

Puentes Arco Paso de Bote sobre el Arroyo Tacuarembó Chico en Tacuarembó (Uruguay) *

*Paso de Bote Arch Bridges over Tacuarembó River. Tacuarembó, Uruguay***

Iago González Quelle*, a

^aIngeniero de Caminos, Canales y Puertos. MEng in Membrane Structures. /Qube. Universidad Politécnica de Cartagena. / Socio Fundador. Profesor Asociado. Murcia, España

RESUMEN

La presente comunicación describe los criterios básicos del diseño conceptual, elementos estructurales, y algunos aspectos constructivos y específicos del proyecto de dos puentes arco de 55.0 y 112.15 m de longitud construidos en Tacuarembó (Uruguay), como parte de la duplicación de la Ruta 5. Los puentes poseen una gran carga de ingeniería en su fase de diseño, intentando integrar al máximo los conceptos estéticos y funcionales con los estructurales.

ABSTRACT

This paper describes the main criteria of the conceptual design, structural elements, and some constructive details and specific aspects of the project of two arch bridges in Tacuarembó (Uruguay). These two bridges, 55.0 and 112.15 m long, are part of the duplication of National Route 5. The bridges have a great engineering load in its design phase, trying to integrate aesthetic and functional concepts with structural ones.

PALABRAS CLAVE: Diseño Conceptual, Puente Arco, Bowstring, Detalles.

KEYWORDS: Conceptual Design, Arch Bridge, Bowstring, Details.

1. Introducción

En el año 2012 la Intendencia Municipal de Tacuarembó (Uruguay), como parte de la duplicación de la Ruta 5, proyecta la construcción de dos nuevos puentes de 55.0 m y 112.15 m de longitud total sobre el Arroyo Tacuarembó, adyacentes a otros dos puentes existentes, denominados "Paso de Bote" y construidos en la década de 1930.

El trabajo, desarrollado a partir de un encargo realizado por GS Ingenieros Estructurales, empresa adjudicataria del contrato con la Intendencia Municipal de Tacuarembó,

consistió en la concepción estructural, diseño y posterior proyecto constructivo de dos puentes arco, ambos resueltos mediante una tipología de arco atirantado por el tablero, tipo bowstring. El primero de los puentes consta de un único vano, con unas luces entre ejes de estribos de 55.0 m, mientras que el segundo consta de dos vanos con unas luces entre ejes de pilas y estribos de 56.07 + 56.07 m. La inauguración de los mismos tuvo lugar el 22 de diciembre de 2016.

Los puentes poseen una gran carga de ingeniería en su fase de diseño, intentando

integrar al máximo los conceptos estéticos y funcionales con los estructurales. Las condiciones particulares del emplazamiento y

experiencia local derivaron la solución hacia un puente construido íntegramente (tablero y arcos) en hormigón estructural.



Figura 1. Aspecto final de los puentes. En primer plano, el puente de 112.15 m de longitud. Al fondo se aprecia el puente de 55.0 m de longitud.

2. Estudio de alternativas. Criterios de diseño conceptual

Inicialmente, se partió de un anteproyecto (ver figura 2), desarrollado por la Intendencia Municipal de Tacuarembó, en el que estaba prevista la ejecución de dos puentes arco de tablero inferior, íntegramente proyectados en hormigón armado, en el que las péndolas eran también de hormigón.

El diseño contemplado en el anteproyecto presentaba notables posibilidades de mejora en lo relativo a aspectos constructivos, de durabilidad, comportamiento estructural, y especialmente, de elegancia y transparencia visual.

En una primera aproximación, se analizaron diversas alternativas en cuanto a la

disposición de péndolas, relación flecha luz en el arco, material, etc.:

- Arcos metálicos o de hormigón, con péndolas verticales.
- Variantes de las dos soluciones anteriores, con péndolas diagonales, tanto rígidas como flexibles.
- En todos los casos, se analizan los efectos de variar la relación flecha/luz en los arcos, entre 1/5 y 1/8.

Todas estas alternativas, en cualquier caso, partían de unos condicionantes o decisiones previas de partida, indicadas a continuación:

- La sección transversal de la calzada se planteaba como independiente de la vía ciclopeatonal, por lo que desde el inicio se adoptó la decisión de aprovechar todo el canto disponible en la sección del tablero coincidente con los arcos. De este modo, al trabajar con un concepto de tablero rígido / arco flexible, se lograba maximizar la esbeltez en el arco.

