

Nuevo puente sobre el río Paraguay en Asunción

New Bridge over Paraguay River in Asunción

Luis Carrillo Alonso^{*,a}, Jaime B. Ruiz-Ruano Álvarez^b, Manuel J. Marín Díaz^c

^a Dr Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Jefe Departamento de Estructuras de Obra Civil – Hormigón. Acciona Ingeniería.

^b Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Ingeniero de proyectos. Dpt. Estructuras de Obra Civil – Hor. Acciona Ingeniería.

^c Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos Ingeniero de proyectos. Dpt. Estructuras de Obra Civil – Hor. Acciona Ingeniería.

Recibido el 31 de mayo de 2019; aceptado el 14 de diciembre de 2020

RESUMEN

El gobierno de la República de Paraguay plantea construir un nuevo puente sobre el río Paraguay que permita generar un nuevo acceso a la capital Asunción. Para comprobar la viabilidad del proyecto, se encargó un estudio con el objetivo de evaluar las diferentes alternativas técnicas que pudieran ser consideradas. En dicho estudio, desarrollado en varias fases, se analizaron diferentes tipologías estructurales, resultando que la solución cajón de hormigón de canto variable, ejecutada mediante voladizos sucesivos, o bien la alternativa de puente atirantado, eran las dos más adecuadas. Finalmente esta última tipología fue la elegida como solución a adoptar.

©2022 Hormigón y Acero, la revista de la Asociación Española de Ingeniería Estructural (ACHE). Publicado por Cinter Divulgación Técnica S.L. Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia de uso Creative Commons (CC BY-NC-ND 4.0)

PALABRAS CLAVE: Viabilidad, alternativas, viga cajón, voladizos sucesivos, puente atirantado.

ABSTRACT

The Republic of Paraguay wishes to build a new bridge over Paraguay River in the capital Asunción in order to open a new access to the city. To check the feasibility of the project, it was ordered a study of different alternatives that achieve the demanded technical requirements. In this study, carried out in several stages, different structural typologies were evaluated, as result of the analysis, two typological structural schemes may be considered as feasible: a concrete box girder built by balanced-cantilever method, or the cable-stayed bridge. Finally this last option was adopted.

©2022 Hormigón y Acero, the journal of the Spanish Association of Structural Engineering (ACHE). Published by Cinter Divulgación Técnica S.L. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons (CC BY-NC-ND 4.0) License

KEYWORDS: Feasibility, alternatives, box girder, balanced-cantilever, cable-stayed bridge.

1. INTRODUCCIÓN

El Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones (M.O.P.C.) de la República de Paraguay licitó el estudio de factibilidad de un nuevo puente en Asunción sobre el río Paraguay, entre el Banco de San Miguel y Chaco í, que constituya una salida alternativa para el congestionado tráfico del área metropolitana

de la capital, y permita además crear un polo de desarrollo urbanístico en la zona, así como unir con la ruta hacia la vecina Argentina.

Acciona Ingeniería resultó adjudicataria de dicho estudio a través del cual se evaluó la viabilidad técnica de las posibles alternativas de trazado y estructurales para el cruce del cauce.

* Persona de contacto / Corresponding author.
Correo-e / e-mail: luis.carrillo.alonso@acciona.com (Luis Carrillo Alonso).

2.

ASPECTOS CONSIDERADOS EN EL ESTUDIO

En la elaboración del mismo se han tenido en cuenta tres aspectos fundamentales: Los requisitos técnicos establecidos en el contrato, la elaboración de un análisis detallado de los antecedentes de estructuras similares ya construidas en la zona y la realización de un estudio de soluciones para el puente principal y los accesos.

2.1. Requisitos técnicos de contrato

Entre los requisitos técnicos a tener en cuenta se pueden destacar los siguientes:

- Gálidos mínimos: 170 m entre caras interiores de pilas y 29 m de altura mínima sobre la máxima avenida del río Paraguay.
- Cruce sobre un tramo de cauce de 500 m de longitud estimada.
- Disposición de largos viaductos de acceso al puente principal, por existir una gran llanura de inundación en la zona de Chaco í y por la necesidad de conectar con el viario existente en el lado Asunción.
- Las estructuras del paso deberán albergar una calzada con dos carriles y una ciclovía por sentido, resultando en un ancho mínimo del tablero establecido inicialmente en 24.20 m, y ampliado finalmente a 28.45 m.

2.2. Antecedentes de estructuras similares

En una primera fase del estudio se procedió a inventariar las estructuras de carácter similar ya construidas sobre ríos próximos, en particular los ríos Paraguay, Uruguay y Paraná, en países como Argentina, Uruguay, Brasil y el propio Paraguay. La tabla 1, adjunta a continuación, muestra un resumen de la información destacada. De dicho inventario se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- v Al ser todos estos ríos navegables, la exigencia del tráfico fluvial en relación a los gálidos horizontal y vertical lleva a la necesidad de materializar siempre puentes con vanos principales de luces importantes.
- Gran parte de las soluciones fueron ejecutadas con

cajones de hormigón por voladizos sucesivos, las cuales resultaban competitivas para luces de hasta 200 m, siendo las soluciones atirantadas las adoptadas para luces mayores.

- Las realizaciones más cercanas son los puentes ejecutados sobre el propio río Paraguay, a su paso por Asunción y Concepción, con soluciones cajón de hormigón, ejecutadas por voladizos sucesivos, con luces de hasta 170 m.
- Ausencia de soluciones tipo arco o colgantes.

2.3. Estudio tipológico de soluciones

Aparte de los requisitos técnicos de contrato, para el estudio tipológico se tuvieron en cuenta, adicionalmente, los siguientes:

- Los terrenos de la zona inundable del río resultan con capacidades portantes débiles, lo cual lleva a limitar las alturas máximas de terraplén que es posible ejecutar, y como consecuencia al aumento de la longitud de estructura total a materializar respecto de la estricta hidráulicamente.
- Al ser los espesores de aluvial detectados importantes, resulta entonces que todas las cimentaciones deben ser profundas. Este aspecto presenta especial influencia en la resolución de los vanos de acceso, dado que resultará interesante reducir al máximo el número de cimentaciones dada su complejidad y repercusión en coste.
- La posición del canal navegable, dentro del ancho del cauce, de la cual depende la ubicación del puente principal.

