

El proyecto constructivo de los vanos de acceso del Nuevo Puente Pumarejo en Barranquilla, Colombia

*Detailed design of the approaches viaducts 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

Ildefonso de la CRUZ HEBRERO

Ingeniero de Caminos
IDEAM S.A.
Jefe de proyectos
ildefonso.delacruz@ideam.es

Juan Pablo DURÁN RUIZ

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

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

RESUMEN

El Nuevo Puente de Pumarejo en Barranquilla es una de las obras en curso más relevantes en Sudamérica. Aparte de su tramo central atirantado, el puente consta de sendos viaductos de acceso de 618 m y 755 m de longitud y ancho variable entre 35,1 m y 41 m, que se resuelven mediante una estructura continua con vanos tipo de 70 m. La sección del tablero está conformada por un cajón de hormigón con grandes voladizos laterales apuntalados por jabalcones prefabricados. Las extraordinarias dimensiones de este viaducto requiere el recurso a medios auxiliares constructivos, autocimbra y carro de alas, fuera del orden de magnitud habitual.

ABSTRACT

The New Pumarejo Bridge in Barranquilla is one of the most significant ongoing construction works in South America. Besides the main central cable-stayed zone, the bridge comprises two approach viaducts, with a length of 618 m and 755 m and width varying from 35,1 m to 41 m, which are made up of a continuous structure with typical spans 70 m long. The deck cross-section consists of a single-cell concrete box girder with large slab cantilevers supported on precast concrete struts. Due to the remarkable dimensions of this structure, exceptional temporary construction equipment is

required, such as the movable scaffolding system for the construction of the box girder and the wings construction.

PALABRAS CLAVE: autocimbra, sismo, cajón pretensado, pretensado transversal

KEYWORDS: movable scaffolding system, seism, prestressed concrete box, transverse prestress

1. Introducción

Situado a unos 12 km de la desembocadura del río Magdalena, y a escasos 30 m aguas abajo del actual puente (*Figura 1*), el Nuevo Puente de 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 existente de Pumarejo

En consecuencia, la fisionomía de la nueva estructura estará esencialmente determinada tanto por los requisitos geométricos exigidos por los referidos objetivos, como por la dificultad que ya de por sí conlleva el franquear un río de las dimensiones del Magdalena. Así, la plataforma verá notablemente ampliada la capacidad del puente existente, con dos carriles, y pasará a albergar hasta seis carriles con dos ciclorutas laterales en orden a 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 en ciertas zonas, 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 40 m y una distancia transversal libre de unos 300 m.

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 unos 2173 m divididos en tres tramos: 618 m de accesos desde la margen izquierda; un tramo central atirantado de 800 m; y los accesos en la margen derecha de unos 755 m.

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" con autocimbra, en lugar de la solución del proyecto original consistente en la utilización de dovelas prefabricadas que se montaban vano a vano. 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 sido realizado por 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. Descripción general de la estructura

La nueva estructura se situará a escasos 30 m del puente que pretende sustituir, en una bifurcación localizada del Magdalena, en la que el río se abre en dos brazos rodeando una isla sedimentaria central (isla Rondón) (*Figura 2*). Este enclave presenta ciertas ventajas que probablemente motivaron el emplazamiento del antiguo puente, como la posibilidad de disponer algunas pilas en la zona de la isla, o la menor profundidad relativa del brazo derecho del río.



Figura 2 Vista aérea del emplazamiento del Nuevo Puente de Pumarejo

El brazo izquierdo constituye el lugar idóneo para la ubicación del canal de navegación ya que, merced a su mayor profundidad, permite el paso de embarcaciones de gran calado. Sobre él volará el tramo atirantado del puente que, con un vano central de 380 m y sendos vanos laterales de 140 m, alcanza una longitud total de 800 m (la descripción detallada de este tramo se puede consultar en [2]).

En la margen derecha, hasta llegar a la zona del atirantado, el tramo de accesos tiene una longitud de 755 m repartidos en vanos homogéneos de 70 m con un vano de compensación de 55 m. Presenta esta zona un trazado en planta inicialmente curvo ($R=595$ m) hasta volverse recto en las inmediaciones del atirantado (*Figura 3* y *Figura 4*).

