

El proyecto constructivo del tramo atirantado del Nuevo Puente Pumarejo en Barranquilla, Colombia

*Detailed design of the cable-stayed stretch of the New Pumarejo Bridge in Barranquilla,
Colombia*

Franciso MILLANES MATO

Dr. Ingeniero de Caminos
IDEAM S.A.
Presidente
general@ideam.es

Enrique BORDÓ BUJALANCE

Ingeniero de Caminos
IDEAM S.A.
Director de departamento
enrique.bordo@ideam.es

Jokin UGARTE GONZÁLEZ

Ingeniero de Caminos
IDEAM S.A.
Jefe de proyectos
jokin.ugarte@ideam.es

David ORDÍN BARRABÉS

Ingeniero de Caminos
SACYR S.A.
Jefe de oficina técnica
dordin@sacyr.com

Miguel ORTEGA CORNEJO

Ingeniero de Caminos
IDEAM S.A.
Director de ingeniería
miguel.ortega@ideam.es

Fernando RUANO PARRA

Ingeniero de Caminos
IDEAM S.A.
Jefe de proyectos
fernando.ruano@ideam.es

Juan Pablo DURÁN RUIZ

Ingeniero de Caminos
SACYR S.A.
Director del proyecto
jduran@sacyr.com

RESUMEN

Con sus 2170 m totales y un vano principal atirantado de 380 m de luz, el Nuevo Puente Pumarejo sobre el río Magdalena constituye una de las obras de ingeniería de referencia en estos momentos en Sudamérica. El tramo central atirantado tiene una configuración en semi-abanico simétrica con dos pilonos de casi 125 m de altura. El único plano de atirantamiento suspende la sección cajón de hormigón de 38.1 m de ancho en su punto medio, requiriendo grandes voladizos laterales apuntalados por costillas y puntales equidistantes cada 5 m para alcanzar la gran anchura requerida. Este artículo repasa los aspectos fundamentales del tramo atirantado del puente.

ABSTRACT

With 2170 m total length and a main 380 m cable-stayed span, the New Pumarejo Bridge is one of the today's reference engineering works in South America. The central cable-stayed bridge has a symmetric semi-fan configuration, with almost 125 m height towers. The only staying plane hangs the 38.1 m width cross section from its middle point, requiring enormous side cantilevers bore on transverse ribs and inclined struts every 5 m. This paper analyses the main aspects of central the cable-stayed bridge.

PALABRAS CLAVE: puente atirantado, voladizos sucesivos, sismo, cajón de hormigón.

KEYWORDS: cable-stayed bridge, free cantilevering, seism, concrete box girder

1. Introducción

Situado a unos 12 km de la desembocadura del río Magdalena, y a escasos 30m aguas abajo del actual puente (*Figura 1*), el Nuevo Puente Pumarejo satisfará un doble propósito presente desde hace años en los planes de desarrollo nacionales de Colombia: por un lado la mejora de la comunicación entre Barranquilla y Santa Marta mediante la ampliación de la capacidad vial entre ambas ciudades; por otro, la habilitación del río Magdalena para la circulación fluvial de buques de gran calado merced a la eliminación del puente actual de Pumarejo, principal obstáculo existente para el tráfico naviero. La consecución de este segundo objetivo hará del río Magdalena, si no la principal, sí una de las más importantes vías de comunicación de Colombia al hacer accesible su interior a embarcaciones de gran capacidad procedentes del Caribe y del norte del país.



Figura 1. Vista del Puente Pumarejo actual

La plataforma verá notablemente ampliada la capacidad actual pasando del único carril en cada sentido del puente existente, a albergar hasta tres carriles por sentido con sendas ciclorutas laterales en el Nuevo Puente Pumarejo para satisfacer las estimaciones actuales de crecimiento del tráfico. Esto da lugar a un ancho del tablero extraordinario, variando desde los 35,1 m hasta los casi 40 m de su tramo central, dimensiones que aún no han sido alcanzadas por ninguna otra estructura en Colombia.

Asimismo, la ventana de paso requerida para los buques de gran calado previstos por la administración colombiana, supone la disposición de un vano central con un gálibo vertical de unos 40m y una distancia transversal libre de unos 300m. Con el objeto de que la rasante adquiriera esta altura sobre el futuro canal de navegación, se ha debido dotar a la estructura de una gran longitud a fin de cumplir las pendientes máximas prescritas por la normativa de trazado. A esto se une la condición adicional establecida por la administración de situar los estribos del puente fuera de la zona potencialmente inundable, por lo que la extensión final del viaducto resulta ser de 2173m divididos en tres tramos: 618m de accesos desde la margen izquierda; un tramo central atirantado de 800m; y los accesos en la margen derecha de unos 755m.