Teniendo en consideración todos los factores señalados y centrándose en la solución a dar para el puente principal, se plantearon inicialmente siete tipos diferentes de soluciones, de manera que no quedase ninguna alternativa, que fuese técnicamente viable, descartada a priori en beneficio de otras, ya sea por la respuesta estructural buscada, su soporte y acción sobre el terreno o por el tipo de material empleado para su ejecución. Así, fueron propuestas:

- Variante 1: sección cajón doble de hormigón.
- Variante 2: sección cajón única de hormigón.
- Variante 3: puente atirantado con pilono único.
- Variante 4: puente atirantado con pilono doble.
- Variante 5: puente extradado.
- Variante 6: arco metálico de tablero inferior.
- Variante 7: viga en celosía metálica.

TABLA 1.
Selección de puentes de similares características en la zona

Puente	Río	Año	Tipología	Luces principales (m)	Altura de rasante (m)
Fray Bentos	Uruguay	1976	Cajón Hor. – Vol.Suc.	145+220+145	36
Colón - Paysandú	Uruguay	1975	Cajón Hor. – Vol.Suc.	97.5+140+97.5	34
Zárate – Brazo Largo	Paraná	1977	Atirantado – Metálico	110+330+110	30
Rosario-Victoria	Paraná	2003	Atirantado–Hormigón	139+330+139	30
Chaco - Corrientes	Paraná	1973	Atirantado–Hormigón	163+245+163	20
Posadas - Encarnación	Paraná	1990	Atirantado–Hormigón	115+330+115	20
Tancredo - Neves	Paraná	1980	Cajón Hor. – Vol.Suc.	130+220+130	65
Remanso Castillo	Paraguay	1978	Cajón Hor. – Vol.Suc.	85+170+85	35
Concepción – Pto Militar	Paraguay	1985	Cajón Hor. – Vol.Suc.	85+170+85	26

Se realiza, a continuación, una pequeña descripción y esbozo de cada variante.

2.3.1. Variante 1 – Sección cajón doble de hormigón

Tablero de sección cajón independiente para cada calzada y ejecutado mediante voladizos sucesivos. El ancho de cada tablero sería de 12.10 m, con voladizos laterales de 3.05 m cada uno y almas verticales, lo que daría un ancho en la base de 6.00 m. La luz principal sería de 178 m, lo que derivaría en unos cantos de 3.00 m (L/59) en centro de vano y 9.00 m (L/20) en arranques de voladizo.

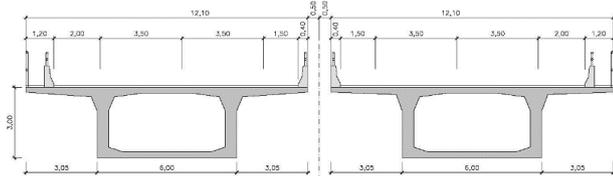


Figura 1. Variante 1.

2.3.2. Variante 2 - Sección cajón única de hormigón

De igual desarrollo longitudinal que la anterior, se dispondría un solo tablero para las dos calzadas, lo que deriva en un ancho del mismo de 24.20 m. Esto obligaría a ejecutar la sección transversal en dos fases, la primera compuesta por un cajón de 9.23 m de ancho construida, por voladizos sucesivos, y la segunda disponiendo dos voladizos laterales con ayuda de jalcónes de 7.48 m de vuelo, separados longitudinalmente entre sí 3.60 m. Sobre ellos se hormigonará la losa de compresión que materializa el ancho total de la plataforma. Así, se plantea un vano principal de 178.0 m y dos vanos de compensación de 89.75 m. Los cantos son de 9.00 m (L/20) sobre apoyos y de 3.40 m (L/52) en centro de vano. La principal ventaja de esta alternativa es la necesidad de la mitad de subestructura.

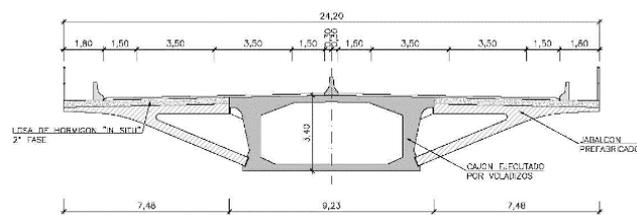


Figura 2. Variante 2.

2.3.3. Variante 3 – Puente atirantado con pylon único

Tablero atirantado a un pylon central único, el cual permite saltar el vano principal de 178.25 m quedando compensado por otro vano simétrico sobre el que se disponen 2 pilas intermedias las cuales actúan como puntos fijos del tablero al conectarse ambos elementos. A su vez, los cables anclados en esos puntos limitan las flexiones del pylon y permiten mejorar el comportamiento resistente frente a sobrecargas descompensadas. Al disponerse de un solo plano de atirantamiento, la sección del tablero debe contar con una importante rigidez a torsión. Para ello se propone una sección transversal de canto constante 3.40 m y de características similares a las de la Variante 2.

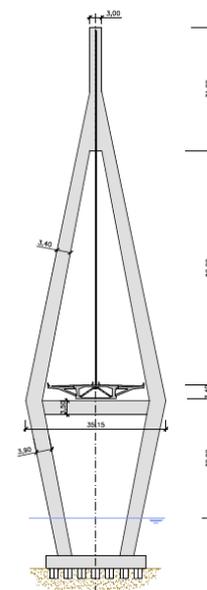
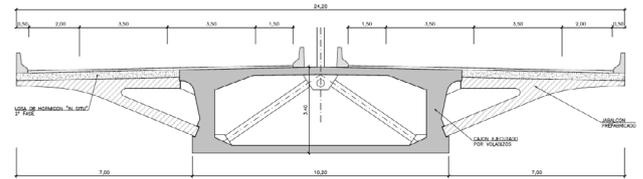
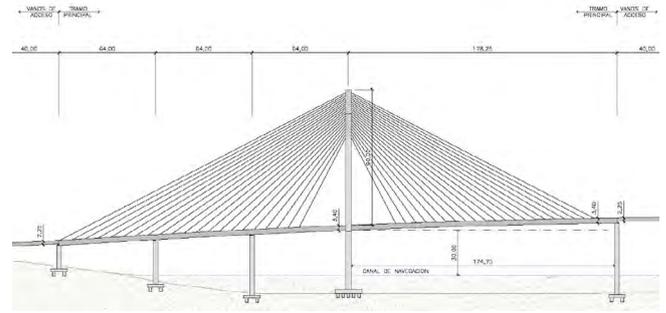


Figura 3. Variante 3.