- Teniendo en cuenta que el proyecto contemplaba el diseño de dos puentes, el primero de ellos de dos vanos, y el segundo con un único vano, y que todos estos vanos debían salvar aproximadamente la misma luz, se adoptó la decisión de disponer una junta de dilatación sobre la pila central del puente de mayor longitud. De este modo podían proyectarse tres tableros idénticos de 55.0 m. de luz entre ejes de apoyos, lo cual suponía una ventaja desde el punto de vista del propio proyecto, y también desde el de la ejecución, al permitir la reutilización de material.



Figura 2. Anteproyecto desarrollado por la Intendencia Municipal de Tacuarembó.

Teniendo en cuenta los condicionantes establecidos y las conclusiones obtenidas en el análisis de alternativas llevado a cabo, se seleccionó la opción finalmente desarrollada en el proyecto:

- La localización de la obra, en una zona con una densidad de población reducida, alejada de grandes núcleos urbanos, y la tradición constructiva del propio país, prácticamente

imponían una solución realizada mediante hormigón armado o pretensado. A partir de las conclusiones establecidas en el análisis de alternativas (valoradas técnica y económicamente por empresas locales), se adoptó la decisión de proyectar una solución realizada íntegramente con hormigón, excepto en las péndolas.

- Para la geometría del arco se adoptó una solución de compromiso, con una relación flecha/luz de 1/5, ya que un rebajamiento excesivo del arco se traduciría en un incremento notable de los esfuerzos axiales en el mismo y, principalmente, de los efectos de la fluencia en el comportamiento general del tablero.

- En relación con la disposición de péndolas inclinadas o verticales, al tratarse de un puente de ancho reducido y canto moderado se concluyó que en este caso la tipología de péndolas verticales se mostraba claramente más eficiente y minimizaba los esfuerzos en el arco.

- En relación con la inestabilidad del arco frente al pandeo, se constató mediante un análisis preliminar en teoría de grandes deformaciones, que los cables tendían a equilibrar el arco cuando se producía un desplazamiento del mismo fuera de su plano. En el plano del arco, los efectos de segundo orden incrementaban los momentos flectores del orden de un 20%. En base a ello, los arcos se proyectaron exentos, evitando la disposición de elementos de conexión transversal entre los mismos.

Una vez centrados estos aspectos básicos, se realizó un análisis detallado de los elementos más representativos de la estructura, desde el punto de vista formal.

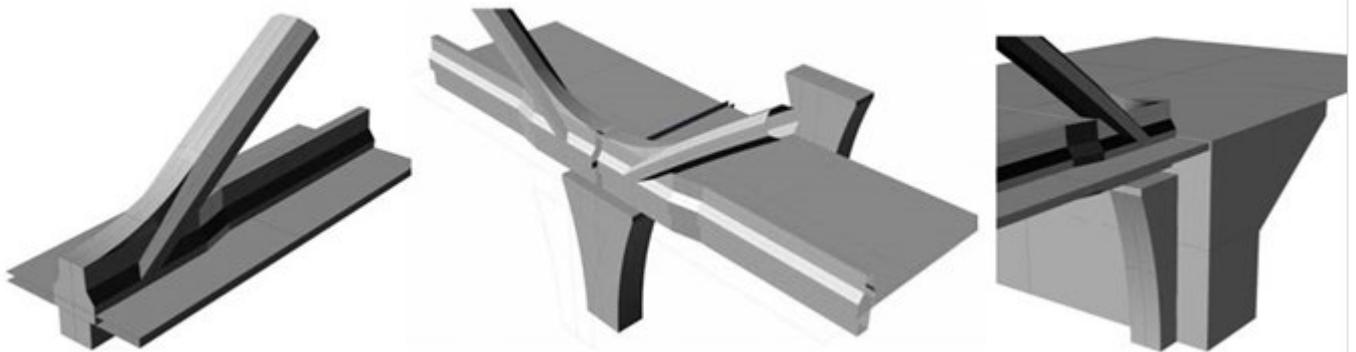


Figura 3. Análisis de detalles de conexión arco-tablero en la fase de concepción estructural.

