

Anteproyecto, Proyecto Constructivo y Construcción del puente sobre el lago Guaíba en Porto Alegre. Brasil

Preliminary Design, Detailed Design and Construction of the Bridge over the Guaíba Lake in Porto Alegre. Brasil

Celso Iglesias^{*, a}, Sara Fernández^b, José Manuel Domínguez^c, Eduardo Nagao^d

Fernando Stucchi^e, Francisco Blancas^f, Michel Rossi^g

^a Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Carlos Fernández Casado S.L. Madrid

^{b, c} Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Carlos Fernández Casado S.L. Madrid

^d Ingeniero Civil. ENGEVIX

^{e, f} Ingeniero Civil. EGT Engenharia

^g Ingeniero Civil Queiroz Galvão, Brasil

RESUMEN

El nuevo puente sobre el lago Guaíba conecta la región metropolitana de Porto Alegre con las regiones sur y oeste del estado de Rio Grande del Sur, ruta de conexión Brasil-Mercosur. En la solución de referencia desarrollada para la Propiedad para el concurso del tipo diseño y construcción, el tramo principal se resolvía con una solución novedosa de puente extradosado del tipo aleta dorsal. El grupo ganador propuso una variante que fue construida de tablero de canto variable con vuelos laterales sobre puntales realizado con dovelas prefabricadas. Los accesos se resuelven maximizando el uso de prefabricados tanto con un tablero de vigas como los elementos de la subestructura y cimentaciones.

ABSTRACT

The new bridge over the Guaíba Lake connects the metropolitan region of Porto Alegre with the southern and western regions of the state of Rio Grande do Sul, Brazil-Mercosur connection route. The reference design developed for the Authorities established an innovative solution for the main bridge by means of an fin-back type extradosed bridge. The consortium awarded with the contract proposed an alternative design with a variable depth box section girder built with precast segments. The access viaducts are also fully precast, including girders, piers and foundations.

PALABRAS CLAVE: Extradosado, aleta dorsal, viga prefabricada, dovela prefabricada, pila prefabricada, voladizos sucesivos

KEYWORDS: Fin-back extradosed bridge, precast girder, precast segment, precast pier, precast foundation, cantilever

() In-memoriam de Celso Iglesias Pérez (1963-2017)*

1. Introducción

El nuevo puente sobre el lago Guaíba conecta la región metropolitana de Porto Alegre con las regiones sur y oeste del estado de Rio Grande del Sur, ruta de conexión Brasil-Mercosur.

Las bases de diseño establecían dos estrictas limitaciones principales: necesidad de un amplio canal de navegación (cota intradós +45 m, abertura canal 143 m) y presencia del cono de aproximación al aeropuerto (cota máxima no superable +59 m).

CFC-ENGEVIX, adjudicataria del anteproyecto de referencia para el concurso posterior de diseño y construcción, desarrollando el estudio del puente principal sobre el canal de navegación -basado en una solución singular de puente extradadosado del tipo aleta dorsal (*fin-back*)- y de los accesos y ramales -con tableros de vigas prefabricadas- hasta sumar 7 km de estructuras.

El proyecto de referencia sirvió de base para un concurso del tipo diseño y construcción que fue ganado por el grupo QUEIROZ GALVAO con EGT-Engenharia como diseñadores, el cual propuso una solución alternativa para el puente principal con una solución de tablero de canto de variable construido con dovelas prefabricadas por avance en voladizos.

CFC colaboró con EGT en la fase de desarrollo del proyecto de detalle, elaborando en este caso los estudios de las soluciones modificadas previstas para los viaductos de acceso en los que se emplean elementos también vigas prefabricadas -pero con una configuración distinta- y también se maximiza el uso de prefabricados en el resto de elementos de la subestructura y cimentaciones.

2. Proyecto de referencia

El conjunto del puente constaba, además del puente principal de 575 m, con 5 vanos $73 + 143 \times 3 + 73$ m, de vanos acceso a ambos lados contabilizando 32 vanos de 41 m, y diversos nudos en el lado de Portoalegre para contabilizar un total de 7 km de estructuras.