En la margen izquierda, el puente mantiene su configuración de vanos tipo de 70 m en su salida del atirantado, adquiriendo en su parte final forma arborescente al tener que subdividirse, por exigencias del trazado, en tres estructuras: un ramal norte que deriva el tráfico desde Sta. Marta a Puerto; un ramal Sur que recoge la circulación de Puerto a Sta. Marta; y un ramal central con dirección Barranquilla-Sta. Marta (*Figura 3* y *Figura 4*).

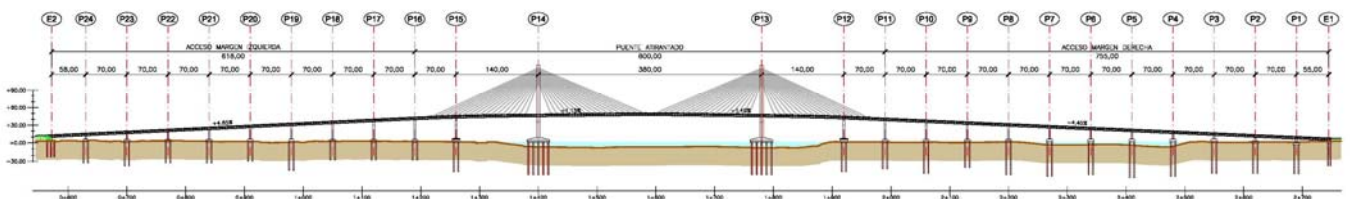


Figura 3 Alzado general de la estructura del Nuevo Puente de Pumarejo

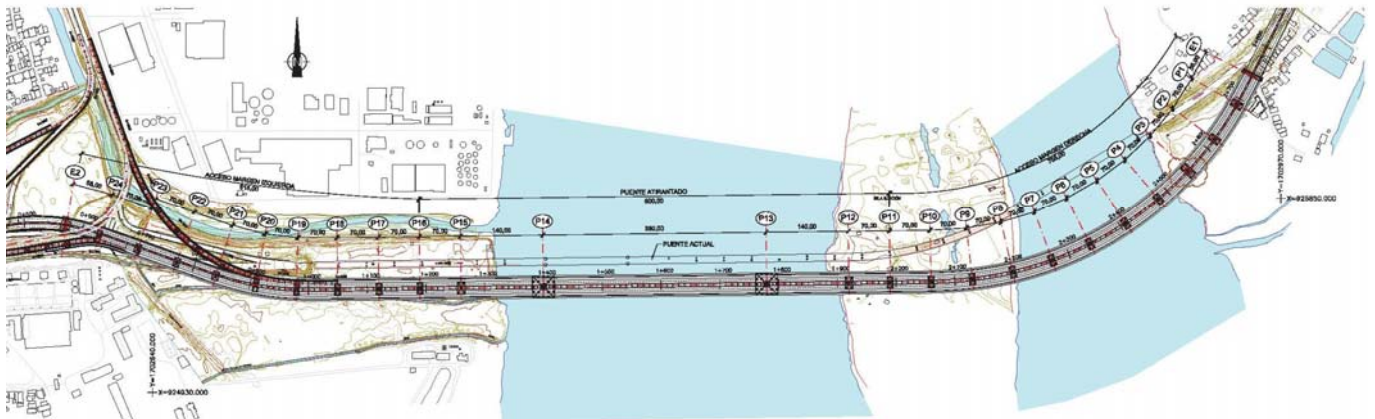


Figura 4 Planta general de la estructura del Nuevo Puente de Pumarejo

Estas estructuras de los ramales, si bien pueden parecer secundarias en comparación con el puente principal, tienen una envergadura considerable (*Figura 5*). Así, el ramal norte, de 10,3 m de ancho y una longitud de 292,5 m repartida en 6 vanos (38 m+47,5 m+47,5 m+47,5 m+50 m+62 m), permite salvar el Caño Ahuyama, rivera que, desde Barranquilla, afluye al Magdalena por la izquierda. Por su lado, el ramal sur (*Figura 5* y *Figura 6*), con 9 vanos, adquiere una longitud de 369,475 m en trazado curvo de $R=80$ m.