Como se ha comentado, coincidentes en el mismo plano de los arcos, se proyectaron dos vigas de gran rigidez, pretensadas, que mantienen la rigidez bruta de la sección de hormigón bajo la acción de las cargas permanentes. Estas vigas debían ensancharse en ambos extremos para alojar las placas de anclaje de los cables de pretensado, donde a su vez se disponían los arranques del arco. A una distancia 3.90 m del extremo del tablero (2.90 m, al eje de apoyos), las vigas reducían su ancho al mínimo necesario para cumplir su función simultánea como elemento estructural y de contención de vehículos.

En el caso del arco, tratando de mantener el área e inercia necesarias, se buscó el máximo aligeramiento visual de la sección transversal. Con este objetivo, se optó por una geometría romboidal que la dotaba de una mayor esbeltez aparente.

Las pilas se diseñaron con una geometría que se adaptaba estrictamente a los esfuerzos solicitantes en su base, mientras que su ancho se incrementaba en la coronación para garantizar el correcto apoyo a los arcos, y disponer de espacio suficiente para una eventual sustitución de los apoyos. Esta misma geometría de las pilas se adoptó en los estribos a modo de contrafuertes exteriores, manteniendo una

coherencia global en la imagen del puente, y optimizando a su vez el espesor del muro del estribo.

Como se puede apreciar en la figura 3, tanto la geometría como los encuentros entre los diferentes elementos estructurales mencionados fueron cuidadosamente estudiados mediante una modelización geométrica tridimensional durante la fase de anteproyecto.

3. Descripción de las estructuras

Como ya se ha comentado previamente, se proyectaron dos puentes, que se ubican a una distancia aproximada de 350 m. El primero de ellos (puente sobre el Arroyo Tacuarembó) tiene una longitud total, entre ejes de estribos, de 112.15 m distribuidos en dos vanos de 56.07 m., mientras que en el segundo (puente sobre el gajo del Arroyo Tacuarembó), la longitud es de 55.0 m, y se resolvió con un único vano.

En ambos puentes, cada uno de los vanos es isostático, con una luz de 55.0 m entre ejes de apoyos, y se resolvió con una tipología en arco de tablero inferior tipo bowstring (atirantado por el tablero).

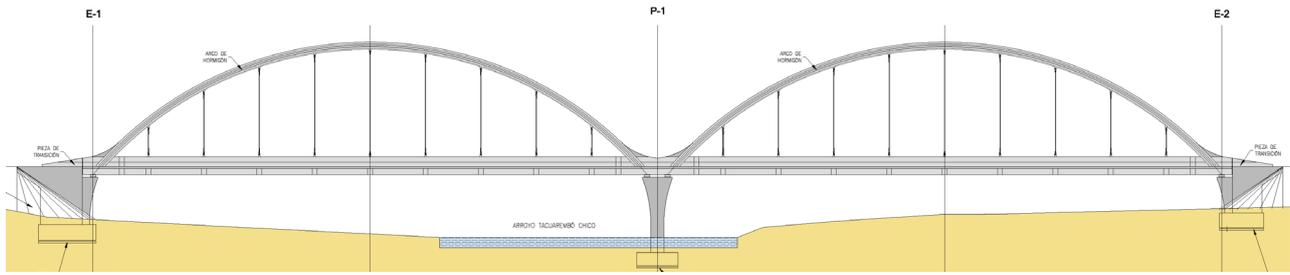


Figura 4. Alzado del puente sobre el Arroyo Tacuarembó.

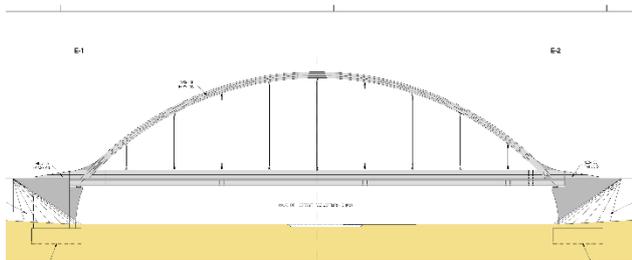


Figura 5. Alzado del puente sobre el gajo del Arroyo Tacuarembó.