2.1. Puente principal

Lo más singular de este proyecto era la solución propuesta para el puente principal. Debido a las limitaciones que imponía la navegación aérea y marítima, era imperativo minimizar la ocupación del tablero. Se recurrió por ello a solución extradadosada en aleta dorsal con un tablero en sección cajón de hormigón pretensado.



Figura 1. Infografía del tramo en aleta dorsal de la solución de referencia

De esta manera, al colocar parte del elemento resistente principal -la aleta- por encima de la plataforma, se evitaba levantar la rasante y se podía disponer una sección cajón de canto constante a lo largo del todo el desarrollo del puente. Lógicamente, la elevación máxima de la aleta la marcaba la limitación aérea.

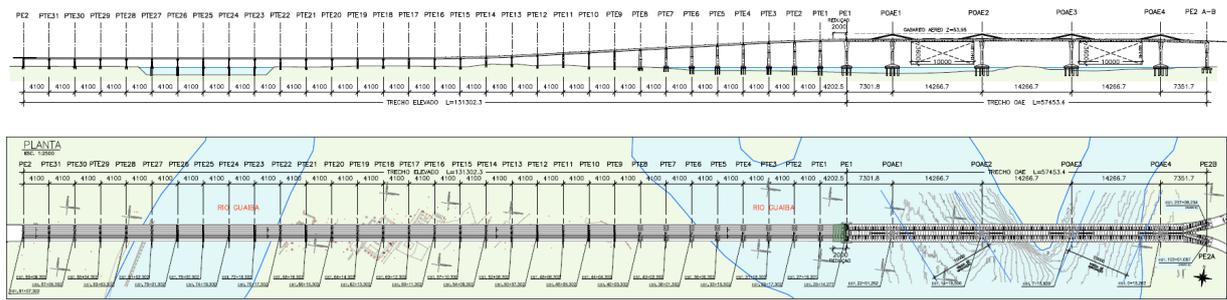


Figura 2. Alzado y planta del proyecto de referencia

Existen pocas referencias de este tipo de obras en el mundo y ninguna en Brasil, por lo que hubiera constituido una novedad en dicho país este tipo de obras singulares que aportan un resultado formal esbelto y atractivo, además de un comportamiento resistente eficiente.



Figura 3. Puentes de Texcapa, México

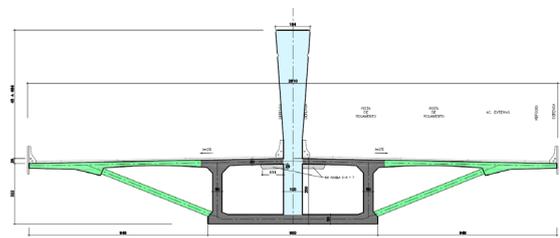


Figura 5. Sección tramo navegable

Para facilitar la construcción, la sección se ejecutaba en dos fases, primero el cajón central *in situ* con carros de avance posteriormente extendido con los vuelos sobre puntales realizado con carros de alas.

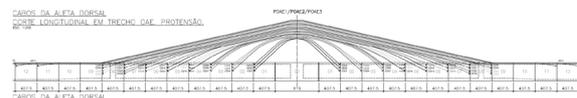


Figura 6. Detalle del pretensado de la aleta

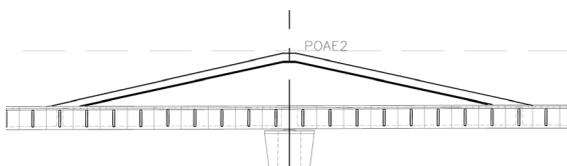


Figura 4. Alzado de una de las aletas

El tramo de acceso o “trecho elevado” se diseñó con vanos isostáticos de 41 m de luz y 26.91 m de ancho. La sección transversal está

compuesta por 9 vigas de hormigón pretensado de 2.10 m de canto separadas 3.22 m y sobre las que se colocan unas prelosas 7 cm para hormigonar una losa de 20 cm.