2.3.4. Variante 4 – Puente atirantado con pylon doble

Puente atirantado con 2 pilonos para salvar el vano principal de 178.0 m. En este caso se desarrolla un voladizo desde el pylon 89 m aproximadamente, lo que lleva a unos pilonos de menor altura. Es por ello que estos se proponen en forma de H con dos planos de atirantamiento y dejando al tablero pasar a través de su interior. Ambos fustes quedan arriostrados en su parte superior con un puntal. La sección del tablero, por efecto del atirantamiento en sus bordes, no necesita disponer de una gran rigidez a torsión, siendo la flexión transversal el efecto determinante para su dimensionamiento. Se disponen travesaños allí donde sea requerido por diseño. La construcción se plantearía mediante voladizos sucesivos desde ambos pilonos.

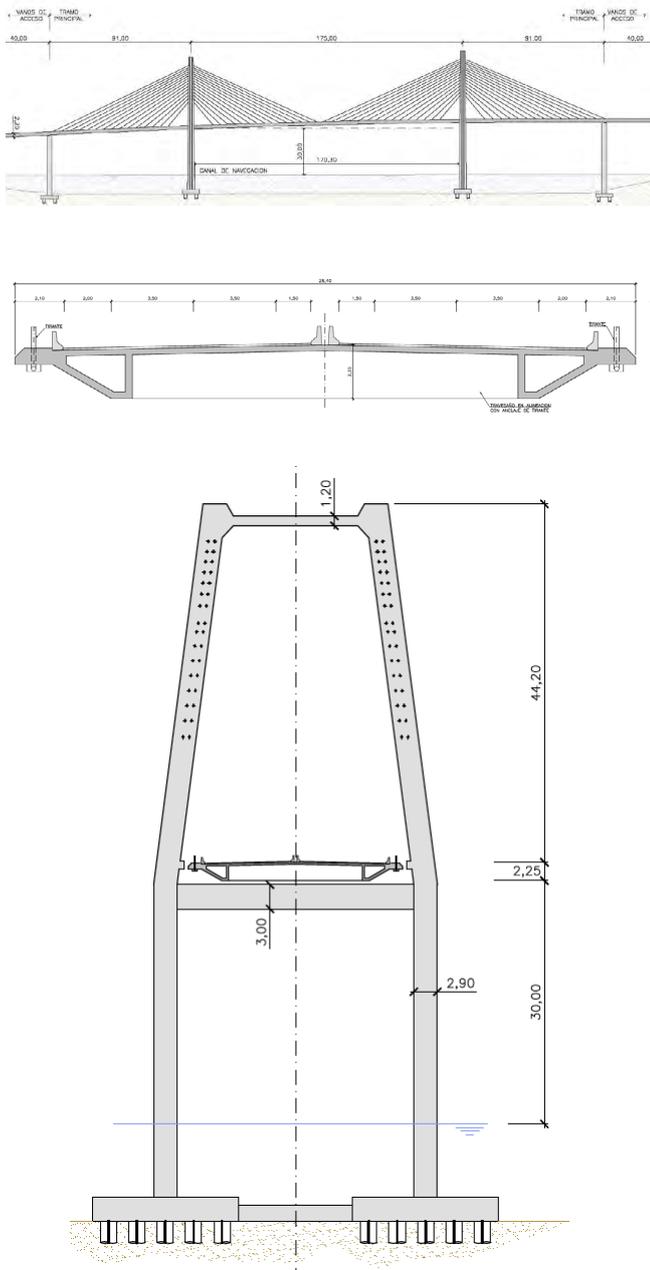


Figura 4. Variante 4.

2.3.5. Variante 5 – Puente extradadoso

Esta tipología en principio se adaptaría mejor a la luz del vano principal propuesto que las soluciones atirantadas. Se plantea así una solución extradadosa de 178 m de luz, contablero de canto mínimo 3.40 m (L/52) en centro de vano y de canto máximo en apoyos 5.50 m (L/32). En relación a la solución atirantada permite abaratar costes al poder usar cables de pretensado convencional, aunque, por otra parte, al ser más tendidos pierden eficacia y se destinarían solo a resistir acciones permanentes, debiendo disponerse una sección de canto suficiente como para resistir las sobrecargas de tráfico. La sección transversal del tablero se diseña con la misma filosofía que la Variante 2, cajón central y voladizos apoyados en jabalcones.