Para la ejecución de esta imponente obra resultó adjudicatario el Consorcio SES, liderado por SACYR, que estimó llevar a cabo una modificación del proyecto original [1] del consorcio Ecopuentes con el fin de adecuarlo a los hábitos constructivos del país. El cambio fundamental ha afectado principalmente al proceso constructivo del tablero, optando por la ejecución del cajón de hormigón *in situ* en lugar de la solución del proyecto original consistente en la utilización de dovelas

prefabricadas. Esta modificación de proceso constructivo tiene una gran incidencia tanto en la concepción estructural del tablero como en los detalles, lo que ha obligado a la redacción de un proyecto específico cuyo desarrollo y seguimiento ha realizado IDEAM para el consorcio SES.

Como ya se ha apuntado, las exigencias funcionales del nuevo proyecto demandan la demolición de la estructura existente, auténtico icono de la ciudad de Barranquilla y de Colombia que fue diseñado por el insigne ingeniero italiano Morandi. En cierta manera, el nuevo viaducto recibe en herencia de su predecesor también este carácter simbólico y representativo, lo que hace de la ejecución de esta obra no sólo un puente que se construye, sino también, un monumento que se erige.

2. Definición general de la estructura

2.1. Viaductos de acceso y ramales

Los viaductos de acceso del Nuevo Puente Pumarejo (descritos con más detalle en la referencia [2]) están formados por un cajón monocelular de hormigón pretensado de forma trapezoidal, de 3.65 m de canto, 16 m de ancho en su intersección con la losa superior y 12 m de base, muy similar al empleado en el tramo atirantado del puente. La anchura total de la sección transversal varía en función de la zona desde un máximo de 38.1 m hasta un mínimo de 35.1 m en la margen derecha y de 23.6 m en la margen izquierda. Los viaductos de acceso están formados por vanos tipo de 70 m, contruidos *in-situ* mediante cimbra autolanzable, con una longitud total de 618 m en la margen izquierda (58m+8x70m) y 755 m (55m+10x70m) en la margen derecha (*Figura 2 y Figura 3*). Las pilas tienen una sección hueca rectangular de hormigón armado, y cimentaciones pilotadas debido a la escasa capacidad portante del terreno en las cercanías del río Magdalena.

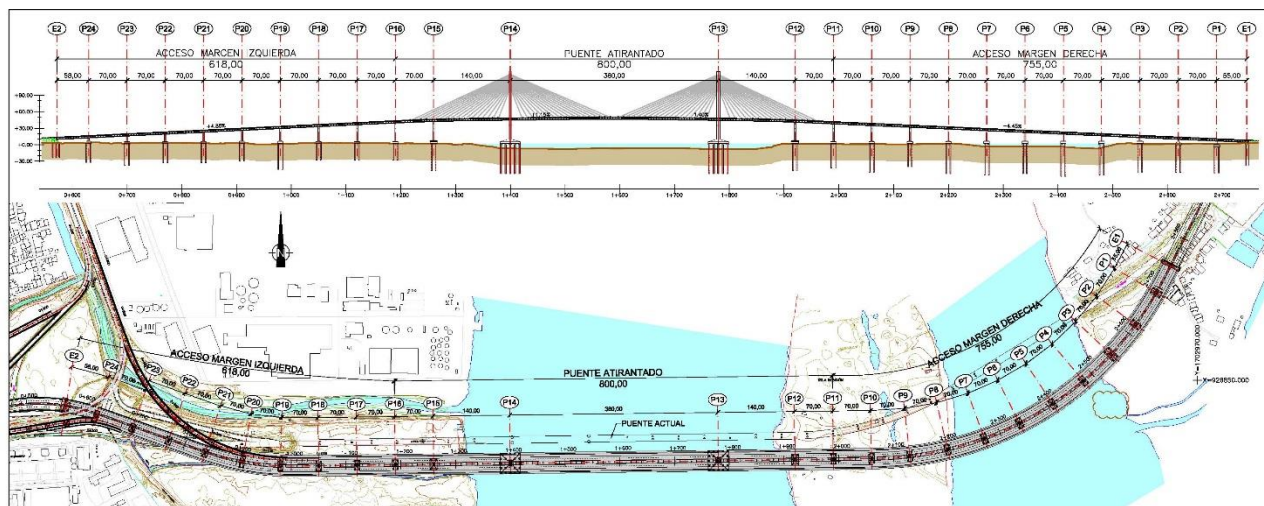


Figura 2. Alzado y planta del Nuevo Puente Pumarejo sobre el río Magdalena

El puente consta de dos ramales de acceso en la margen izquierda que permiten el acceso desde el puente directamente al importante puerto de Barranquilla. En ambos ramales se emplea una tipología de cajón monocelular de hormigón pretensado más convencional, con una sección transversal de anchura total tipo de 10.3 m. El ramal 1 se encuentra vinculado al puente principal y tiene una longitud total de 292.5 m, mientras que el ramal 2 resulta un puente independiente con una longitud total de 369.5 m y una curvatura en planta muy acusada (160 m de radio).