Es de reseñar que la vinculación de los ramales al puente principal ha dado lugar a entronques relativamente complejos, que han requerido de un estudio pormenorizado tanto desde el punto de vista geométrico como estructural.

Completan el conjunto estructural del Nuevo Pumarejo tres pasarelas, de 64 m, 148 m y 281,5 m para el tránsito de peatones y de bicicletas.

Con la salvedad de las pasarelas y del ramal Sur, el conjunto de Pumarejo (accesos margen derecha, atirantado, accesos en margen izquierda y ramal norte) constituye una macroestructura continua con juntas únicamente en los estribos extremos. En fase de servicio, el puente se halla retenido por los pilonos del atirantado, de suerte que el punto fijo estructural se encuentra

aproximadamente en el centro del viaducto haciendo que los desplazamientos en las juntas extremas sean mínimos.



Figura 5. Planta general de los ramales



Figura 6. Vano del ramal Puerto-Santa Marta en construcción

3. Tablero de los vanos de acceso

3.1 Descripción

El tablero de los vanos de acceso presenta una sección cajón de hormigón de 3.65 m de canto, lo que, para el vano tipo de 70 m, supone una relación canto-luz de 1/19 y se ejecutarán mediante autocimbra. Como se ha mencionado anteriormente, el ancho de la estructura queda fuera del rango habitual de la tipología cajón simple, llegando en las proximidades de los vanos atirantados a un ancho total de 38.10 m. Las dos almas, inclinadas 58°, respecto a la horizontal, cubren una anchura entre las mismas de 12 m, en la losa inferior del tablero, y de aproximadamente 16 m en la losa superior, de modo que el ancho restante del tablero se compone de dos voladizos de aproximadamente 11 m, a ambos lados del cajón.

Estas longitudes de voladizo se materializan mediante la disposición de costillas transversales cada 5 m, apoyadas sobre puntales exteriores e interiores. Los puntales exteriores consisten en elementos de hormigón prefabricado, de sección rectangular, que permiten apoyar las costillas mencionadas a 3 m del extremo del tablero, transmitiendo la carga vertical a la base de las almas.

La conexión de estos puntales a las almas permite el giro de éstos mediante un detalle de tipo rótula. Los puntales interiores son secciones metálicas, y apoyan las costillas en el eje de simetría del cajón. Asimismo, la sección consta de tres vigas longitudinales, coincidentes con los puntos de inserción de los puntales interiores y exteriores, que permiten limitar el espesor de la losa superior a 0.25 m. El espesor de las almas y de la losa inferior varía de 0.525 m y 0.25 m respectivamente en centro de vano, a 0.90 m y 0.60 m, respectivamente, en la región de pila.

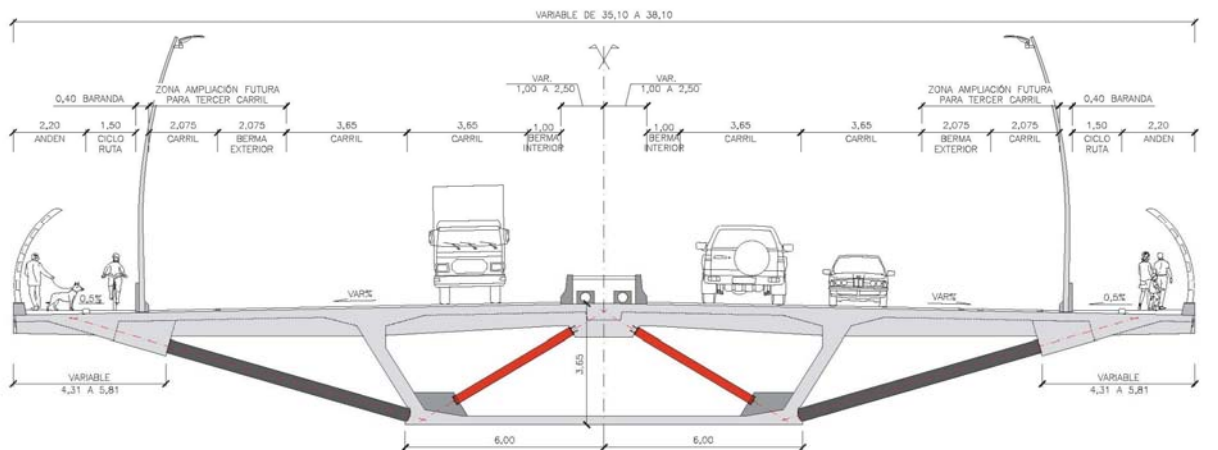


Figura 7. Sección transversal tipo en los vanos de acceso

El apoyo del tablero sobre las pilas en viaductos de acceso se realiza por medio de aparatos esféricos, disponiéndose un apoyo libre y otro guiado en cada pila, separados 7.30 m entre sí.