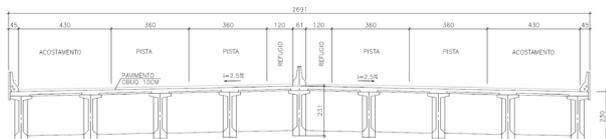


Figura 7. Sección del "trazo elevado"

El proyecto ganador de QUEIROZ GALVAO/ EGT-Engenharia como se ha referido propuso una solución variante que se puede dividir en tres zonas:

1. El tramo principal sobre el canal navegable, tiene una longitud de 600m cuya distribución es $90+3*140+90$, con una sección cajón de canto variable.
2. La Elevada Pesada (EP), sobre el río, tiene dos tramos, uno de 12 y otro de 6 vanos de 41 m, totalizando una longitud de 738,5 m
3. La Elevada Leve (EL), en tierra, que cuenta con 89 vanos de 12.3 m de luz con tableros de hormigón armado

3.1. Puente principal

Esta parte del proyecto fue íntegramente desarrollada por EGT [4]. Los vanos intermedios, que pasan por los canales de navegación, también se encuentran dentro de la zona de restricción de altura del aeropuerto Salgado Filho en Porto Alegre. Para cumplir con las restricciones de vuelo (nivel máx. 48,5 m) y de navegación (nivel mín. 40 m), la solución estructural tenía que ser un cajón con canto variable, cuyas pilas estaban compuestas por un par de esbeltos mamparos, construido por el método de voladizo equilibrado. Este tipo de pilares aumenta el rendimiento del

cajón, evitando fuerzas horizontales importantes debido a deformaciones impuestas en la superestructura y, por lo tanto, evitando la necesidad de pilotes inclinados, incluso sin juntas de expansión a lo largo de los 600 m de longitud

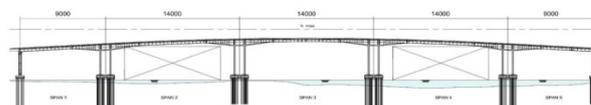


Figura 8. Alzado puente principal

Debido a razones de tiempo y costos, se eligió un cajón con voladizos laterales compuestos por losas prefabricadas soportadas por puntales de hormigón inclinados para cubrir la plataforma de 27.1 m de ancho.

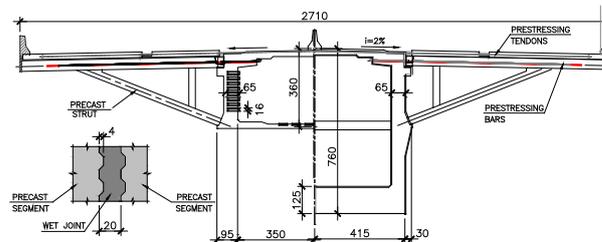


Figura 9. Sección del tablero en centro de vano

La superestructura del puente principal se diseñó con dovelas prefabricadas, con juntas in situ de 20 cm armadura. Dado que el diseño contempla un cajón y un número relativamente pequeño de dovelas, incluso teniendo en cuenta que la erección de la dovela y el hormigonado de la junta tarda 3 días, seguirá siendo más rápido que la opción de hormigonado in situ, que generalmente demora 7 días. La decisión de usar este tipo de junta fue respaldada por pruebas de laboratorio realizadas por Buyukozturk y todos, y también por el Puente New Gateway, diseñado y construido con él.

Los encepados más grandes del puente principal tienen 66 pilotes huecos de hormigón pretensado prefabricado con diámetros de 80 cm. Debido a la cantidad de pilotes y la pequeña profundidad del agua, fue posible evitar los pilotes inclinados, aumentando la

productividad y, en consecuencia, reduciendo los costos.

Para facilitar la ejecución de los encepados en el agua y ocultar los pilotes, se han desarrollado proyectiles prefabricados para ensamblarse alrededor del perímetro de los encepados, eliminando el uso de encofrados y dando un mejor acabado al elemento estructural y mejorando su durabilidad.



Los pilares ubicados en los extremos del puente principal se ejecutan en segmentos prefabricados, con secciones de celdas rectangulares, con encofrados de acero superiores e inferiores idénticos para un ajuste perfecto, lo que permite el uso de juntas secas.

Las vigas transversales en la parte superior de estos pilares se han diseñado para usar prelosas prefabricadas colocadas y fijadas en los pilares con el uso de barras de pretensado Dywidag. Después de ensamblar la carcasa prefabricada, se coloca refuerzo adicional y la viga se coloca en su lugar,

En el puente principal, encima de cada uno de los cuatro encepados de pilotes intermedios, dos columnas delgadas paralelas con 8.3 x 1.5 m y 10.5 m de separación están hormigonadas in situ con encofrado trepante y conectadas monóticamente a la superestructura, con las dovelas de la cabeza del martillo también ejecutadas in situ.