Figura 3. Foto aérea del puente en ejecución desde la margen derecha

2.2. Tramo atirantado

El tramo atirantado del Nuevo Puente Pumarejo, objeto de este artículo, abarca una longitud de 800 m, aproximadamente centrados en el brazo izquierdo que el río Magdalena forma a su paso por el puente. En dicha zona se situará el nuevo canal de navegación, cuyas necesidades de gálibo (300 m de gálibo horizontal y 40 m de gálibo vertical) constituyen el principal condicionante geométrico para el diseño del vano principal del puente. Ello conduce, a la definición de un vano central atirantado de 380 m de luz suspendido de dos pilonos de cerca de 125 m de altura, lo que permite salvar de forma holgada el gálibo horizontal requerido teniendo en cuenta las dimensiones de la cimentación de los pilonos. Los vanos de retenida tienen una luz de 140 m, lo que aporta una relación luz del vano principal/luz del vano de retenida de 0.37, proporcionando una rigidez adecuada al pilono. Los vanos de transición entre la zona atirantada y los viaductos de acceso se mantienen con la configuración tipo de 70 m. Por lo tanto, el puente atirantado presenta una configuración simétrica respecto al centro del vano principal, componiéndose por un total de cinco vanos de 70m+140m+380m+140m+70m (*Figura 4*).

El sistema de suspensión del vano principal tiene una configuración en semi-abanico simétrica respecto al eje de los pilonos. Está formado por un único plano de atirantamiento situado en el eje del tablero, compuesto por 17 parejas de tirantes de suspensión y otros tantos de retenida desde cada uno de los pilonos. Los tirantes se anclan en el punto medio de la sección transversal del tablero, manteniendo una separación longitudinal constante de 10 m entre parejas. El tablero se encuentra apoyado en los pilonos, lo que permite crear una ventana libre de tirantes de 45 m, 22.5 m hacia cada lado del eje de los pilonos. De esta forma, las parejas de tirantes más alejadas de los pilonos se anclan en el tablero a una distancia de 182.5 m.

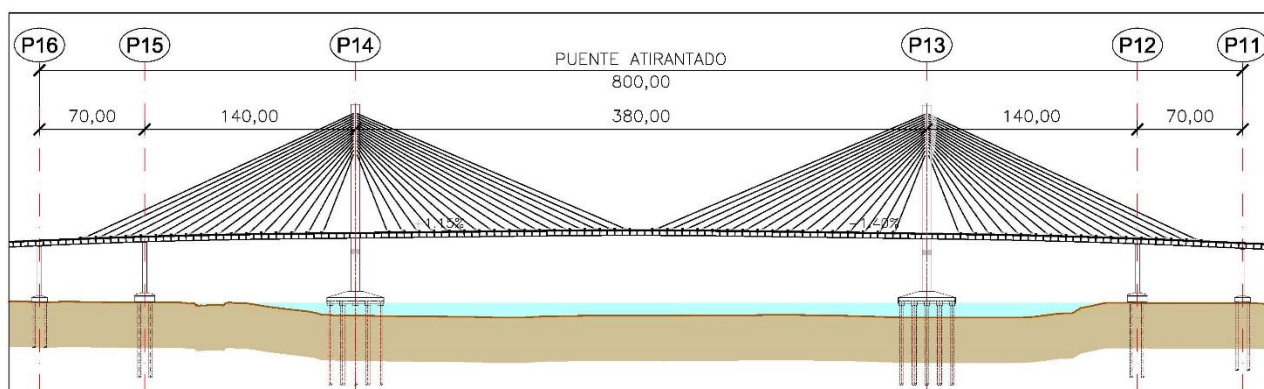


Figura 4. Alzado del tramo atirantado del Nuevo Puente Pumarejo

3. Descripción del tramo atirantado

3.1. Tablero

El tablero está formado por una sección cajón de hormigón de 3.65 m de canto, lo que resulta una relación luz del vano principal/canto de 104.1. El cajón de hormigón dispone de dos almas inclinadas 58° respecto a la horizontal, cubriendo una anchura entre almas igual a 12 m en la cara inferior del tablero y a aproximadamente 16 m en la cara superior del tablero.

