

Puente Bioceánico entre Paraguay (Carmelo Peralta) y Brasil (Porto Murtinho)

Bioceanic Bridge between Paraguay (Carmelo Peralta) and Brazil (Porto Murtinho)

Guillermo Capellán Miguel^a, Santiago Guerra Soto^b, José Luis Pando Anta^c y
Miguel Gulías García^d

^a Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Arenas & Asociados. Director Técnico. gcapellan@arenasing.com

^b Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Arenas & Asociados. Director Internacional. sguerra@arenasing.com

^c Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Arenas & Asociados. Director Oficina Perú. jlpando@arenasing.com

^d Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Arenas & Asociados. Ingeniero de Estructuras. mgulias@arenasing.com

RESUMEN

En esta comunicación se presenta el diseño del Puente de la Biocéánica que cruza sobre el río Paraguay entre las localidades de Carmelo Peralta y Porto Murtinho. Se trata de un puente atirantado de 350 m de luz central, con tablero y pilonos de hormigón, y doble plano de tirantes. El elemento más representativo del diseño son los pilonos, en forma de H, que alcanzan una altura de 125 m sobre el terreno. Una vez finalice su construcción, se convertirá en uno de los puentes de mayor luz de Sudamérica.

ABSTRACT

This paper comprises the design of the Bioceanic Route Bridge that crosses the Paraguay River between the towns of Carmelo Peralta and Porto Murtinho. It is a cable-stayed bridge with a central span of 350 m, with concrete deck and pylons, and double plane of stays. The most representative element of the design are the H-shaped pylons, which reach a height of 125 m above the ground. Once finished, it will become one of the longest-span bridges in South America.

PALABRAS CLAVE: puente atirantado, hormigón, Infraestructuras Clave, Paraguay, Brasil.

KEYWORDS: cable-stayed bridge, concrete, key infrastructures, Paraguay, Brazil.

1. Antecedentes

El proyecto de la Ruta Bioceánica comunica por carretera los puertos chilenos de Antofagasta e Iquique en el Océano Pacífico con el puerto brasileño de Santos, en el Océano Atlántico. Con una longitud aproximada de 2200 km, esta ruta permitirá reducir el periodo de transporte de mercancías entre los puertos a tres días, frente a los trece que se demoran actualmente los transportes marinos por el Cabo de Hornos.

El principal obstáculo natural dentro de esta ruta es el Río Paraguay, la Ruta Bioceánica

cruzará este río entre las localidades de Carmelo Peralta (Paraguay) y Porto Murtinho (Brasil) a través del Puente Bioceánico.

El Consorcio PROINTEC, formado por PROSUL, INEXSA e INTEC fue el adjudicatario de la redacción de los estudios de Factibilidad, Diseño Final de Ingeniería y Fiscalización de las obras del Puente de la Bioceánica, encargando a la empresa Arenas & Asociados las labores de Diseño y Fiscalización del Puente.

La entidad contratante de los estudios y construcción del puente es el MOPC (Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones de Paraguay), y los trabajos están financiados por la Entidad Binacional Itaipú, margen paraguaya.

En los últimos años se han construido en Sudamérica varios puentes atirantados, en la

Tabla 1 se muestra un listado de algunos puentes destacados concluidos en los últimos 10 años; el Puente de la Bioceánica con sus 350 m de luz principal se encontrará entre los puentes de mayor luz de entre los terminados en los últimos años.