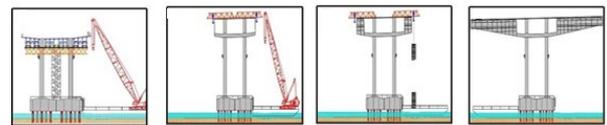
El diseño estructural del puente principal se ha llevado a cabo mediante una combinación de modelos estructurales. El comportamiento longitudinal, considerando

todas las fases de construcción y los efectos secundarios a lo largo del tiempo, como los efectos de fluencia y retracción, se han evaluado mediante un modelo de barra.

Se usó un segundo modelo de elementos finitos compuesto por elementos de laminas lineales elásticas para toda la estructura para evaluar los efectos locales como el "shear lag" y las zonas de anclaje de cables. Este modelo no evalúa las fases de construcción.

Para el análisis transversal, se realizó un tercer modelo de elementos finitos para simular una sección cajón de una dovela como un marco de lamina teniendo en cuenta la flexión transversal, las fases de construcción y los efectos locales de los puntales.

Se construye mediante voladizos sucesivos, y cuando cada dovela se erige en su lugar, su junta húmeda se hormigona in situ y después de alcanzar la resistencia necesaria, se pretensan los cables del voladizo. Las dovelas se erigen casi simétricamente hasta que los voladizos alcanzan aproximadamente 70 m.



Después de terminar la primera etapa en voladizos sucesivos, las dovelas de cierre se implementan en las claves 2, 3 y 4 (tramos intermedios). El pórtico de lanzamiento se retira después de pretensar algunos cables de continuidad.

Más tarde, los tramos laterales se erigen utilizando torres de acero auxiliares que permitirán la continuidad de la construcción en voladizo. La construcción de los tramos laterales en voladizos adicionales exigió el uso de cables temporales debido a los momentos negativos adicionales.

La última dovela de este vano lateral se hormigonará in situ apoyado por vigas transversales en la pila lateral. Después de terminar los vanos laterales, se realizó un estudio detallado para extraer los cables

voladizos externos temporales y para pretensar los cables de continuidad internos. La solución adoptada ha sido capaz de combinar los cambios lentos en las tensiones del hormigón, mantenidos bajo límites predefinidos, y la reducción de la reacción en el soporte temporal, facilitando su eliminación

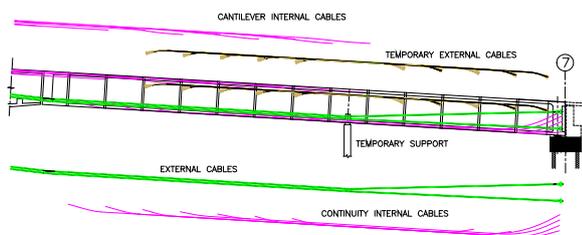


Figura 12. Esquema de pretensado

En la parte superior de cada apoyo temporal se instalarán cajas de arena elevables que funcionan como cojinetes y que permiten su propia extracción gradualmente al expulsar lentamente la arena del interior.

Al final de la construcción del alzado del puente, se colocaron puntales de hormigón prefabricados cada 4 m y se conectaron con el fondo del cajón con resina epoxi y con la parte superior con barras de pretensado internas del cajón.

La construcción de las losas prefabricadas laterales comienza en el centro de vano para crear momentos positivos que comprimen la losa. Más tarde, la secuencia se invierte y las losas prefabricadas se erigen desde el soporte hasta el centro de vano, de manera similar al método en voladizo equilibrado, pero con un pretensado longitudinal adicional interno a la losa. La erección de las losas en los tramos laterales se realiza desde la pila lateral a la intermedia. Finalmente, se aplica el pretensado externo.

La flexión transversal de las almas del cajón se ha calculado siguiendo la solución Knittel, que admite que una viga de sección hueca está compuesta por una serie de tiras transversales que funcionan transversalmente como marcos independientes. Las fuerzas

internas obtenidas por esta simplificación se han comparado con las obtenidas con el modelo de elementos finitos que se hizo utilizando elementos lámina, mostrando una buena aproximación entre ellos, excepto en la región cercana a los puntales de arriostramiento inclinados, donde hay una concentración de momentos y fuerzas axiales debido a la fuerza del puntal.