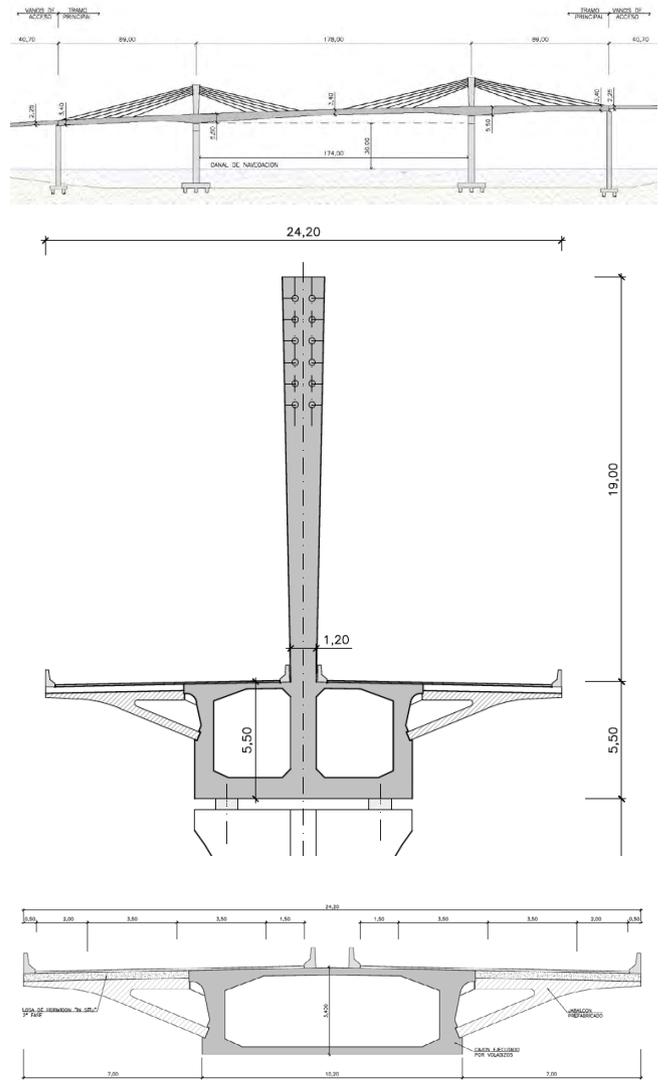


Figura 5. Variante 5.

2.3.6. Variante 6 – Arco metálico de tablero inferior

Arco de tablero inferior tipo Bowstring de 175 m de luz, autoequilibrado frente a acciones verticales por el tirante inferior que materializa el propio tablero, de tal forma que los efectos introducidos sobre las pilas bajo carga permanente son únicamente verticales. La flecha propuesta para el arco es de 33.0 m, lo que supone una relación flecha luz de $f/L = 5.40$. El arco está compuesto por dos planos verticales independientes arriostrados entre sí frente a los efectos de la inestabilidad fuera de su plano. La sección del tablero planteada está compuesta por 2 cordones principales longitudinales donde se anclan las péndolas y de donde se apoyarán los travesaños que reciben el peso de la losa de compresión que conforma la plataforma.

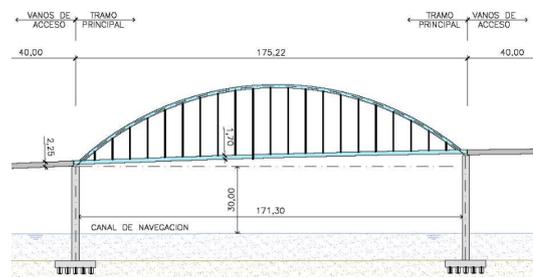


Figura 6. Variante 6.

2.3.7. Variante 7 – Viga en celosía metálica

La solución propuesta consiste en una viga continua en celosía tipo Warren mixta de canto constante 9.00 m ($L/20$), planteando una secuencia repetitiva de vanos de 100.0 m de luz, adyacentes al vano principal de 180.0 m, y terminando en vanos de compensación de 85 m. Se plantea que sea ejecutada mediante empuje desde ambas orillas del río hasta unirse en el centro del vano principal. Presenta como principal ventaja la reducción de la subestructura necesaria en los vanos de acceso. La sección tipo del tablero es rectangular 14.90x9.00 m, y está conformada por los cordones longitudinales de la celosía, por los travesaños que sirven de apoyo a la losa de compresión dispuesta sobre la celosía, y por los arriostramientos del cordón inferior. La losa de compresión se conectará a la perflería de la celosía mediante pernos conectadores.

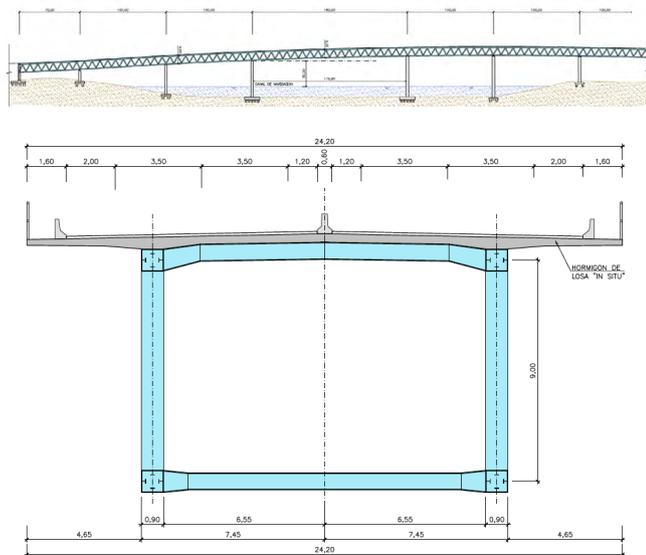


Figura 7. Variante 7.

2.3.8. Selección de variantes y alternativas finales a desarrollar

Del conjunto de alternativas preliminares anteriormente expuestas se procedió a descartar, por los motivos que se indican a continuación, las siguientes:

- Variantes 6 y 7: al no ser la estructura metálica habitual en Paraguay, estas soluciones se condicionarían enormemente a la importación de mano de obra y maquinaria auxiliar muy especializada.
- Variante 1: dos tableros representan mayor coste de mantenimiento y doble coste en subestructura frente a un tablero único.

- Variante 5: compleja de diseño y construcción y así como con menor impacto estético que una atirantada. Igualmente la menor experiencia en puentes así ejecutados, llevaría a un posible riesgo tanto en su ejecución como en la de estimación de su coste.
- Variante 3: el doble pilono presenta estéticamente una simetría que aventaja a la solución de pilono único para este entorno.

Por tanto, el estudio finalmente quedó centrado en las dos alternativas siguientes:

- Solución de cajón único: es la que mejor se adapta técnica y económicamente al problema. No dispone en cambio de los matices formales diferenciadores que son deseados en el puente principal por la Propiedad.
- Solución atirantada con dos pilonos: para mejorar la ventaja sobre el pilono único y que la solución atirantada tenga sentido estructural, se planteó que la luz principal fuese aumentada de 180 m a 260 m, con la intención de buscar con este puente una referencia visual del paso del río Paraguay por Asunción.