Tabla 1. Puentes atirantados en Sudamérica

Puente	País	Localización	Luz (m)	Finalización
Puente del Atlántico	Panamá	Colón	530	2019
Puente de la Integración Brasil-Paraguay	Brasil-Paraguay	Río Paraná	470	2024
Puente Pumarejo	Colombia	Río Magdalena	380	2019
Puente Mercosur	Venezuela	Guarico	360	2017
Puente Héroes del Chaco	Paraguay	Asunción	300	2024
Viaducto Provincial	Colombia	Bucaramanga	270	2015
Puente Nanay	Perú	Iquitos	241.5	2017
Ponte Jorge Amado	Brasil	Bahía de Pontal	149	2020
Av. Ayrton Senna	Brasil	Río de Janeiro	130	2014
Puente atirantado de Curitiba	Brasil	Curitiba	129	2014
Puente Monseñor Francisco Miranda	Argentina	Villa Mercedes	100	2014

2. Condicionantes al diseño

2.1. Punto de cruce

Una de las primeras labores del Estudio de Factibilidad fue la elección del punto de cruce del puente dentro del área de estudio. Para ello se plantearon un total de 18 alternativas, sobre las que se realizó un análisis multicriterio, a fin de elegir aquella que presentase un mejor desempeño.

Dentro del análisis multicriterio se valoraron los siguientes aspectos: longitud del trazado, anchura del río en el punto de cruce, expropiaciones, afección a la vegetación, oblicuidad del trazado respecto al río y presencia de zonas con dificultades geotécnicas (presencia de humedales).

En el corredor más adecuado para realizar el cruce el río presenta un ancho medio de 300 m, resultando una luz central de 350 m, para no invadir el cauce del río, evitando condicionar

el canal de navegación, así como colisiones de embarcaciones con la subestructura del puente, además de facilitar la construcción de las cimentaciones, al no necesitar el empleo de medios fluviales para su ejecución.

2.2. Gálibo hidráulico

El Río Paraguay junto con el Río Paraná forman un eje logístico fundamental para la Economía del Paraguay, estimándose que el 70% de las exportaciones del país se realizan a través de este Corredor Fluvial.

Garantizar la navegabilidad del río Paraguay era uno de los factores principales para la definición del Puente de la Bioceánica, así en los Términos de Referencia se solicitaba que la distancia entre el nivel de aguas máximas y base de la viga del puente en su vano principal debería ser de 22 m, asegurando la navegabilidad del Río Paraguay en cualquier condición hidrológica y con embarcaciones operantes y a operar.

Como parte del Estudio de Factibilidad, se realizó un Estudio de Navegabilidad, en coordinación con las Autoridades implicadas en la explotación de la Hidrovía. Fruto de esta coordinación, el gálibo vertical se elevó hasta 29 m, en un canal de navegación de 195 m de ancho sobre el nivel del río correspondiente a un periodo de retorno de 100 años.

2.3. Experiencias previas en Paraguay

En los últimos años se han construido en Paraguay dos puentes atirantados importantes, el Puente de Integración, ubicado en Ciudad del Este, y el Puente Héroes del Chaco, ubicado en Asunción.

Es de destacar que en Paraguay hay poca experiencia en el trabajo con estructuras metálicas, y la mayor parte de los puentes y estructuras del país están ejecutados en hormigón. La excepción es el Puente de Integración, diseñado y ejecutado por empresas brasileñas, que cuenta con un tablero mixto.

3. Diseño del puente

3.1. Concepción general

Atendiendo a la experiencia local en lo que respecta al empleo de materiales, y buscando potenciar la durabilidad del puente, la estructura se ha diseñado en hormigón, con excepción de algunos elementos secundarios en acero.

El puente se divide en 3 tramos diferenciados, el puente central atirantado de 625 m de longitud, y los viaductos de acceso por los lados paraguayo y brasileño, de 300 y 360 m de longitud respectivamente.

El puente atirantado central cuenta con un vano principal de 350 m, y vanos laterales de 137.7 m, aproximadamente un 40% de la luz principal.

El puente se diseña con un doble plano de tirantes, con pilonos en forma de H, con una altura de 125 m sobre el nivel del terreno, y 96 m sobre el nivel del tablero.

En los vanos laterales se disponen tres pilas de retenida en cada uno, a fin de mejorar el comportamiento estructural del puente, tanto en fase de construcción, como en servicio, reduciendo la deformabilidad del vano central del tablero.