El ancho del tablero es constante e igual a 12.90 m. La sección transversal está distribuida del siguiente modo:

- Arco izquierdo: 1.00 m.
- Arcén izquierdo: 0.50 m.
- Calzada central de ancho libre 7.00 m.

- Arcén derecho: 0.50 m.
- Arco derecho: 1.00 m.
- Vereda: 2.50 m.
- Espacio para alojar la barrera de 0,40 metros.

La rasante del tablero se dispone sobre una alineación recta, tanto en planta como en alzado, de tal manera que los puentes discurren aproximadamente a unos 5-6 metros sobre el terreno natural.

Los puentes se proyectaron adoptando como normativa de referencia los Eurocódigos estructurales, complementados con la normativa local [1,2] en determinados aspectos constructivos o de acciones específicos del país.

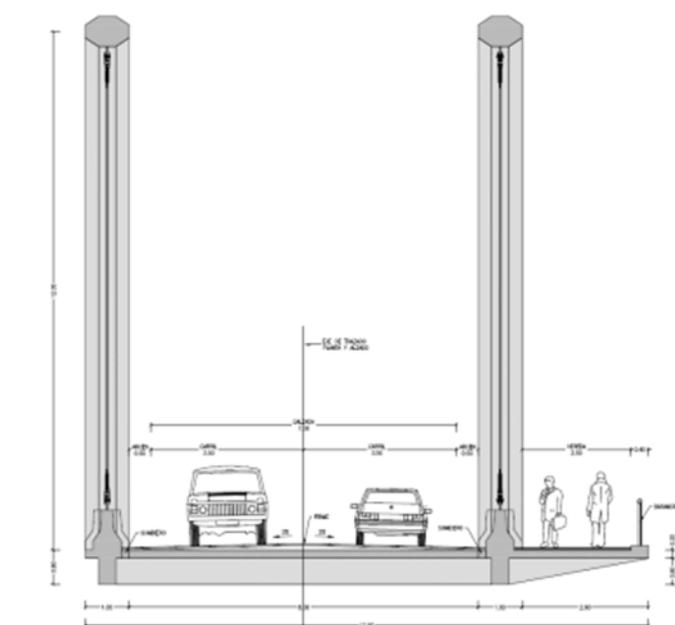


Figura 6. Sección transversal del tablero.

3.1. Tablero.

El puente responde a la tipología de un puente arco con tablero inferior. El canto del tablero, limitado a un máximo de 80 cm con objeto de mantener la sección hidráulica determinada por el puente existente, está formado por un emparrillado de vigas longitudinales y transversales sobre las que se dispone una losa superior de 20 cm de espesor.

Las vigas longitudinales son coincidentes con la proyección del eje de los arcos, y su canto total es de 1.72 m, de los cuales 0.92 m se disponen a partir de la cara superior de la losa del tablero. Transversalmente se disponen un total de 11 vigas, con una separación entre ejes de 5.50 m.

Las dos vigas extremas constituyen las riostras de estribos (y pilas), mientras que las nueve viga interiores son coincidentes en posición con las péndolas de conexión entre arco

y tablero. En la zona correspondiente a la vereda, las vigas son de canto variable.

En la figura 7 se muestra una imagen del modelo de cálculo en que puede apreciarse con claridad la disposición del emparrillado de vigas y de la losa que forman el tablero.

El arco, en base a consideraciones tanto económicas como constructivas y de durabilidad se proyectó mediante hormigón armado, con una resistencia característica de 45 MPa.

La directriz del mismo es parabólica, con una flecha máxima en el centro del vano de 12.0 m, lo que constituye una relación flecha/luz de 4.60. El arco está completamente comprimido para la combinación de acciones cuasipermanente. Se constató asimismo que la fluencia no presentaba especial relevancia en el comportamiento global de la estructura.