Las vigas transversales en las zonas donde la altura constante se encuentra con una altura variable, se han diseñado para resistir las fuerzas internas de la desviación de la fuerza de compresión de la brida inferior y de los tendones externos, así como las fuerzas de corte. El diseño se ha llevado a cabo mediante el Método de bielas y tirantes y las trayectorias de tensiones obtenidas con un software basado en el Método de Elementos Finitos.

En la zona de canto variable, la fuerza de compresión transmitida por los puntales de arriostramiento inclinados al alma no está alineada con ala inferior y los puntales horizontales se usan para resistir contra las fuerzas internas producidas con cargas simétricas, como la carga muerta. En el caso de la carga asimétrica, el puntal tiene la función de distribuir las fuerzas internas entre las dos almas que funcionan como placas con comportamiento bidimensional y están sujetas a momentos transversales y longitudinales.

Una vez que las juntas son del tipo húmedo, fue necesario evaluar, cuidadosamente, las regiones de concentración de tensiones. El modelo de barras supone que el pretensado se distribuye sobre la sección, mientras que el modelo de láminas muestra una concentración de compresión antes de los anclajes y una concentración de tracción detrás de los anclajes (un fenómeno bien conocido). Se ha verificado que pretensar otros cables, incluidos los externos, era suficiente para eliminar cualquier tracción en las juntas en una combinación de carga rara (de manera similar a

la combinación característica del Eurocódigo EC0).

3.2. Elevada ligera

El diseño final fue planteado por QUEIROZ GALVAO/ EGT-Engenharia basado, como el resto de la estructuras, en una maximización de la utilización de elementos prefabricados siguiéndola la larga tradición y experiencia de la ingeniería brasileña en este tipo de construcción. CFC colaboró en el estudio desarrollando por encargo de EGT el proyecto de detalle de esta parte del proyecto.

Ocupa dos tramos de la obra, uno de 321.14 m (26 vanos) y otro en pantalón con 470.75 m y 549.02m.

Está compuesto por vanos isostáticos como losa de continuidad de 12.34 m, salvo los vanos extremos que son de 12.50 m y los del pantalón que son de 12.30 m.

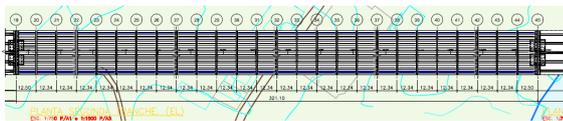


Figura 13. Tramo de 321.14m

Todas las vigas tienen una longitud de 11.87 m, y la diferencia en la luz de los vanos se genera en los cabeceros de apoyo

El ancho total son 27.10 m formado con 12 vigas prefabricadas de hormigón pretensado en forma de T y cuando se parte en el pantalón cada uno de los ramales tiene 13.70 m con 6 vigas prefabricadas de hormigón pretensado en forma de T

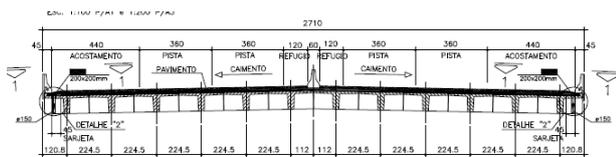


Figura 14. Sección transversal tramo recto de 321.14m

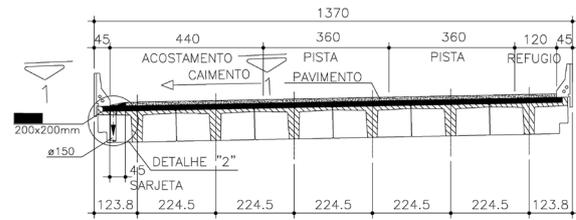


Figura 8 Sección en el pantalón

Las vigas utilizadas son de hormigón pretensado con un canto de 0.90 m y un ancho de la cabeza de compresión de 2.24 m.