El tablero tiene un ancho total de 20.1 m, y dará servicio a 2 carriles de 3.60 m, con arcenes de 3.00 m, y aceras de 1.70 m, además de los espacios reservados para las barreras, barandillas, tirantes y borde aerodinámico.

Los viaductos de accesos se diseñan como puentes de vigas, con luces típicas de 30 m, contando como elemento singular las pilas, en forma de π , que dan continuidad formal entre el puente atirantado y los viaductos de acceso.

En la **Figura 1** se presenta una infografía del puente terminado.



Figura 1. Infografía del puente

3.2. Diseño paramétrico

La geometría del puente se encajó usando el apoyo del diseño paramétrico, a través del software Rhinoceros-Grasshopper.

El uso del diseño paramétrico se utilizó no sólo para obtener la definición geométrica del puente y plasmarla en planos, sino también para enlazarla al programa de análisis estructural empleado en la verificación del adecuando comportamiento del puente según los requisitos del Código AASHTO LRFD 2020.

3.3. Viaductos de acceso

Los viaductos de acceso se diseñaron con tableros de vigas pretensas de 30 m de longitud, aprovechando la experiencia de las empresas paraguayas en prefabricación de vigas de esas dimensiones.

Asimismo, la dimensión de 30 m es adecuada para que las vigas puedan ser transportadas desde su lugar de producción hasta la implantación en obra, ya sea por vía fluvial o carretera, así como para ser instaladas en obra con medios disponibles en el país.

Las vigas tienen un canto de 1.70 m, y se colocan separadas 2.50 m entre ejes, sobre las vigas se dispone una losa de hormigón armado de 27 cm de canto, formada por prelosas de 7 cm, y hormigón in situ hasta completar el canto total.

En el tablero se disponen juntas de dilatación de hormigón elastomérico, modulando el tablero en tramos de 60 o 90 metros.

Las pilas se han diseñado para darle una continuidad formal al puente atirantado, empleando una sección pentagonal con un rehundido en su vértice lateral, esta sección pentagonal con rehundido se mantiene en todos los elementos portantes verticales de la subestructura.

Las pilas tienen forma de π , con 2 fustes verticales de sección variable, y un dintel en cabeza. La altura de las pilas varía entre 14.7 y

25.7 m, siendo en todas ellas idéntica la parte superior (dintel y parte superior de los fustes), variando sólo la parte inferior de los fustes en función de la altura de la pila. El canto variable de las pilas hace que las mismas se adapten perfectamente a la variación de esfuerzos como efecto de su diferente altura (ver Figura 2).



Figura 2. Vista 3D de un vano típico del viaducto

3.4. Tablero puente atirantado

La sección tipo del tablero tiene un ancho total de 20.10 m, y un canto máximo en el centro de 1.85 m. Está formada por dos nervios longitudinales, aligerados en el vano central, y macizos en el vano de retenida, unidos por una losa de 27 cm de espesor, contando con vigas transversales cada 5 cm. En la Figura 3 se presenta una vista típica de una de las dovelas centrales del tablero.



Figura 3. Vista 3D de tramo típico de tablero

Tanto los nervios longitudinales, como las vigas transversales, se diseñan como elementos de hormigón postensado.

Se planteó la construcción del tablero por el método de los voladizos sucesivos, con una longitud de dovela de 10 m.

El postensado longitudinal del puente, y los tirantes se dimensionaron de forma de que en las combinaciones de carga para la verificación de tracciones en elementos postensados (Servicio III en especificaciones AASHTO), la mayor parte de los nervios se encontrasen comprimidos. En las siguientes figuras se presentan las envolventes de tensiones en los nervios para la combinación Servicio III, donde puede comprobarse que la práctica totalidad del tablero se encuentra comprimido, y sólo aparecen unas mínimas tracciones (0.9 MPa) en la fibra inferior de la dovela de cierre.

Los vanos laterales del tramo atirantado del puente tienen una longitud de 141 m, disponiendo 3 pilas de retenida que tienen un impacto positivo en el comportamiento estructural del puente.