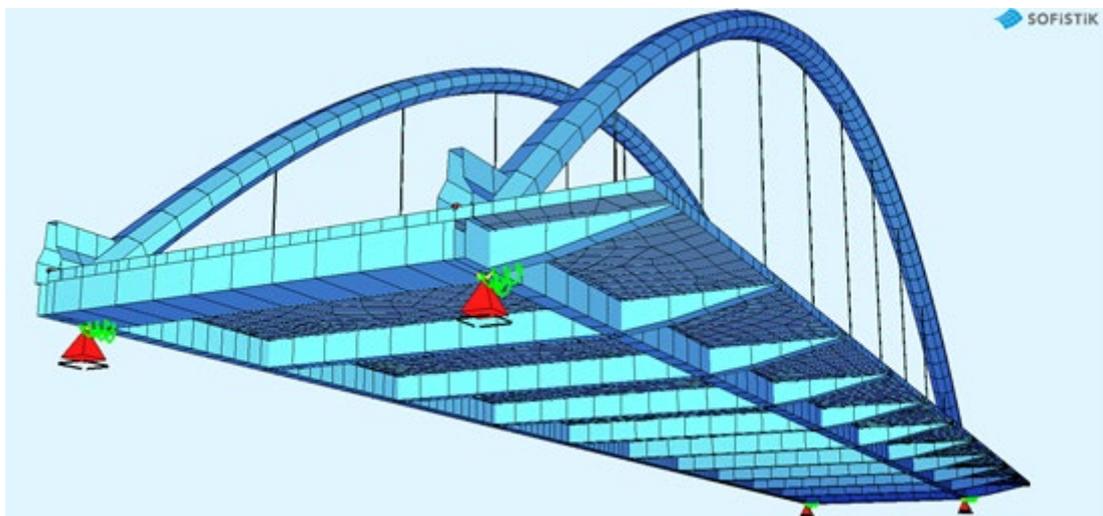


Figura 7. Modelo de cálculo del tablero.

Debido a la relativamente baja influencia de los esfuerzos de segundo orden para el dimensionamiento de los arcos, estos se proyectaron exentos, evitando la disposición de

elementos de conexión transversal entre ellos. Debido a estas mismas consideraciones, la sección transversal propuesta para el arco es de canto constante.

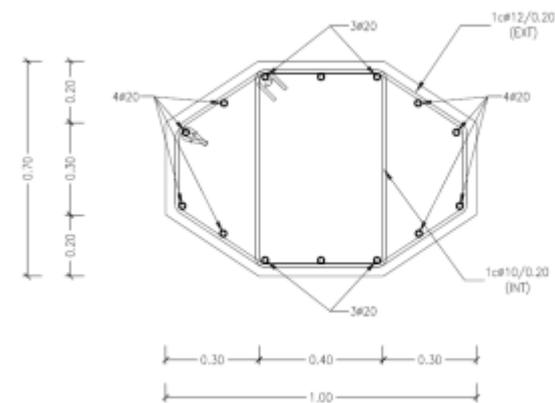


Figura 8. Sección transversal del arco.

Un aspecto muy relevante para el correcto comportamiento del tablero fue el diseño de los nudos de conexión arco-tablero. En esta zona confluyen la introducción de pretensado, el apoyo del tablero en las pilas y estribos, y el arranque del arco.

3.2. Pilas

En el puente sobre el Arroyo Tacuarembó se dispuso un único apoyo intermedio (pila) compuesto por dos fustes independientes de idéntica geometría, cada uno de los cuales permite el apoyo de las vigas longitudinales.

El diseño de las pilas presenta una geometría de canto variable en el alzado. La sección se mantiene con una geometría constante y rectangular desde el arranque (dimensiones 1.00x1.50 m) hasta una altura de 3.28 m, punto a partir del cual el canto es variable hasta un máximo de 3.625 m. Esta variación, buscaba mantener la continuidad visual y armonía con el resto de la geometría del puente.

La cimentación de las pilas se realizó mediante zapatas rectangulares de hormigón armado, dispuestas sobre el nivel competente de arenas cementadas. Para llegar a este nivel se ejecutaron pozos de hormigón en masa. El régimen hidráulico del río no presentaba un potencial riesgo de socavación.

3.3. Estribos

Todos los estribos son cerrados, y todos ellos se cimentaron directamente sobre el terreno natural, con excepción del estribo 2 del puente sobre el arroyo Tacuarembó, en el que se recurrió a una cimentación profunda sobre 10 pilotes de 0.80 m de diámetro y 11.0 m de longitud.