3. TABLERO EN SECCIÓN CAJÓN ÚNICO

Esta alternativa consiste en un tablero en sección cajón único, de 3 vanos de 90.00+180.00+90.00 m, resultando una longitud final de 360.00 m. El tablero es de canto variable desde 9.00 m en apoyos hasta 4.00 m en centro de vano y en los apoyos extremos.

La sección de tablero se constituye por un cajón principal central que aporta la capacidad resistente a flexión longitudinal y que se ejecuta mediante voladizos sucesivos desde ambas pilas. Dispone de un ancho de la losa inferior de 9.00 m y un ancho de la losa superior de 10.60 m. Los espesores dispuestos son 0.40 m constante en losa superior, variable de 0.50 m en centro de vano a 0.60 m en apoyos para las almas verticales y variable de 0.40 m en centro de vano a 1.20 m sobre apoyos para la losa inferior.

Para conformar el ancho completo de 28.45 m de la calzada doble, se amplía el cajón central mediante jабalcones prefabricados de geometría constante, adosados a los costados del cajón cada 3.50 m, y sobre ellos se disponen prelosas prefabricadas sobre las que hormigonar la losa de compresión de 0.25 m de espesor. Cada jабalcón se conecta al cajón apoyando

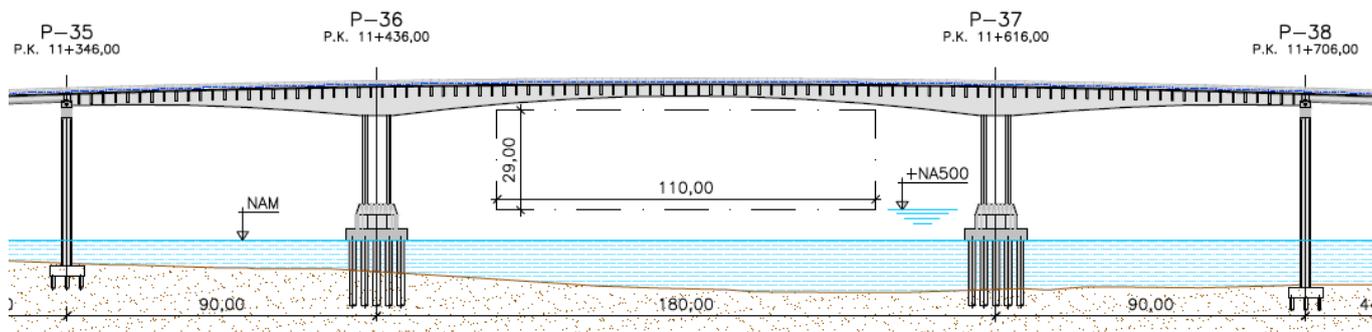
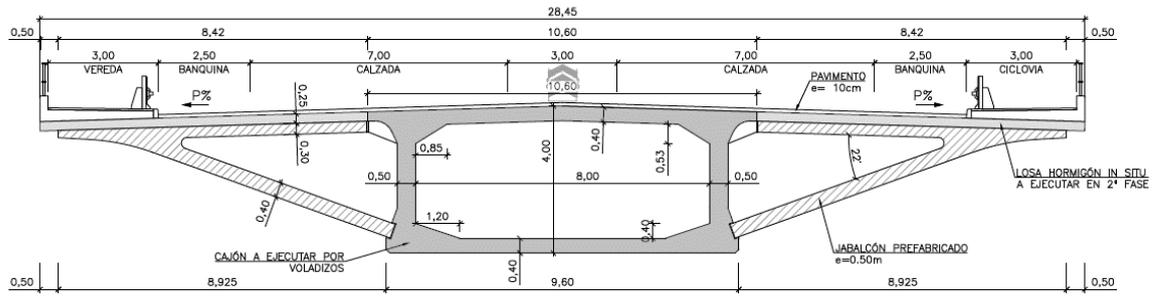
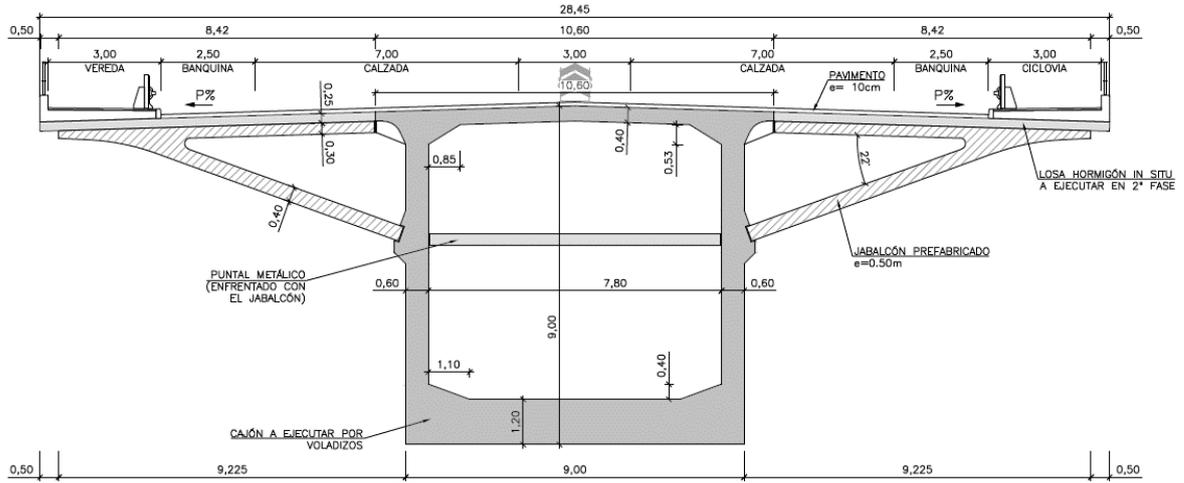


Figura 8. Solución alternativa con cajón único.



SECCIÓN TIPO CENTRO DE VANO (C=4.00m)



SECCIÓN TIPO CANTO MÁXIMO (C=9.00m)

Figura 9. Secciones transversales viga-cajón.