La última de las pilas, es doble, ya que en ella apoyan tanto las vigas de los viaductos de accesos como el tablero del puente atirantado.

En cuanto a su geometría, se mantiene la continuidad formal con los pilonos y pilares del viaducto, conservando la sección pentagonal con el rehundido en el vértice exterior, presente en pilas del viaducto y pilono, así como el zócalo en la base y el dintel en la cabeza, dotados de acuerdos circulares, de manera análoga al diseño geométrico del pilono (ver **Figura 4** y **Figura 5**).

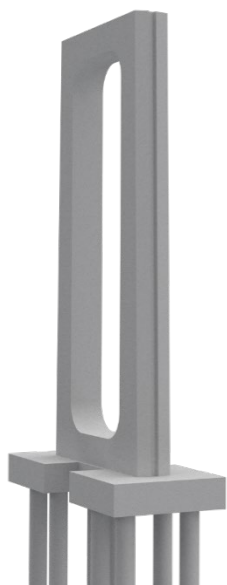


Figura 4. Vista 3D de pila de retenida

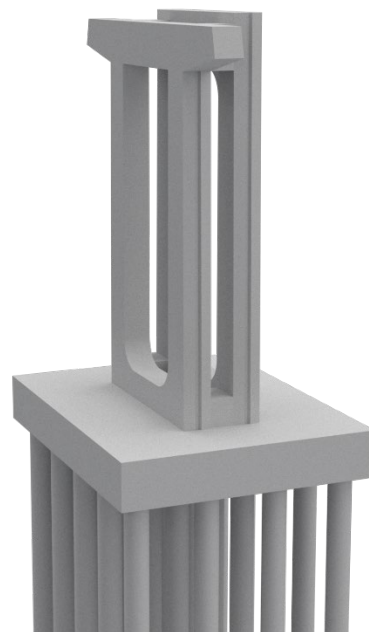


Figura 5. Vista 3D de pila común

Desde el punto de vista del comportamiento estructural, estas pilas de retenida cumplen con varias misiones, aportando las siguientes ventajas al comportamiento estructural del puente:

Sirven como puntos de anclaje del pilono: los tirantes que unen las pilas de retenida con los mástiles del pilono limitan la deformabilidad longitudinal de los mástiles, lo que a su vez limita la deformación vertical del vano central del tablero frente a la acción de las cargas de uso. Esto permite realizar un diseño más esbelto tanto de los mástiles como del tablero, con el consiguiente ahorro de materiales.

Se limita el rango de tensiones de fatiga en los tirantes de retenida: en los puentes con retenida única en la última pila, el rango de tensiones de fatiga en los tirantes extremos es muy alto lo que requiere mayores secciones de cable. En algunas hipótesis de cálculo las pilas de retenida llegan a entrar en tracción, por lo que las mismas se diseñaron con un pretensado vertical, de forma que el hormigón de las pilas siempre esté comprimido.

En la **Figura 6** se presenta la envolvente de esfuerzos axiales en servicio para las pilas de retenida intermedias del lado paraguayo, donde se aprecia que se llegan a alcanzar tracciones de hasta 4 170 kN.