Con objeto de mantener un diálogo estético con los puentes existentes, además de facilitar el encaje geométrico de los nuevos manteniendo una coherencia formal con las pilas proyectadas, se dispusieron dos apéndices o pilas adosadas exteriores al estribo, que además de rigidizar el muro del mismo y actuar como contrafuertes, permitían disponer sobre ellos el arranque del arco.

3.4. Aparatos de Apoyo y Juntas de Dilatación

Los apoyos son en todos los casos de neopreno antideslizante, de dimensiones 600 x 700 x 120 (105) mm, y se disponen bajo las vigas longitudinales en ambos extremos del tablero.

El puente se proyectó, como se ha comentado, con juntas de dilatación tanto en ambos estribos como en la sección de pilas (en el puente sobre el Arroyo Tacuarembó). Estas juntas tienen un recorrido máximo de 160 mm, en la sección de estribos, y de 230 mm, en la sección de pila.

4. Proceso constructivo.

El proceso constructivo del puente se diseñó inicialmente bajo el concepto de que se pudieran ejecutar cada uno de los vanos íntegramente, aprovechando de este modo el material empleado. Estas consideraciones fueron tenidas en cuenta en el dimensionamiento de la

armadura del fuste, y en la cimentación de la pila central.

El proceso constructivo planteado para la construcción del puente (puente sobre el Arroyo Tacuarembó), fue el indicado a continuación:

- Preparación del Terreno y Ejecución de Cimentaciones:
 - Excavación del terreno hasta la cota definida en planos para la implantación de las cimentaciones de pila y estribos.
 - Ejecución de una capa de hormigón de limpieza (o pozos de cimentación, en su caso) en el fondo de la excavación.
 - Disposición de la ferralla, encofrado y hormigonado de pila y estribos.
- Disposición de los apoyos sobre la coronación de pila y estribos.
- Construcción de la cimbra en uno de los vanos del tablero.
- Hormigonado del tablero del vano 1.
- Hormigonado del arco del vano 1.
- Montaje de las péndolas en su posición definitiva, sin proceder al tesado de las mismas.
- Pretensado del tablero.
 - En el momento del tesado, el hormigón del tablero debía haber alcanzado una resistencia mínima de 25 MPa.
 - El tesado se realizaba únicamente desde uno de los extremos de la viga, en concreto desde el más próximo a los estribos.
- Tesado de las péndolas: El proceso de tesado para la entrada en carga de los cables se realizaba mediante escalones sucesivos de carga con objeto de garantizar que, previamente al descimbrado, la tensión inicial en los cables era la indicada en el cuadro de definición de cables.
- Descimbrado del tablero.
- Repetición de los puntos anteriores para la ejecución del segundo vano de la estructura.
- Ejecución de acabados.



Figura 9. Aspecto de los puentes durante la ejecución de la obra, en la que se pueden apreciar los pilares provisionales.

Durante la ejecución de las obras, en lugar de la cimbra, la empresa constructora optó por construir unos pilares provisionales sobre los que se dispuso un emparrillado de vigas metálicas que actuaban como elemento auxiliar para el soporte del encofrado. Una vez finalizada la ejecución del tablero, se procedió a la demolición de estos pilares provisionales. Finalmente, cabe indicar asimismo que la ejecución de ambos vanos fue simultánea, con objeto de agilizar los plazos de construcción.

5. Aspectos específicos del Proyecto

Quizá el aspecto más singular de este proyecto lo constituye el hecho de proyectar un arco con tablero inferior en hormigón, solución que al menos en España no es probablemente la más habitual, si bien hay puentes muy notables de este tipo [3]. Uno de los aspectos más específicos del proyecto fue, por lo tanto, el procedimiento llevado a cabo para la evaluación de los esfuerzos de segundo orden en los arcos.