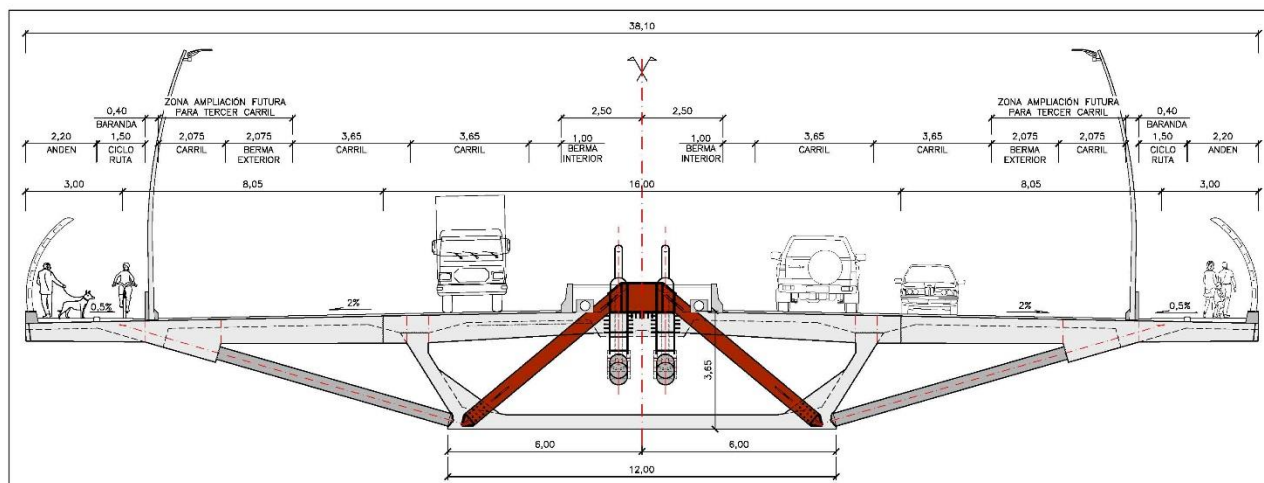


Figura 5. Sección transversal por costilla tipo con anclaje de tirantes

La anchura total de la plataforma en la zona del tramo atirantado es de 38.1 m, por lo que es necesario completar la sección con grandes voladizos de más de 11 m de longitud (*Figura 5*). Ello se consigue mediante la disposición de sendas costillas transversales cada 5 m, apoyadas a 3 m del borde del tablero en puntales exteriores al cajón, y en el eje del tablero en puntales interiores al mismo, que transmiten la carga vertical hasta la base de las almas de la sección. El sistema de apoyo de la losa superior se completa con tres vigas longitudinales, dos en el borde del tablero y una viga en el eje, coincidentes con la posición de inserción de los puntales exteriores e interiores en la costilla, respectivamente (*Figura 6*). De esta forma se consigue mantener un espesor de losa superior reducido en la mayor parte del tramo atirantado, igual a 0.25 m, aumentándolo únicamente en los 55 m adyacentes a los pilonos, debido a las elevadas compresiones que solicitan esta zona. Por su parte, el espesor del alma y de la losa inferior toman un valor mínimo de 0.40 m y de 0.25 m respectivamente en la mayor parte del tramo atirantado, aumentando su valor a 0.50 m y a 0.60m, respectivamente, en las zonas cercanas a los pilonos.

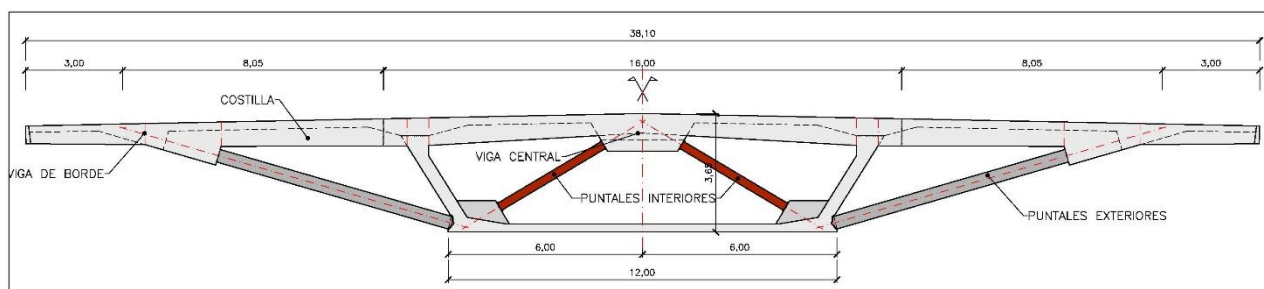


Figura 6. Sección transversal por costilla tipo sin anclaje de tirantes

Cuando el conjunto costilla+puntales coincide con el punto de anclaje de una de las parejas de tirantes en el tablero, los puntales interiores además de transmitir las cargas locales de la losa hasta la base del alma, deben transmitir la componente vertical del tiro de los tirantes. Por lo tanto, los

puntales interiores en estas secciones tienen un diseño específico, que permite transmitir la carga de la pareja de tirantes centrales a las almas mediante el trabajo exclusivamente a fuerza axial de los elementos involucrados, puntales interiores, losa superior y losa inferior (Figura 5).