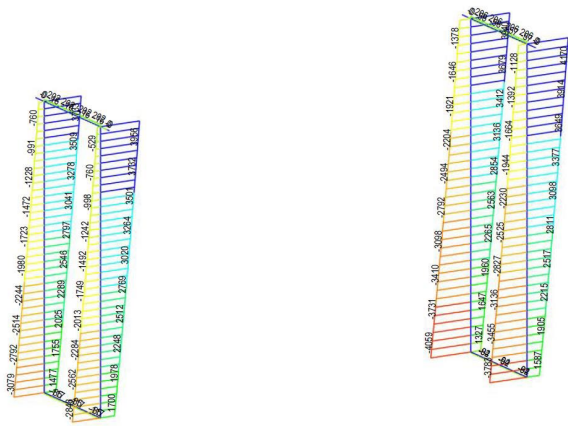


Figura 6. Esfuerzos axiales en servicio en pilas de retenida intermedias

En cuanto a la vinculación de las pilas y el tablero, se cuenta con 3 elementos: un tope transversal guiado (llave de corte) que transmite las cargas horizontales perpendiculares al eje del puente, unos apoyos esféricos verticales que transmiten las cargas de compresión entre el tablero y las pilas, y unos apoyos invertidos, formados por unas estructuras metálicas ancladas a pilonos y pilas y 2 apoyos esféricos, que transmiten las cargas de tracción (ver **Figura 7**). Esta disposición de apoyos se diseñó como alternativa a la disposición de aparatos de apoyo antilevantamiento.

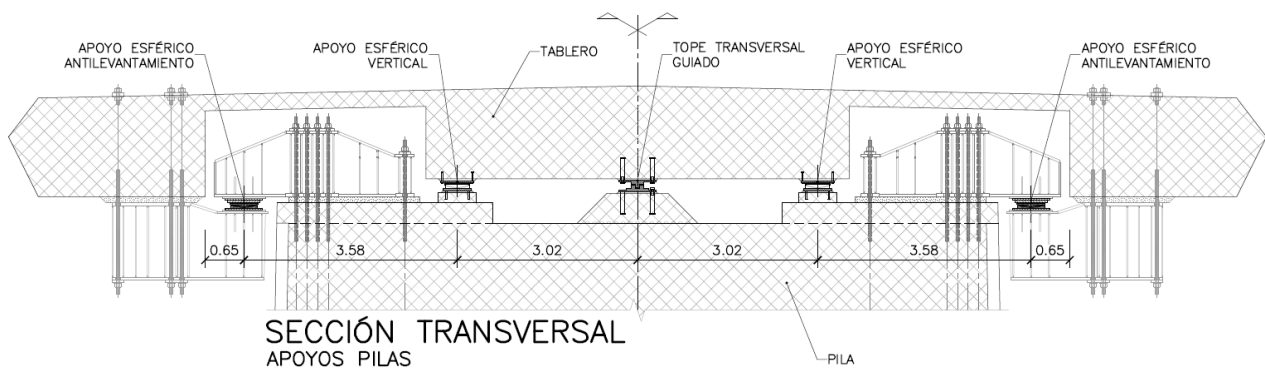


Figura 7. Esquema de apoyos en pila de retenida

3.6. Pilonos

3.6.1. Descripción geométrica

Los pilonos en H son el elemento más representativo del diseño del puente, alcanzando una altura máxima de 125 m sobre el terreno, y contando con 2 vigas transversales, la primera bajo el nivel del tablero, a unos 30 m de altura, y la segunda a unos 75 m de altura, punto a partir del que se empiezan a disponer los anclajes de los tirantes en los mástiles del pilono. Los puntos de encuentro en los soportes verticales y las vigas transversales se rematan con un acuerdo circular para dar continuidad y suavizar la macla entre las partes estructurales del pilono. Adicionalmente a las vigas transversales, a nivel del terreno se dispone un zócalo no estructural que da unidad formal en la parte inferior de las patas del pilono.

Las patas del pilono son inclinadas desde el encepado hasta el nivel de la segunda viga travesaño, punto a partir del cual pasan a ser verticales.

La **Figura 8** presenta una vista en 3 dimensiones de uno de los pilonos.

La sección de las patas del pilono es pentagonal hueca, con un rehundido en su vértice exterior, su ancho y canto se adapta a las leyes de esfuerzos; así el ancho de la sección, medido en la dirección del eje del puente, varía desde 7.0 m en la sección de la cimentación hasta 5.0 m a la altura del primer travesaño, mientras que el canto, medido en la dirección perpendicular al eje del puente, varía entre 4.10 y 2.70 m. A partir de la primera viga transversal la sección pasa a ser constante, aunque varía el espesor de las paredes según la zona.