En lo referente al pretensado longitudinal del tablero, se presentan tres familias de cables interiores al hormigón. La primera familia de cables (cables CP) presentan un trazado parabólico que discurre por el interior de las amas del cajón, y consta de un total de ocho unidades de 31 torones de 0.6 pulgadas, por alma. La segunda familia (cables CI), constituyen cables de refuerzo de la losa inferior en la región de centro de vano, de trazado recto, y está formada por unidades de 22 torones de 0.6 pulgadas. Una tercera familia (cables CS) refuerza la losa superior en las regiones de pila, y consiste en unidades de 27 torones de 0.6 pulgadas, de trazado recto. Además del pretensado longitudinal del tablero, se disponen unidades de pretensado transversal en todas las costillas transversales, de trazado parabólico, consistentes en 2 unidades de 14 torones de 0.6" por costilla.

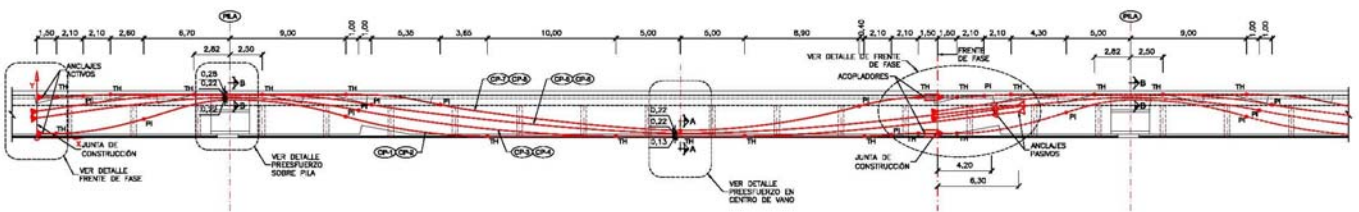


Figura 8. Pretensado parabólico tipo en los vanos de acceso

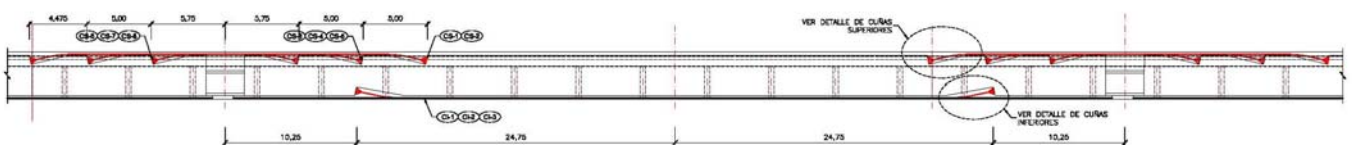


Figura 9. Pretensado recto tipo en los vanos de acceso

3.2 Proceso constructivo del tablero en los vanos de acceso

En lo relativo al proceso constructivo del tablero anteriormente descrito, es necesario llevar a cabo dos procedimientos diferentes en función de los requisitos específicos de cada emplazamiento en la obra: ejecución mediante cimbra convencional, y construcción mediante autocimbra.

Dada la complejidad que presenta el primer vano de la Margen Izquierda, con la presencia del entronque de ramales, el tramo comprendido entre el estribo E2 y la pila P24, e incluyendo una longitud de 15m del vano siguiente, se construyen mediante una cimbra "convencional" directamente apoyada sobre el terreno.