El alto nivel de compresiones en el tablero, tanto debido al pretensado en los viaductos de acceso, como debido a las compresiones introducidas por la componente horizontal del sistema de atirantamiento en el tramo atirantado, ha llevado a elegir para el tablero un hormigón con una resistencia característica mínima de 50 MPa ($f'_c = 50$ MPa).

3.2. Pilonos

Los pilonos de atirantamiento están constituidos por un fuste único de 6 m de canto longitudinal y casi 125 m de altura, que atraviesa la sección transversal del tablero mediante una macia compleja que permite apoyar el tablero en el pilono y empotrarlo en transversal sin vincular los giros longitudinales de ambos elementos (Figura 7 y Figura 8). La transmisión de las fuerzas de los tirantes al pilono se realiza mediante un armario metálico conectado con pernos conectadores al mismo (Figura 7).

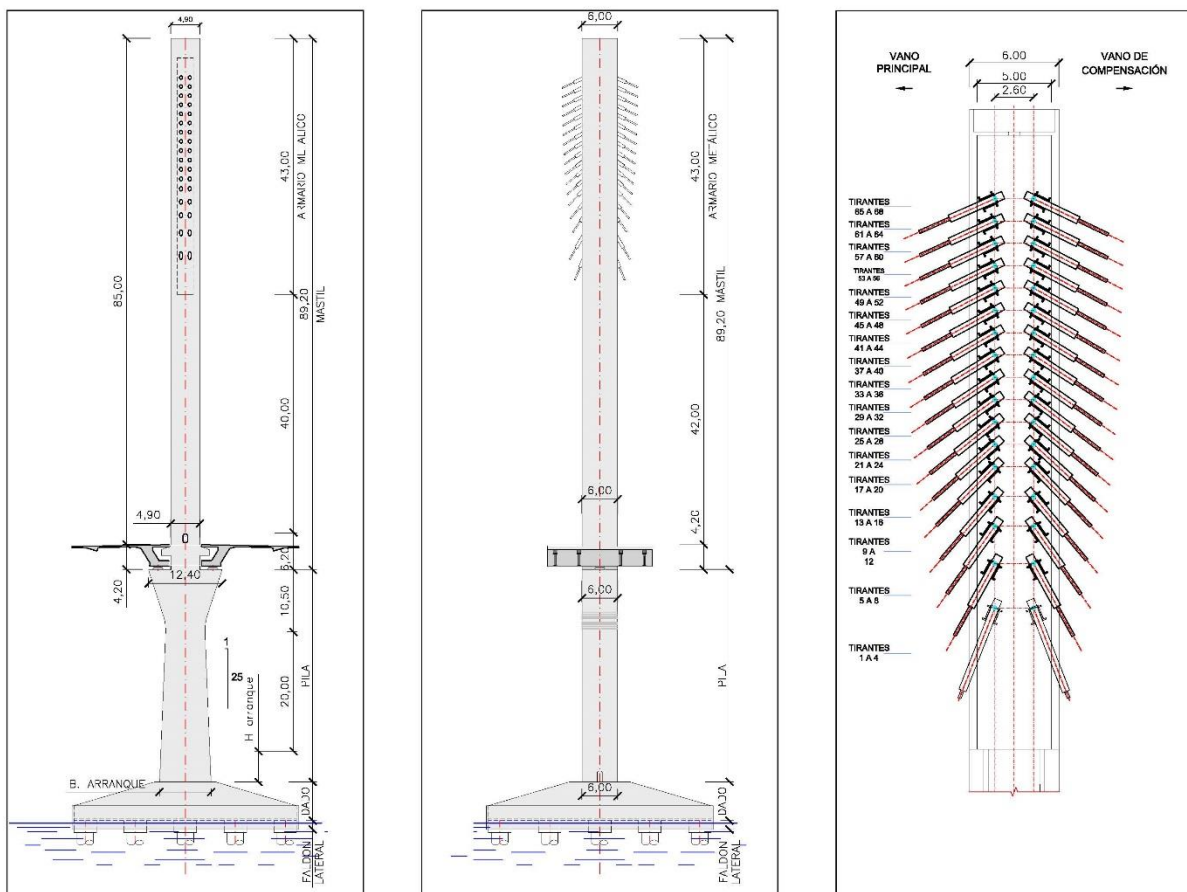


Figura 7. Alzado longitudinal y transversal de los pilonos, y detalle de anclaje de los tirantes mediante armario metálico

El pilono bajo tablero tiene una altura de aproximadamente 35 m, condicionada por el gálibo vertical requerido por el canal de navegación. Presenta una sección transversal rectangular hueca, con canto longitudinal constante de 6 m y canto transversal variable entre 8.85 m y 6.6 m. El cabecero en forma de palmera crece hasta los 12.4 m de anchura mediante una configuración formal muy similar a la del resto de las pilas de la estructura.