Figura 8. Vista 3D del pilono

Los pilonos son visitables por su interior desde el nivel del tablero hasta su parte superior, donde se ha proyectado un observatorio climático como soporte a la explotación del puente. El acceso se lleva a cabo con la ayuda de una escalera interior que además permite las labores de inspección y mantenimiento de los tirantes anclados al pilono.

Las torres se cimentan sobre encepados de 16x22x4 metros, cada uno de ellos apoyado sobre 12 pilotes de 2.0 m de diámetro y empotrados en el substrato rocoso.

3.6.2. Cálculo estructural del pilono

Para el análisis de la estructura se realizó un modelo de elementos finitos con el software comercial MIDAS CIVIL v2016. Se modeló de forma completa todo el proceso constructivo, para considerar los efectos de sismo, viento, caída del carro, etc. durante cualquier situación del puente a lo largo de su construcción, así como las situaciones en servicio con el puente ya terminado, y acciones accidentales, como la rotura de tirantes.

El análisis de todas las fases del proceso constructivo fue clave para identificar algunas situaciones que, bajo las condiciones definidas para el proyecto, eran dimensionantes. Por ejemplo, la armadura de refuerzo en gran parte de la longitud del pilono está condicionada por la situación accidental durante la construcción de la caída del carro de avance.

La **Figura 9** muestra, a modo de resumen, los distintos coeficientes de seguridad a flexión obtenidos para las todas combinaciones de diseño a lo largo de la altura de la torre, incluyendo, en color verde, la envolvente de todas ellas.

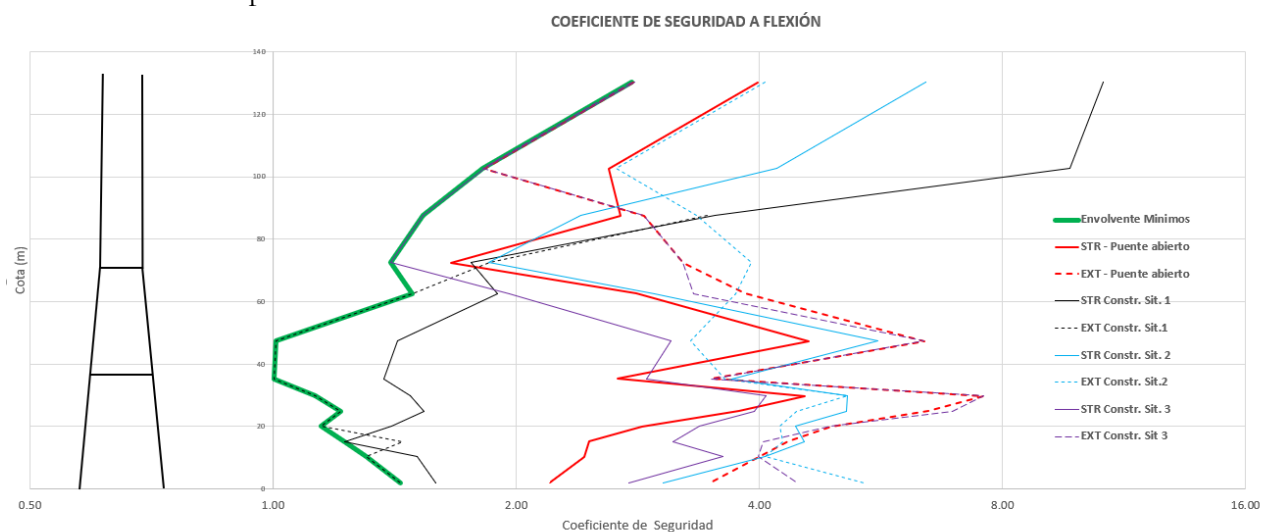


Figura 9. Coeficiente de seguridad a flexión en el pilono

Las situaciones de cálculo representadas en la figura anterior son las siguientes:

STR – Puente abierto: Combinaciones de Resistencia (ELU) con el puente en servicio.

EXT – Puente abierto: Combinaciones accidentales con el puente en servicio (rotura de tirantes).

