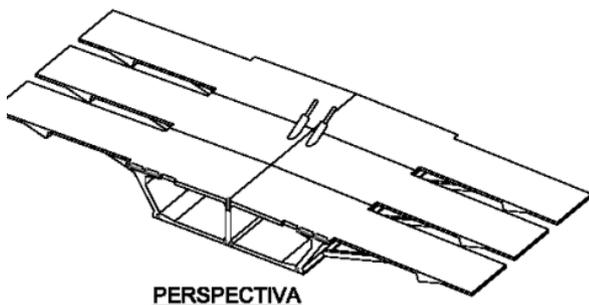


Fig. 23 Disposición de dovelas prefabricadas en el vano central

Se inicia con la dovela de arranque en la torre, para lo cual se definieron elementos especiales previstos para poder realizar conexión monolítica entre tablero y el mástil de la torre.

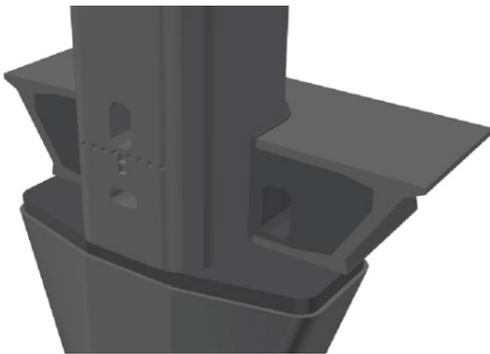


Fig. 24 Dovela de arranque.

A partir de esta se continúa por avance en voladizos transportando las sobre barcasas e izándolas con marcos en el frente de avance. El avance será simétrico desde las torres de atirantamiento, cosiendo las sucesivas dovelas con las anteriores por medio de barras de pretensado.



Fig. 25 Construcción del tramo atirantado por voladizos sucesivos

Hasta alcanzar el primer tirante, que se encuentra a 45 m se disponen dos tirantes auxiliares intermedios a 15 y 30 m de distancia de la torre para reducir el voladizo libre.

8. Ficha técnica

- Propiedad: *INVIAS*. Wilson Jaime, Subdirector de proyectos
- Proyecto: *Consortio Ecopuentes (IVICSA, JFSAS y Estructurador Colombia)*: Ricardo Serrano, Ernesto Colomer, Jorge Fandiño, Jorge Padilla, Edgar Forero, Carlos Argote, Viviana González, José Ivan Vallejo, Mauricio Gómez.
- Diseño conceptual y de detalle: *Carlos Fernández Casado S.L.*

9. Cuantías principales

	Atirantado	Acceso
Hormigón	0.54m ³ /m ²	0.64m ³ /m ²
Armadura	187kg/m ²	175kg/m ²
Pretensado	12kg/m ²	30kg/m ²
Tirantes	41kg/m ²	

12. Agradecimientos

Los autores quieren dejar constancia de la contribución aportada al proyecto por la empresa BERD para validar con garantías la propuesta de construcción vano a vano con viga de lanzamiento para luces de 70 m. Pedro Pacheco, Gilberto Alves, Fabio Carvalho, Rui Oliveira

Igualmente hay que destacar las aportaciones de la empresa Construgomes que sirvieron para precisar sistemas de construcción y evaluación

de rendimientos y ciclos de montaje. Camilo Miguez, Sergio Sa.

Agradecemos también las aportaciones, precisas y acertadas como siempre fueron, para la definición de las cimentaciones de este puente de nuestro recordado compañero D. Antonio Santos Moreno en la que fue una de sus últimas colaboraciones con CFC.

Finalmente mencionar la contribución del Instituto de Investigaciones Aeroespaciales. UPM responsable del ensayo de túnel de viento. José Messeguer, Gustavo Alonso



Fig. 26 Infografía de una vista aérea del nuevo puente Pumarejo

Referencias

[1] Riccardo Morandi. *Il ponte sul fiume Magdalena a Barranquilla, Colombia*, L'Industria Italiana del Cemento, n° 7-8, 1974, pp. 383 ss.

[2] Muñoz-Rojas J, Miguez C. *Tendencias actuales en el diseño y la construcción de puentes. Estado de la cuestión desde la experiencia del proyectista y el constructor especializado*. Jornadas del Instituto Nacional de Vías (INVIAS). M° de Fomento. Bogotá. Colombia. Diciembre 2011.

[3] Javier Muñoz-Rojas. *Puentes atirantados actuales. Grandes luces, puentes atirantados continuos y puentes extradosados*. Jornadas sobre Tendencias Sostenibles en Diseño, Mantenimiento y Construcción. ASOCRETO. Bogotá. Colombia. 2013

[4] Javier Muñoz-Rojas *Nuevo puente Pumarejo sobre el río Magdalena*. Conmemoración

60 años de la Sociedad de Ingenieros del Norte. Barranquilla. Colombia. Octubre. 2013.

[5] Javier Muñoz-Rojas. *Construcción actual de puentes de grandes luces: puentes atirantados y puentes arco*. Club de Ejecutivos de Cali. Colombia. Marzo 2014.

[6] Javier Muñoz-Rojas *Nuevo puente Pumarejo sobre el río Magdalena*. Presentación del Instituto Nacional de Vías (INVIAS). M° de Fomento. Bogotá. Colombia. Octubre 2014.

[7] Consorcio Ecopuentes/Carlos Fernández Casado S.L. *Contrato 2200 – Diciembre 2011 para la complementación de los estudios y diseños definitivos (fase III) para la Solución Integral del paso sobre el Río Magdalena en Barranquilla. VOLUMEN No1: Memoria técnica del Nuevo Puente Pumarejo: Memoria descriptiva y memoria de cálculo, Versión 3, 15/07/2014.*

[8] Manterola J., Muñoz-Rojas J. et al. *New Pumarejo Bridge over the Magdalena River in Barranquilla, Colombia*. Proceedings of the International Conference on Multi-Span Large Bridges. Oporto, Portugal. 2015.

[9] Javier Muñoz-Rojas. *El nuevo puente Pumarejo sobre el río Magdalena*. V Jornadas sobre Ingeniería Civil. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia. Octubre 2017

[10] Durán J.P. et al. *Adecuación del proceso constructivo del nuevo puente atirantado de Pumarejo en Barranquilla, Colombia*. VII Congreso ACHE de Ingeniería Estructural. La Coruña, 2017.

[11] Millanes F. et al. *El proyecto constructivo de los vanos de acceso del Nuevo Puente Pumarejo en Barranquilla, Colombia*. VII Congreso ACHE de Ingeniería Estructural. La Coruña, 2017.

[12] Millanes F. et al. *El proyecto constructivo del tramo atirantado del Nuevo Puente Pumarejo en Barranquilla, Colombia*. VII Congreso ACHE de Ingeniería Estructural. La Coruña, 2017.