Por encima del tablero el mástil tiene una altura de casi 90 m (85 m desde la cara superior del tablero), y dimensiones constantes de 4.9 m en transversal y 6 m en longitudinal. La dimensión transversal del mástil viene fuertemente condicionada por la necesidad de disponer una mediana de la misma magnitud, lo que determina el ancho del tablero en la zona del tramo atirantado. Los tirantes se anclan en el mástil desde una altura de 51.5 m hasta una altura de 79 m por encima de la cara superior del tablero, lo que proporciona una relación aproximada altura del mástil/luz del vano principal de 0.17.

Los pilonos son los elementos más solicitados a compresión de todo el puente, y por lo tanto en ellos se ha optado por un hormigón de altas prestaciones, con una resistencia característica mínima de 60 MPa ($f'_c = 60$ MPa).

La macla producida entre el tablero y el pilono es uno de los elementos más complejos de todo el puente, dado que el elevado nivel de torsiones provenientes del tablero y la reducida cuantía de los esfuerzos de cortante han obligado a disponer apoyos invertidos en la base del mástil para evitar el levantamiento del tablero. La transmisión de esfuerzos del tablero a los apoyos del pilono se ha asegurado mediante un mamparo hueco especial que permitiera albergar el arranque del mástil en su seno (Figura 8).

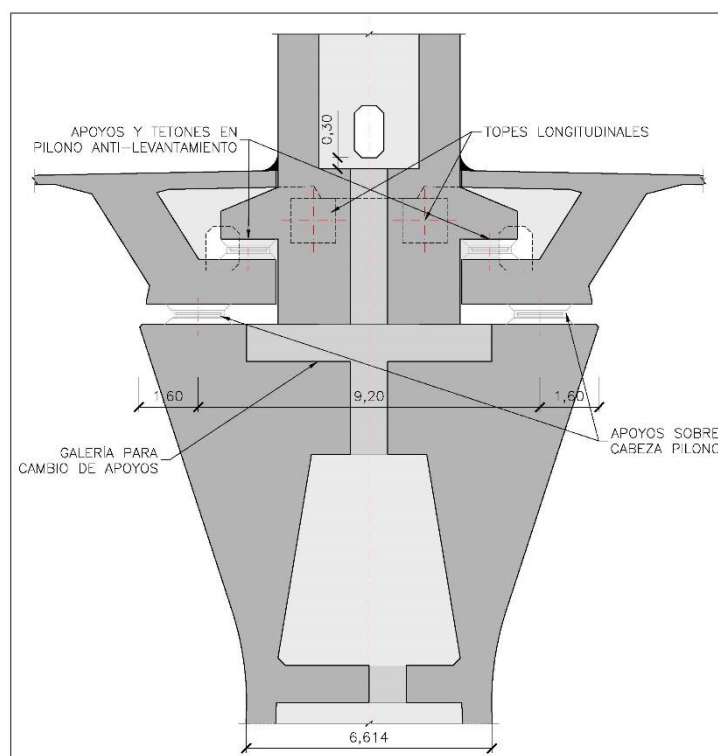


Figura 8. Sección transversal de la macla entre pilono y tablero por el eje del pilono

La cimentación del pilono es profunda, compuesta por un encepado cuadrado de casi 40 m de lado y 20 pilotes de 2.8 m de diámetro (Figura 9). La longitud libre de los pilotes hasta el lecho del río es de aproximadamente 15 m, y debido a su posición en el cauce del río se ha requerido la utilización de medios marítimos para su ejecución, lo que ha complicado notablemente dicha labor [1]. El encepado se sitúa a la altura correspondiente al nivel de la lámina de agua del río Magdalena con un periodo de retorno de 2 años, y protege al pilono del impacto de las embarcaciones que circularán por el río tras la eliminación del Puente Pumarejo actual.



Figura 9. Derecha: cimentación del pilono P14 en ejecución

3.3. Pilas de retenida

Las pilas de retenida están concebidas como pilas convencionales, si bien reciben unas cargas verticales durante las fases de explotación del puente muy inferiores, que pueden llegar a ser de levantamiento en muchos casos, pues las pilas de retenida constituyen el principal punto de anclaje de la punta de los pilonos. La materialización de la retenida se ha resuelto mediante una solución muy habitual en los puentes atirantados modernos, que consiste en el anclaje mediante pretensado vertical del tablero a la pila de retenida (*Figura 10*).