STR Constr. Sit. 1: Combinaciones de Resistencia (ELU) durante la construcción, previo al anclaje del tablero en la primera pila de retenida.

EXT Constr. Sit. 1: Combinaciones de accidentales durante la construcción, previo al anclaje del tablero en la primera pila de retenida.

STR Constr. Sit. 2: Combinaciones de Resistencia (ELU) durante la construcción, previo al anclaje del tablero en la segunda pila de retenida.

EXT Constr. Sit. 2: Combinaciones de accidentales durante la construcción, previo al anclaje del tablero en la segunda pila de retenida.

STR Constr. Sit. 3: Combinaciones de Resistencia (ELU) durante la construcción, previo al anclaje del tablero en la pila de retenida final.

EXT Constr. Sit. 3: Combinaciones de accidentales durante la construcción, previo al anclaje del tablero en la pila de retenida final.

Del análisis de este gráfico se observa que el dimensionamiento de la armadura principal del pilono hasta la altura del segundo travesaño está condicionado por la combinación de cálculo que considera la caída accidental del carro de avance previo al anclaje del tablero en las pilas de retenida, mientras que, a partir del segundo travesaño, la armadura principal del pilono está gobernada por la combinación de cálculo que considera la rotura accidental de los tirantes.

La disposición de las pilas de retenida, por tanto, supone una ventaja importante durante la construcción del puente, ya que permite limitar los esfuerzos en el pilono en la hipótesis de caída accidental del carro de avance.

Teniendo en cuenta la esbeltez del pilono, en los cálculos se introdujeron los efectos de

segundo orden. Este análisis de segundo orden realizado tuvo en cuenta tanto la no linealidad del material como la no linealidad geométrica. La no linealidad del comportamiento del hormigón en ELU se realizó siguiendo un proceso de análisis incremental. Las cargas correspondientes a las acciones permanentes se aplicaron desde sus valores característicos hasta sus valores mayorados, y se introdujeron simultáneamente las sobrecargas de uso mediante incrementos escalonados de forma que se alcanzaron los valores de ELU en el mismo paso. En cada etapa de carga se realizaba una adaptación de la rigidez de cada una de las secciones del modelo a partir de las leyes tensión-deformación del hormigón, donde se considera la fisuración del hormigón.

Este procedimiento de cálculo no lineal incremental con adaptación en cada etapa de las rigideces de las secciones, es considerado por distintas normativas de referencia como el método más preciso para evaluar los efectos de segundo orden en estructuras de hormigón, en los que la influencia de la no linealidad del hormigón tiene una gran importancia en los resultados obtenidos.

A modo de ejemplo de los resultados de este cálculo, en la **Tabla 2** se presenta la comparación de resultados en la sección inferior del mástil entre el cálculo lineal y el cálculo no lineal. Se puede observar que los esfuerzos flectores en dirección transversal debido a los esfuerzos de segundo orden se amplifican en 1.42 veces.

Tabla 2. Comparación de resultados

Esfuerzo	Cálculo lineal	Cálculo no lineal
Axil (kN)	132 766.0	136 610.0
Momento transversal (kN·m)	107 368.0	152 268.0

En lo que respecta a la vinculación entre el pilono y el tablero, en cada uno de los pilonos se proyectaron 2 aparatos de apoyo esféricos verticales tipo antilevantamiento, y topes transversales, para transmitir las cargas horizontales a los pilonos.

En el pilono del lado brasileño se proyectaron además topes longitudinales, materializando en esta ubicación el punto fijo del puente. En el pilono del lado paraguayo del puente, además de los aparatos de apoyo verticales y topes transversales, se proyectaron transmisores de impacto (STU), de forma que para cargas rápidas (viento, frenado, sismo), los dos pilonos colaboren en la transmisión de las cargas a la cimentación.

4. Construcción del puente

La construcción del Puente Bioceánico fue adjudicada al Consorcio Pybra, formado por la empresa paraguaya Tecnoedil como líder del Consorcio, y las empresas brasileñas Cidade y Paulitec, por un presupuesto de 616 836 755 744 guaraníes, que aproximadamente equivalente a 77 104 594 euros.