Tras la ejecución de este primer segmento de la Margen Izquierda, se procede a ejecutar el resto de vanos de la margen izquierda mediante autocimbra superior, en fases de 70m de longitud que se extienden 15m más allá de cada pila. La autocimbra prevista es superior al tablero, es decir, se apoya directamente sobre el tablero ya construido y la dovela cero de la fase siguiente a ejecutar (ver ref. [1])

Dado el peso considerable del tablero, y con el objetivo de limitar los medios auxiliares a disponer, se plantea una ejecución del cajón en subfases, de modo que, en una primera fase se construyen la losa inferior y almas, y posteriormente, se ejecuta la losa superior entre almas. Para cada una de estas fases es preciso tesar una serie de cables de pretensado del tablero, limitando así las tensiones del tablero y la fisuración durante la fase constructiva. Una vez ejecutado el cajón, incluyendo la sección en U, más la losa superior central, y tesados los cables correspondientes, se procede al avance de la autocimbra. La ejecución de los voladizos se materializa en fases posteriores, mediante un carro de alas de 10 m, que avanza dos vanos por detrás de la autocimbra.

El avance mediante autocimbra según el procedimiento descrito se extiende en la Margen Izquierda hasta 15 m por delante de la pila P16. Posteriormente, ésta se desmonta y se lleva al estribo E1 de la Margen Derecha, donde la cadencia de avance prosigue hasta superar 15 m la pila P11 del tramo atirantado.

En lo referente al dimensionamiento del tablero, se han seguido los preceptos de la normativa CCP-14 ([4]). En concreto, el dimensionamiento del pretensado para fases de explotación viene condicionado por los límites tensionales establecidos para combinaciones en Estado Límite de Servicio, que resultan significativamente más restrictivos que los establecidos por la normativa española equivalente. Así, el límite de tracción en el hormigón para el Estado Límite de Servicio III (que incluye un 80% de la sobrecarga), es de $0.25 \cdot \sqrt{f_c}$, aproximadamente un 40% de la resistencia característica a tracción del hormigón.

Además del estudio de la estructura en fase terminada, se ha efectuado una verificación del tablero en fases constructivas, teniendo en cuenta la evolución de la sección resistente de hormigón, (U, cajón, sección total), así como el tesado de las unidades de pretensado correspondientes a cada una de las fases. Para ello, mediante el uso de un modelo evolutivo, se ha llevado a cabo un control tensional fase a fase, según la normativa colombiana, realizándose asimismo verificaciones de la apertura de fisura de hormigón en aquellas fases que originan tracciones significativas, limitando esta apertura de fisura en fase provisional a 0.20 mm.

4 Cimentaciones y subestructura de los viaductos de acceso

La escasa capacidad portante de los suelos superiores en el emplazamiento del puente, ha obligado a recurrir a cimentaciones profundas con pilotes hormigonados “in situ” con diámetros tipo de 2.0 m en los accesos, y de 1.30 m en los ramales. Estos pilotes adquieren una profundidad variable entre 35 m y 55 m, según su ubicación en la traza del puente, hasta alcanzar el estrato de la roca coralina subyacente.

En los tramos en los que el puente responde al patrón tipo de luces de 70 m y ancho entre 35.1 m y 38.1 m, el número de pilotes por encepado es de seis; si bien, en algunas pilas, en las que las características geotécnicas del suelo son peores o las cargas transmitidas a la subestructura son superiores a la de los vanos convencionales, hay hasta ocho pilotes. Tal es el caso de las cimentaciones situadas en la margen derecha o en los puntos de entronques de los ramales en el puente principal.

El diseño de las cimentaciones ubicadas en agua (*Figura 10*), donde los pilotes se ejecutan con camisa metálica, ha debido tener en cuenta tanto la posible socavación del lecho fluvial hasta el nivel de la roca coralina subyacente, como el caso accidental del impacto de una embarcación. La consideración de ambos fenómenos, amén de las solicitaciones convencionales de las situaciones de servicio y sismo, ha dado lugar a pilotes fuertemente armados. Asimismo, en el empotramiento de los pilotes a los encepados de estas pilas en agua, se ha dispuesto un dado de hormigón para evitar el impacto directo de la embarcación sobre los pilotes y transmitir su fuerza al conjunto del encepado.