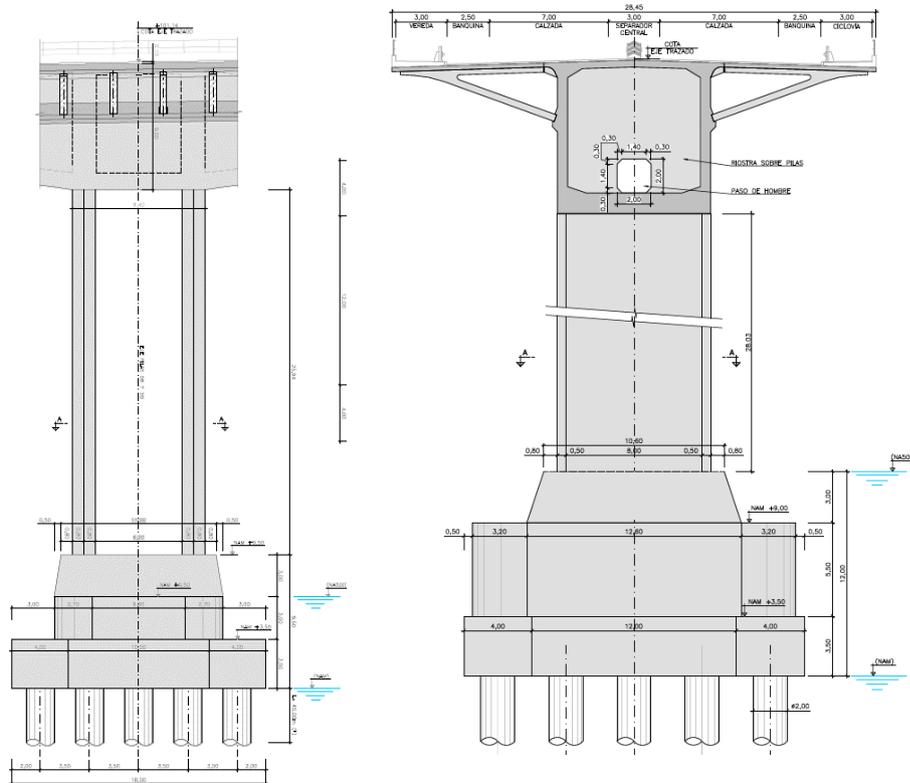


Figura 10. Alzados frontal y lateral de pila.

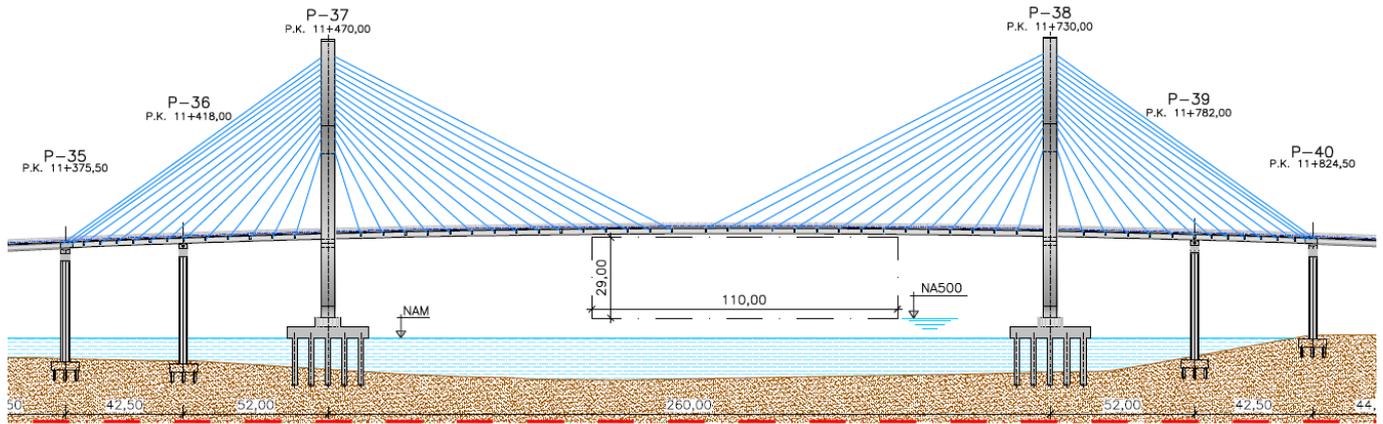


Figura 11. Solución alternativa puente atirantado de doble pilono.

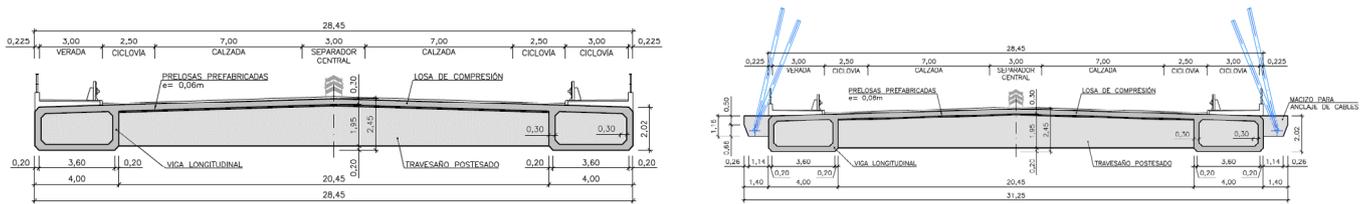


Figura 12. Sección transversal tipo y por zona de anclajes.

simplemente su pata inferior y mediante barras pretensadas su pata superior. Al ser los jabalones de geometría constante, en las secciones del cajón que es necesario apoyar las patas inferiores de los mismos sobre las almas se disponen puntales metálicos horizontales que conectan ambos pies, autoequilibrando los empujes horizontales inducidos y anulando el efecto sobre las almas.

Las pilas se componen de dos tabiques de 9.00x1.60 m de sección mínima. Dichos tabiques se empotran en el tablero mediante sendas riostras que permiten a la pila garantizar el equilibrio ante el descentramiento de cargas durante la ejecución de cada dovela. La cimentación de estas pilas se diseña mediante encepados de 25 pilotes de diámetro 2.00 m y 42.0 m de longitud. Sobre el encepado de estos pilotes se prevé un tajamar para proteger la pila del impacto de embarcaciones.