Los trabajos de construcción vienen desarrollándose desde enero de 2022, estando prevista su conclusión para marzo de 2026.

El plazo originalmente previsto para las obras era de 36 meses, sin embargo, debido a las inclemencias climáticas, este plazo se ha podido aumentar hasta los 51 meses sin penalizaciones para el Contratista.

Para la construcción, manteniendo la concepción general del puente, se permitió que el Contratista realizase algunos ajustes al Diseño Original.

Estos ajustes consistieron en: reducir la longitud de la dovela a 8 m, lo que implicó aumentar el número de tirantes; sustituir el cajón metálico previsto en los pilonos para el anclaje de los tirantes por un postensado transversal del pilono; y ajuste de la sección transversal del tablero, eliminando los aligeramientos de poliestireno en el vano central, y contrapesando el tablero en los vanos laterales, para evitar reacciones negativas en las pilas de retenida, y así no ser necesario su postensado vertical.

A fecha de redacción de la presente comunicación, se han completado los viaductos

de acceso al puente atirantado, tanto en la margen paraguaya como en la margen brasileña, además de la ejecución de las pilas de retenida, a la vez que se está avanzando en la construcción de ambos pilonos, superando en ambos casos el nivel del travesaño superior y finalmente se ha hormigonado la primera de las dovelas de arranque.

En la **Figura 10**, **Figura 11** y **Figura 12** se presentan varias fotografías con el avance de la obra.



Figura 10. Viaducto de acceso

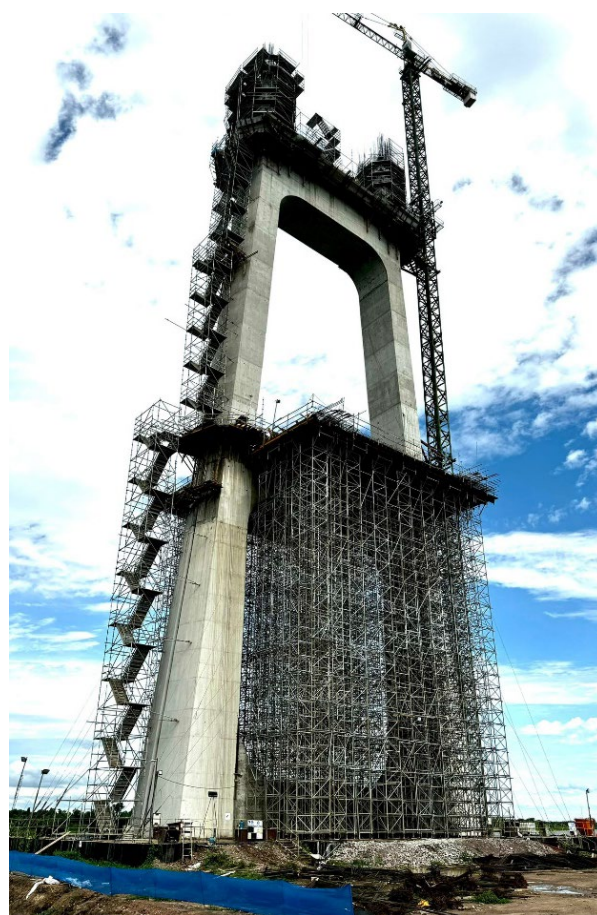


Figura 11. Pilon



Figura 12. Vista aérea del avance de obra (diciembre de 2024)

Agradecimientos

Desde Arenas & Asociados se quiere expresar el agradecimiento al Consorcio Prointec, con quienes colaboramos en la redacción del Estudio de Factibilidad, el Proyecto y la Fiscalización; al Consorcio Pybra como Contratista, al MOPC como Autoridad responsable de la Ejecución de los Trabajos, y a ITAIPÚ Binacional como financiadora de los mismos.