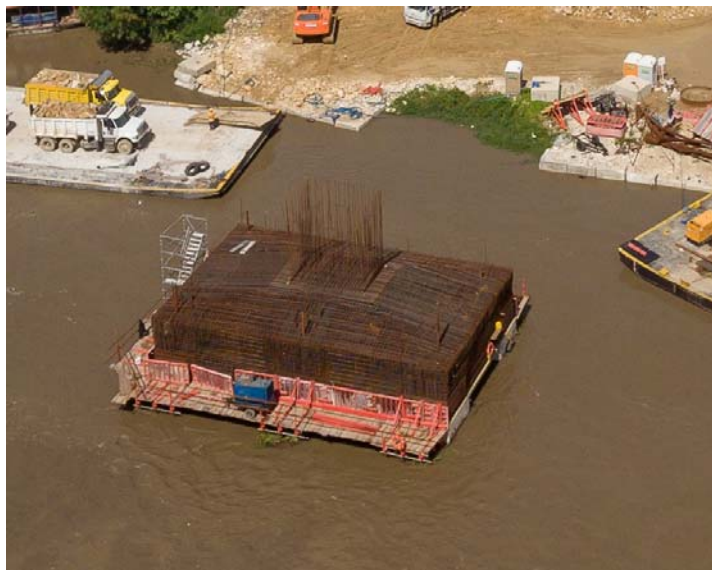


Figura 10. Cimentación ejecutada en agua

El fuste de las pilas de los viaductos de acceso (*Figura 11*), que presenta sección rectangular hueca con espesores de tabla entre 0.40 m y 0.60 m, mantiene la dimensión longitudinal constante (3 m), mientras que su anchura es variable disminuyendo con pendiente constante desde la base hasta el cabecero.



Figura 11. Alzado de fuste y capitel de las pilas de los vanos de acceso. Fustes pilas ejecutadas.

El capitel superior, con forma de palmera, se abre en su dimensión transversal desde los 4.6 m en su inserción en el fuste, hasta los 10.0 m superiores por medio de una transición circular en cada una de las caras laterales. Presenta una acanaladura central para acoger el tope sísmico que descuelga del mamparo del tablero. La longitud de este tope, 3.0 m, está dimensionada para asegurar la transmisión de la fuerza transversal sísmica para el amplio rango de movimientos del tablero. Al efecto, se han dispuesto apoyos de neopreno teflón en el paramento vertical interno de la acanaladura que recibirían el eventual impacto sísmico.

Cabe reseñar que el diseño de la subestructura ha venido gobernado en gran medida por la acción sísmica ya que, si bien el espectro es moderado ($PGA=0.15$ para un período de retorno de $T=1000$ años), la masa por metro lineal de un tablero de estas dimensiones (unas 60T/m) es ciertamente considerable.

Esta fuerza sísmica es retenida en dirección transversal en cada una de las pilas al hallarse vinculado el tablero a los cabeceros por medio del tetón anteriormente descrito. En dirección longitudinal la acción sísmica se resiste principalmente por los pilonos del tramo atirantado [2]. Debido a una geometría en planta marcadamente curva en la margen derecha, las pilas ubicadas en esta zona ven magnificada la acción sísmica que soportan, al tener que resistir parte de la componente longitudinal del sismo global del tablero.

En este sentido, se ha realizado un dimensionamiento sísmico basado en desplazamientos, aplicando en el diseño de los distintos elementos los criterios de cálculo por capacidad contemplados en la LFRD AASHTO SEISMIC DESIGN 2011 (ver referencia [3]). A tal efecto, se han dispuesto los preceptivos detalles de confinamiento en las zonas susceptibles de rotulación plástica, esencialmente bases de columnas, y se han protegido los elementos adyacentes mediante la aplicación de los correspondientes factores de sobre-resistencia consignados por la normativa.

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, Ildfonso 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, Ildfonso 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, E. Bordó, F. Ruano, J. Ugarte, J.P. Durán, D. Ordín, El proyecto constructivo del tramo atirantado del Nuevo Puente Pumarejo en Barranquilla, Colombia, VII Congrso de ACHE, La Coruña, 2017
- [3] AASHTO Guide Specifications for LRFD Seismic Bridge Design 2011
- [4] Norma Colombiana de Diseño de Puentes. LRFD CCP 14.