4. PUENTE ATIRANTADO DE DOBLE PILONO

Esta solución consiste en un tablero atirantado desde dos pilonos, con una luz principal de 260.0 m y unos vanos de compensación de 94.50 m., resultando una longitud total de tablero de 449 m. El canto del tablero se propone constante en toda la longitud de valor 2.45 m.

El atirantamiento propuesto es en abanico con dos planos de tirantes que arrancan de ambos bordes del tablero. El esquema estructural propuesto para este elemento consiste en disponer dos vigas cajón longitudinales postesadas de dimensiones 4.00x2.00 m y paredes de espesor 0.40 m, sobre las que se apoyan una serie de travesaños cada 2.00 m, tam-

bién postesados, conformándose así el emparrillado resistente principal. El canto de los travesaños es 2.00 m y su espesor 0.40 m, estando previsto disponer sobre ellos prelasas prefabricadas sobre las que hormigonar la losa de compresión de 0.25 m de espesor.

Tablero y pilas se vinculan coaccionando el movimiento vertical con apoyos tipo POT y transversalmente con neoprenos que actúan como topes, al disponerse entre la riostra de apoyo del tablero y unos recrecidos dejados a tal efecto en los pilonos. El tablero se fija longitudinalmente a uno de los pilonos y se le permite moverse longitudinalmente, tanto sobre el otro pilono como sobre las pilas extremas. Cuando se ejecuten las primeras dovelas sobre el pilono, y mientras no se alcancen los primeros cables, se requerirá una vinculación adicional provisional, materializada mediante el uso de torres metálicas que permitan apoyar los vanos iniciales en voladizo.

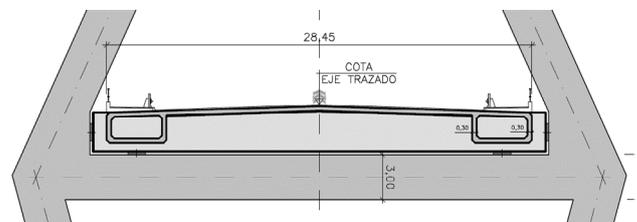


Figura 13. Vinculación tablero - pilono.

Las dovelas propuestas ejecutar son de 8.00 m de longitud, anclándose cada pareja de cables 2.00 m por detrás de cada frente de fase. Así resulta necesario disponer un total de 15 cables en cada plano. El primer cable se anclará a una distancia de aproximadamente 12.00 m del eje del pilono, quedando esa zona inicial simplemente apoyada sobre él.

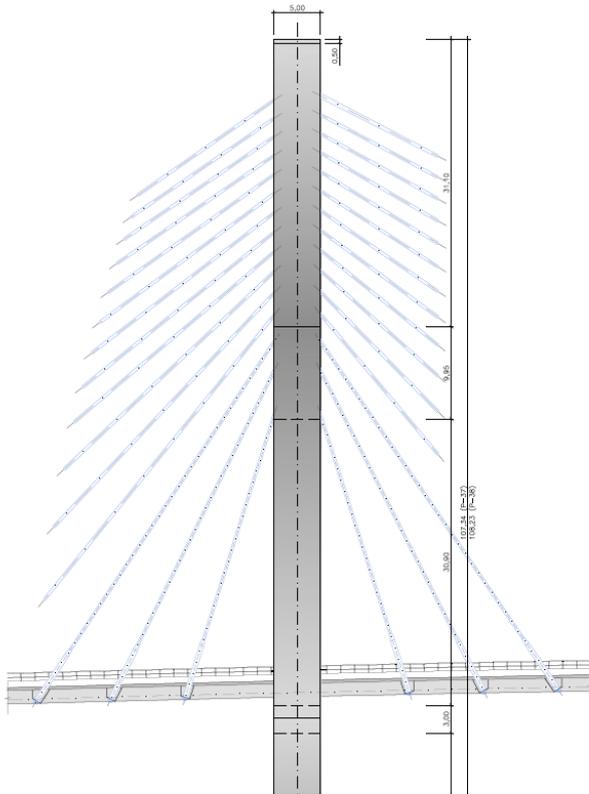


Figura 14. Anclaje de cables a pylon y en arranque de tablero.

En base a consideraciones de tipo estético y formal el Cliente sugirió el diseño de un pylon que quedara rematado por un fuste único. Con este condicionante, y dado el gran ancho del tablero, resultaba inadecuado plantear un pylon en A, al generarse una separación muy grande entre fustes a nivel de cimentación. Es por ello que la solución elegida es un pylon compuesto por un gran diamante, en cuya diagonal horizontal se materializa el travesaño que sirve de apoyo al tablero y de cuyo vértice superior arranca un mástil de hormigón de sección 5.00x3.00 m, donde quedan anclados todos los cables, tanto del vano de compensación como del principal. Los brazos inferiores del diamante que contornean el tablero, hasta alcanzar una altura de 59.60m respecto de la cara superior de la cimentación, son también de sección 5.00x3.00 m.



Figura 15. Imagen del atirantamiento visto desde la calzada.

El esquema estructural incorpora pilas intermedias en los vanos de acompañamiento que se anclan al tablero, tanto durante las fases de ejecución como de servicio. De esta forma se consigue repartir el efecto de la retenida, que es necesario materializar para garantizar el equilibrio frente a las sobrecargas aplicadas sobre el vano principal, lo que es imperativo dada la baja capacidad portante del terreno. Por otra parte, al materializar estos puntos fijos en el tablero, que a su vez quedan conectados mediante los cables traseros al pylon, se consigue rigidizar este último elemento, permitiendo ajustar sus dimensiones.

El apoyo de los pilonos se realiza, de forma similar al caso de la solución de viga cajón, sobre un encepado de pilotes que soporta un tajamar o protección contra impactos de embarcaciones, del que arrancan los fustes del pylon. En concreto, en este caso se plantea un encepado de 26 pilotes de $\varnothing 2.00$ m y longitud 45.00 m.