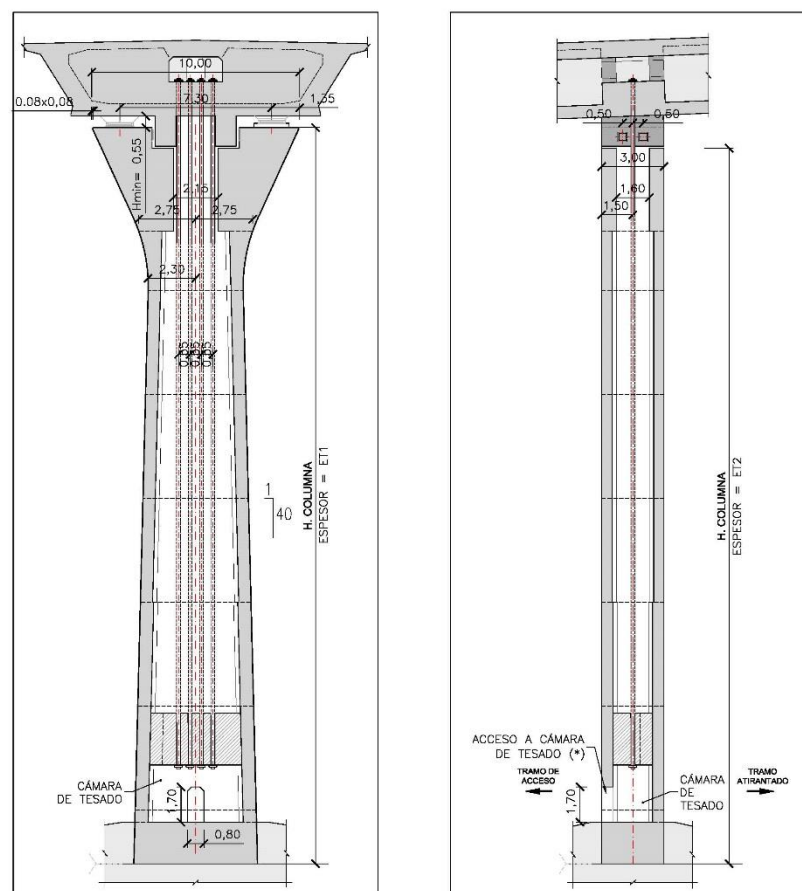


Figura 10. Sección transversal y longitudinal de las pilas de retenida

4. Proceso constructivo

El proceso constructivo del Nuevo Puente Pumarejo se enfrenta a varios retos, de los cuales el más importante resulta sin duda el trabajo en y sobre el cauce del río Magdalena, lo que obliga a la ejecución de pilotes mediante medios marítimos, el hormigonado de los encepados desde pontonas etc... Los medios auxiliares y los procesos de ejecución adoptados para salvar los citados inconvenientes se desarrollan en [1].

La ejecución del tablero del Nuevo Puente Pumarejo se lleva a cabo mediante tres métodos diferentes, adaptados a los requisitos del tablero en cada zona: ejecución *in-situ* y ejecución vano a vano mediante cimbra autolanzable en los viaductos de acceso, y ejecución vano a vano mediante cimbra autolanzable y construcción mediante avance por voladizos sucesivos en el tramo atirantado.

El tablero comienza a ejecutarse por la margen izquierda, mediante la ejecución *in-situ* del vano E2-P24 y 15 m del siguiente vano (situación de ejecución del tablero en el momento de redacción de este artículo). En este punto arranca la ejecución vano a vano del tablero mediante cimbra autolanzable [2], hasta 15 m por delante de la pila P16. En dicho momento la cimbra se desmonta y se lleva al vano 2 de la margen derecha, tras la ejecución *in-situ* de los vanos E1-P1 y P1-P2, desde donde se repite la construcción vano a vano del tablero hasta superar en 15 m la pila P11. (Figura 11).

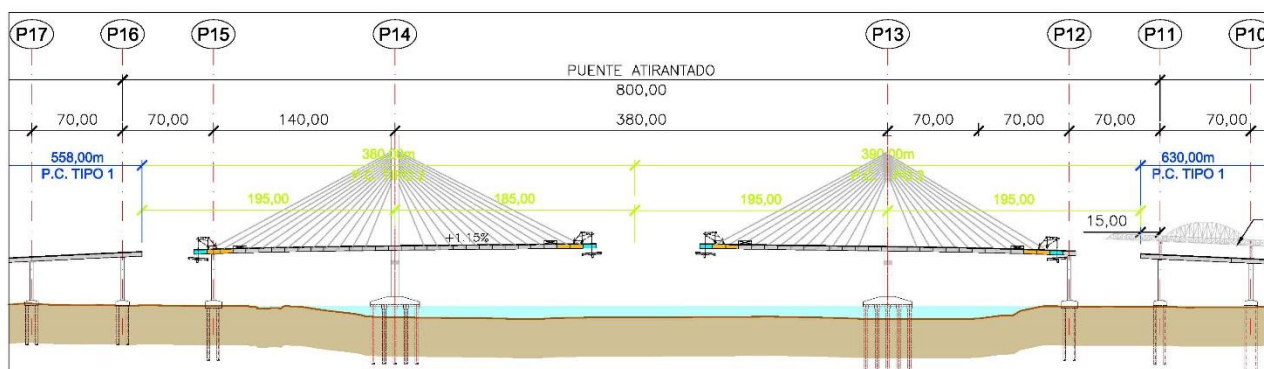


Figura 11. Proceso constructivo del tramo atirantado del Nuevo Puente de Pumarejo