Tanto los esfuerzos reológicos, como las variaciones de rigidez que se pueden producir en el arco en función del tipo y nivel de sollicitación, hacen que su evaluación sea sensiblemente más delicada que su equivalente en estructura

metálica. El procedimiento llevado a cabo fue el indicado a continuación:

- Obtención de los modos principales de pandeo del arco, tanto en su plano como fuera del mismo.
- Partiendo de la geometría afín a los modos de pandeo indicados se generaba una imperfección inicial cuyo desplazamiento máximo respecto a la directriz inicial era de $L/250$ (0.22m).
- Posteriormente, y para la combinación de carga asociada al modo de pandeo correspondiente, se realizaba un análisis no lineal geométrico en teoría de grandes deformaciones, con objeto de evaluar la variación de esfuerzos entre el cálculo lineal y el cálculo no lineal. Dado que el arco se encontraba permanentemente comprimido para cualquier combinación de carga, el análisis se realizó considerando la rigidez bruta del mismo.
- Mediante este análisis se obtenía una excentricidad adicional que representaba el incremento de esfuerzos debidos a los efectos de segundo orden, que es el que finalmente se empleaba para mayorar los esfuerzos obtenidos en el Estado Límite Último.

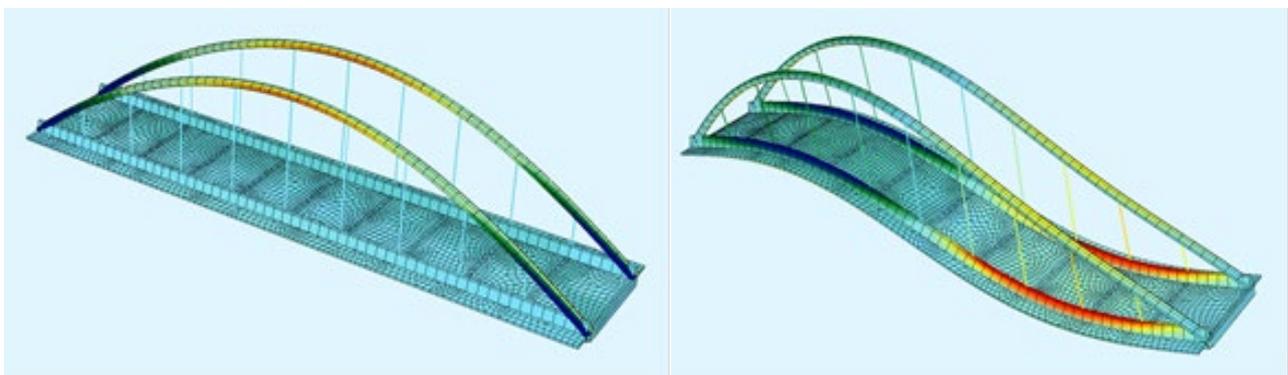


Figura 10. Modos de pandeo longitudinal y transversal fundamentales.

Adicionalmente, y como se ha comentado previamente, se realizó un estudio muy detallado de los nudos de conexión y

elementos adyacentes, buscando una imagen de continuidad visual y de fluidez. Este análisis formal se combinó en todo momento con los

condicionantes constructivos existentes en cada caso, y con la comprensión de los mecanismos de transmisión de fuerzas en cada caso.

6. Conclusiones

Los puentes Paso de Bote constituyen un ejemplo de cómo unos buenos criterios de diseño conceptual y el análisis de los condicionantes constructivos asociados a la localización de la obra, han permitido proyectar unas estructuras muy atractivas desde el punto de vista estético, con unos costes muy contenidos.

Referencias

[1] Dirección Nacional de Vialidad. Ministerio de Transportes y Obras Públicas de Uruguay. Pliego de Condiciones para la Construcción de Puentes y Carreteras de la Dirección Nacional de Vialidad. Montevideo, 1990.

[2] Dirección Nacional de Vialidad. Ministerio de Transportes y Obras Públicas de Uruguay. Especificaciones Técnicas Complementarias y/o Modificativas del Pliego de Condiciones para la Construcción de Puentes y Carreteras de la Dirección Nacional de Vialidad. Montevideo, 2003.

[3] Arenas de Pablo J.J, Capellán Miguel G, Beade Pereda H, Martínez Aparicio J, Ortega Arias A. “El Puente del Tercer Milenio sobre el río Ebro en Zaragoza”. Revista de Obras Públicas. 2018, n°3490., p. 75-98.

[4] Fernández Troyano L. Tierra sobre el agua. Visión histórica universal de los puentes. Madrid: Colegio de Ingenieros de Caminos, 1999.

[5] Manterola Armisén, Javier. “Puentes Arco con Tablero Inferior”. Revista de Obras Públicas. 2013, n°3436., p. 7-30.