El proceso constructivo se compone de las fases siguientes:

- Ejecución de cimentaciones
- Ejecución de alzados de pilonos
- Ejecución del tablero: Las primeras dovelas quedan en voladizo ya que no se dispondrá ningún anclaje de tirantes sobre las mismas, por lo que deberán ser apeadas, bien mediante alguna estructura auxiliar, bien mediante tirantes provisionales. Una vez superada esta fase, el tablero se ejecuta como sucesión continua de dovelas con ayuda de carro de avance a ambos lados del pylon. Al llegar a las pilas de retenida la conexión con el tablero se realiza mediante pretensado vertical. El proceso finaliza con la ejecución de las riostras en pilas extremas una vez colocados los cables de retenida y hormigonada la dovela de cierre.

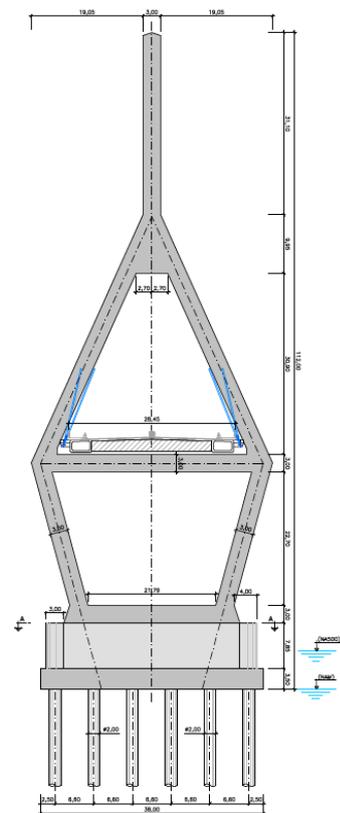


Figura 16. Geometría en alzado de los pilonos.



Figura 17. Imagen futura del puente atirantado una vez construido y ya en servicio.

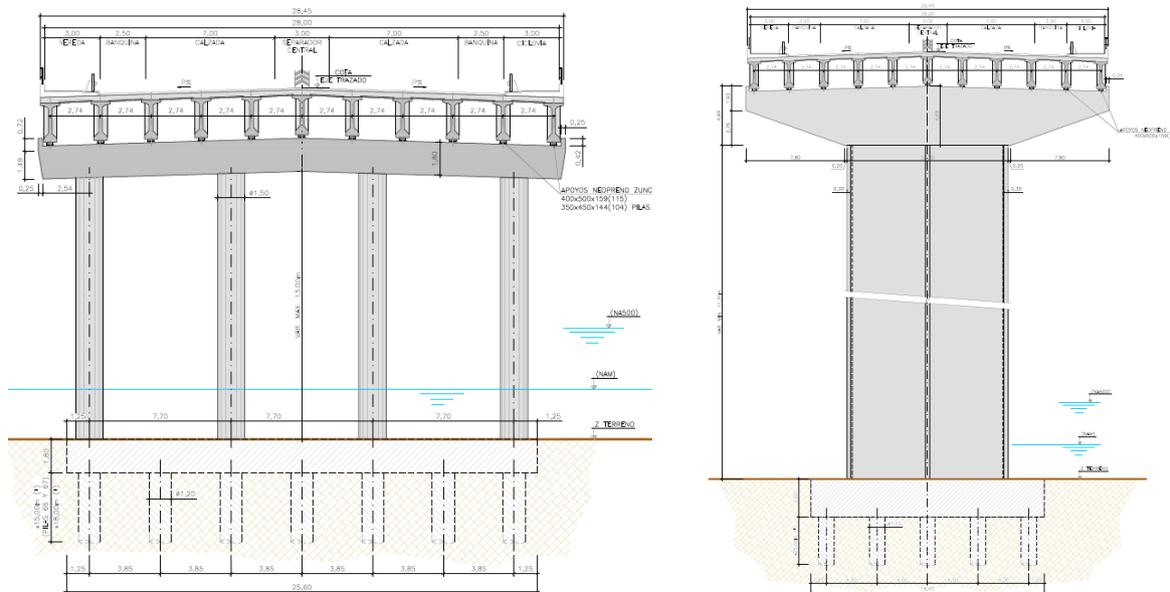


Figura 18. Alzados frontales de pilas de los vanos de acceso.

5. VANOS DE ACCESO AL PUENTE PRINCIPAL

Para los vanos de acceso al puente principal se adopta una solución basada en una sucesión de tableros de vigas prefabricadas de hormigón con luces de entre 44.50 m y 38.50 m. Los tableros se constituyen por un número variable de vigas, dependiendo del ancho de calzada de entre 5 y 11, y una losa de compresión de 0.25 m de espesor. Las vigas se diseñan postesadas y con un canto de 2.15 m, planteándose su colocación mediante lanzador.

Las pilas se diseñan con diferente tipología en función de su altura: para las de altura menor se prevén pilas pórtico de cuatro fustes, cimentadas mediante encepados con una o dos alineaciones, de 8 y 7 pilotes. Cuando la altura de pilas ya es elevada, por encontrarse en las proximidades del puente principal, se utilizan fustes en cajón de doble célula con paredes de 0.40 m de espesor y dimensiones totales 12.70x3.80 m, rematados por un capitel en forma de marti-

llo de canto máximo 4.70 m. La cimentación de este tipo de pilas se realiza mediante encepados.

6. CONCLUSIONES

Del estudio realizado se desprende que para la construcción del nuevo puente sobre el río Paraguay en Asunción existi-

rían dos alternativas que se ajustarían a los requisitos exigidos por el M.O.P.C. Ambas son tipologías bien conocidas técnicamente: por un lado, la de voladizos sucesivos, que se ajusta más a los precedentes existentes en la zona de estudio y cuyo coste está más ajustado. Por otra parte, la solución de puente atirantado cumple mejor con el requisito de conseguir un elemento visual y estético diferenciador, para la nueva entrada a la capital del estado. Finalmente la decisión adoptada se decantó por esta segunda solución.



Figura 19. Imagen del enlace del viaducto de acceso del lado Asunción con el viario existente.