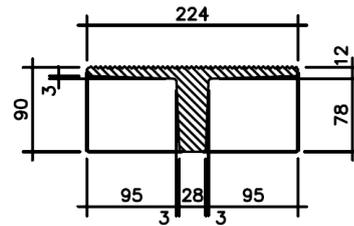


Figura 9. Sección transversal de la viga

Se coloca una viga junto a otra y se hormigona una losa de 15 cm que va conectada a las vigas por medio de armadura de conexión.

En los extremos de la viga éstas tiene una sección rectangular de 0.90 m x 2.24 m con unos 0.20 m de espesor.

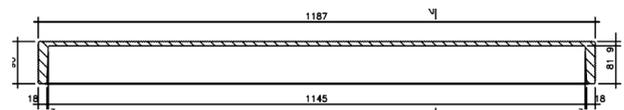


Figura 10. Alzado de la viga

Las pilas están compuestas por un cabecero sobre el que reposan las vigas y este se apoya en 8 pilas pilote de 0.60 m de diámetro.

El cabecero de estas pilas es una parte prefabricado en forma de U y a continuación hormigón in situ para cerrar la sección rectangular

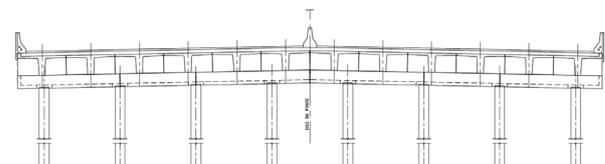


Figura 11. Sección por pila

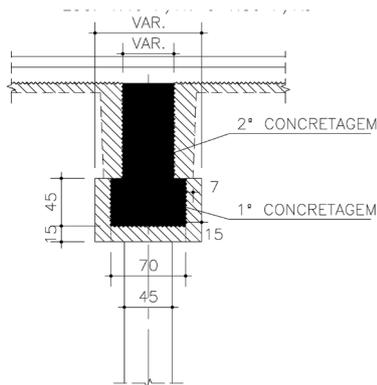


Figura 12. Sección pila

3.3. Elevada pesada

La estructura de elevada pesada ocupa dos tramos rectos de la obra, uno de 492.50 m (12 vanos) y otro de 246 m (6 vanos).



Figura 20. Elevada pesada durante construcción

Está compuesto por vanos isostáticos de 41 m de luz y con una anchura de 26.96 m

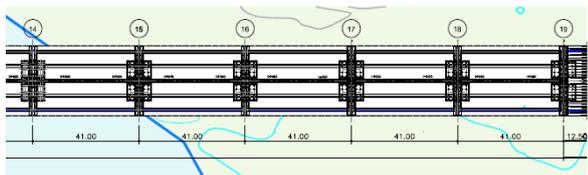


Figura 21. Tramo de 246m

Todas las vigas tienen una longitud de 40m, y la diferencia en la luz de los vanos se genera en los cabeceros de apoyo

El ancho total de 26.96 m formado con 5 vigas prefabricadas de hormigón pretensado en forma de U, separadas entre sí 5.65 m,

quedando unos vuelos en los extremos de 2.18 m

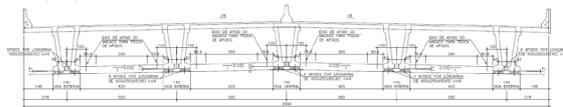


Figura 22. Sección transversal del tablero

Las vigas utilizadas son de hormigón pretensado con un canto de 2.00 m y un ancho de 1.40 m .

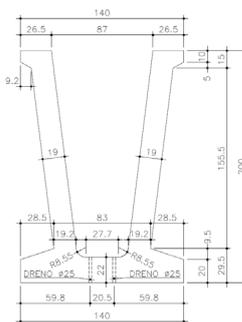


Figura 23. Sección transversal de la viga



Figura 24. Foto viga prefabricada

Se coloca una viga separada 5.65 m de la siguiente y sobre ellas se coloca una losa nervada prefabricada de 22 cm de espesor

En los extremos de la viga éstas tiene unos tapes para hacerla maciza y poder hacer los diafragmas sobre pila.

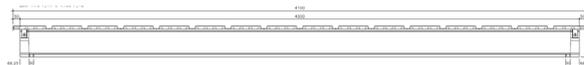


Figura 13. Alzado de la viga

Las pilas están compuestas por un cabecero sobre el que reposan las vigas y este se apoya en dos fustes rectangulares.