De forma simultánea a la ejecución mediante cimbra autolanzable y una vez alcanzados los pilonos la cota del tablero, se comienza la ejecución de los 185 m de tablero en torno a los pilonos mediante avance por voladizos sucesivos de forma simétrica respecto al eje de los pilonos. Se emplean dovelas de 10 m de longitud y unas 500 t de peso, lo que sitúa a este puente a la vanguardia mundial de este tipo de construcción. Una vez completada esta fase, la construcción mediante avance por voladizos sucesivos se completa con la ejecución de las dovelas de cierre con los viaductos de acceso primero, y la ejecución de la dovela de cierre del vano principal después (Figura 11).

Es importante señalar que la importancia del peso de la sección ha obligado a plantear la ejecución de la sección transversal de forma evolutiva, lo que permite no sobredimensionar y encarecer los medios auxiliares de forma innecesaria. Así, la sección transversal en la zona ejecutada mediante cimbra autolanzable se completa en tres fases: sección en "U", losa superior entre almas, y voladizos. En la zona ejecutada mediante avance por voladizos sucesivos, la sección transversal se completa en dos únicas fases: sección cajón sin voladizos, y voladizos. En el primer caso, las dos primeras fases se ejecutan mediante la cimbra autolanzable, mientras que los voladizos se ejecutan mediante carro de voladizos de 15 m de longitud, dos vanos por detrás de la ejecución del

cajón. En el segundo caso, la ejecución de los voladizos se plantea mediante carro de voladizos de 10 m de longitud, 2 dovelas por detrás de la ejecución de la sección cajón.

En la zona ejecutada mediante carro de avance por voladizos sucesivos, ha sido necesaria la consideración de la situación accidental de caída del carro. Durante las primeras fases de redacción del proyecto constructivo y en línea con las recomendaciones del SETRA [3] para la construcción mediante carro de avance, se planteó que dicha situación accidental se estudiara únicamente en los dos supuestos siguientes: caída del carro durante las fases de avance (≈ 150 t), o de la dovela en ejecución durante las fases de hormigonado (≈ 500 t).

Sin embargo la propiedad, a través de la Interventoría del nuevo Puente Pumarejo sobre el río Magdalena, consideró conveniente tener en cuenta también la situación de caída del carro durante las fases de hormigonado (≈ 150 t+ 500 t= 650 t), decisión que ha condicionado completamente el armado pasivo a disponer en la losa inferior de la sección.

5. Principales participantes en el proyecto y obra

Propiedad: Ministerio de Transporte de la República de Colombia (Instituto Nacional de Vías).

Empresa Constructora: Consorcio SES

Director del proyecto: Juan Pablo Durán; Jefe de oficina técnica: David Ordín; Especialista estructural: David Ruiz

Servicios Técnicos: SACYR S.A.

Raquel Caballero, Rüdiger Spengler, Agustín Redero, Rafael Guillén, Fátima Calderón, Jorge Cañizal.

Proyecto Constructivo Modificado: IDEAM S.A.

Francisco Millanes, Miguel Ortega, Enrique Bordó, Fernando Ruano, Ildefonso de la Cruz, Jokin Ugarte, Jorge Miguel Montero, Maria João Freitas, Guillem Collell.

Asistencia Técnica especializada durante la ejecución de las obras: IDEAM S.A.

Francisco Millanes, Miguel Ortega, Enrique Bordó, Fernando Ruano, Ildefonso de la Cruz, Jokin Ugarte, Jorge Miguel Montero, Maria João Freitas, José María Hernández, Alberto Suz, Guillem Collell.

Referencias

- [1] J.Durán, R. Spengler, D.Ordín, A. Redero, D.Ruiz, R.Guillén, R.Caballero, F. Calderon, Adecuación proceso constructivo del nuevo puente atirantado de Pumarejo en Barranquilla, Colombia., VII Congreso de ACHE, La Coruña, 2017
- [2] F. Millanes, M. Ortega, F. Ruano, I. de la Cruz, J. Ugarte, J. P. Durán, D. Ordín, El proyecto constructivo de los vanos de acceso del Nuevo Puente Pumarejo en Barranquilla, Colombia, VII Congrso de ACHE, La Coruña, 2017
- [3] Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes, Haubans. Recommendations de la commission interministérielle de la précontrainte, Ministère de l'Équipement des Transports et du Logement, Bagneux Cedex, 2001.