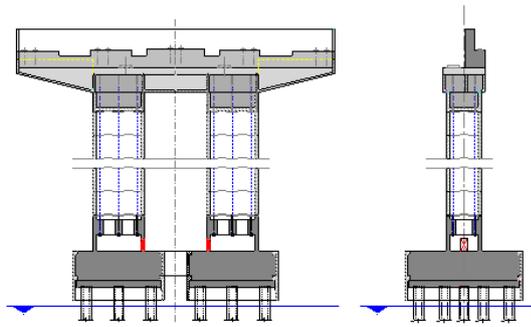


Figura 14. Alzado de pila

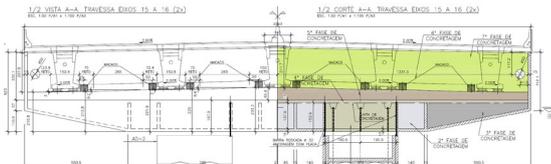


Figura 15. Sección cabecero de pila

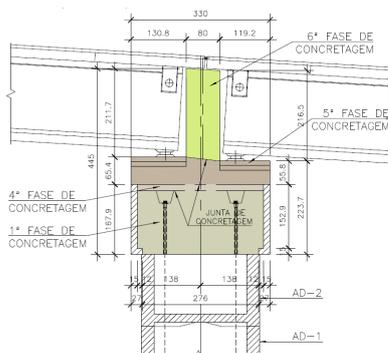


Figura 16. Sección longitudinal por pila

Los fustes son de sección rectangular hueca y también prefabricados, cuyas piezas van pretensadas con 6 vainas de 105 mm de diámetro.



Figura 17. Fuste prefabricado

4. Ficha técnica

- Propiedad:
Ministerio dos transportes.
Departamento nacional de infraestructur de transportes (DNIT)
- Anteproyecto de Referencia:
CARLOS FERNANDEZ CASADO S.L.: Celso Iglesias, Sara Fernández
ENGEVIX: Eduardo Nagao
- Construcción:
QUEIROZ GALVAO/ EGT-Engenharia
- Proyecto de Detalle:
EGT-Engenharia: Fernando Stucchi, Francisco Blancas
CARLOS FERNANDEZ CASADO S.L. (viaductos de acceso): Celso Iglesias, Sara Fernández, Jose Manuel Domínguez

Agradecimientos

Este artículo se redacta *in-memoriam* de Celso Iglesias (1963-2017), añorado compañero que nos abandonó prematura e inesperadamente. Profesor Ingeniero de Caminos, políglota, incansable investigador de la ingeniería de puentes y pionero en el intercambio de estudiantes entre la Escuela de Ingenieros de Madrid con su admirada École de Ponts de París, dejó a muchos de sus compañeros y amigos en CFC y en otros ámbitos profesionales y académicos una huella imborrable y un gran vacío. Con el puente de Guiaba tuvo una particular predilección y entusiasmo, proveniente tanto de su conexión familiar con el país como por ser el proyecto donde tuvo la oportunidad de poder por primera vez desarrollar libremente una innovadora solución donde plasmar su gran conocimiento. Sirva por tanto esta obra como sentido homenaje a su legado en el mundo de los puentes.

Referencias

- [1] American Segmental Bridge Institute (ASBI), Construction Practices *Handbook for Concrete Segmental and Cable-Supported Bridges*, 2nd Edition, June 2008.
- [2] Buyukozturk, O. et al. *Shear behavior of joints in precast concrete segmental bridges* – ASCE Structural Engineering, 1990. 116: 3380-3401
- [3] Rotolone P., *Gateway Bridge Approaches. Match Casting Of Box Segments*, Queensland Roads, Edition No 6, September 2008.
- [4] Fernando Stucchi, Francisco Blancas et al. *The Bridge over the Guaiba Lake*. Simposio FIB. Ciudad del Cabo. Sudáfrica 2016.
- [5] Celso Iglesias *Proyecto y Cálculo de estructuras de hormigón y acero*. Volumen 3. Editorial Sintesis
- [6] Celso Iglesias *Proyecto de Puentes*. Volumen 3. Editorial Sintesis