

PUENTE ATIRANTADO SOBRE EL RÍO CUARTO

UNA SOLUCIÓN CONSTRUCTIVA PARA PUENTES DE LUCES MEDIAS

Carlos F. Gerbaudo
M.Sc. Ing. Civil
ingroup@ingroup-op.com.ar
INGROUP Oficina de Proyectos

Resumen

En el presente trabajo se exponen los aspectos relevantes del diseño y construcción del “Nuevo Puente Sobre El Río Cuarto”, construido recientemente en la Ciudad homónima de la Provincia de Córdoba, Argentina, consistente en un puente principal atirantado con tablero de hormigón pretensado y pilas principales metálicas, con luz central de 110 m, dos vanos laterales de 50.5 m y viaductos de acceso en ambas márgenes de 51 m, resultando una longitud total de puente de 313 m.

El tablero del puente atirantado fue construido íntegramente con elementos de hormigón prefabricados, montados y ensamblados in situ con equipos convencionales sobre las propias estructuras que constituyen la infraestructura y apoyos auxiliares que garantizan la estabilidad del tablero durante la etapa constructiva.

Las pilas principales del puente se componen de un tramo inferior de hormigón armado y un tramo superior metálico fabricado en taller, cuyas partes fueron transportadas a obra, ensambladas en posición horizontal sobre el tablero y verticalizadas en su posición definitiva mediante un procedimiento de rebatimiento de la pieza con un sistema especial de montaje.

Finalmente, una vez montadas las pilas en su posición definitiva, se procedió a colocar y tesar los obenques del puente, removiendo los apoyos auxiliares del tablero, alcanzando la configuración final de la estructura atirantada.

Abstract

The new Río Cuarto Bridge, recently constructed in the Province of Córdoba, Argentina, consists of a 110 m cable-stayed main span with a prestressed concrete deck, steel pylons, two 50.5 m side spans, and access viaducts on both sides of 51 m length, completing a total length bridge of 313 m.

The deck was entirely constructed employing precast concrete elements, placed and assembled on site with conventional systems over the bridge own infrastructure and auxiliary supports, which ensure the stability of the deck during the construction stage.

The bridge main pylons are comprised of a reinforced concrete lower section and an upper part made of a steel structure, whose parts were transported to the site, assembled in a horizontal position on the deck and then verticalized to its final position by a process of rebutting of the piece with a special mounting system.

Finally, once the pylons are placed in its final position, the bridge stays were erected and tensed, after that the auxiliary supports of the deck were removed, thus reaching the cable-stayed bridge final configuration.

Introducción

En Marzo de 2010 se concluyó la construcción del “Nuevo Puente Sobre El Río Cuarto” en la ciudad del mismo nombre de la Provincia de Córdoba, cuya estructura consiste en un puente principal atirantado con tablero de hormigón pretensado y pilas principales metálicas, con luz central de 110 m, dos vanos laterales de 50.5 m y viaductos de acceso en ambas márgenes de 51 m, resultando una longitud total de puente de 313 m. En la Figura 1 se muestra una vista general del Puente Atirantado sobre el Río Cuarto.

En el presente trabajo se exponen los aspectos relevantes del diseño y construcción del puente atirantado, describiendo su configuración estructural, los componentes principales de la estructura y el proceso constructivo, íntimamente ligado a la definición del sistema estructural del puente.

Finalmente se presentan los resultados de los ensayos dinámicos y estáticos realizados sobre el puente y un análisis y verificación experimental del comportamiento estructural del puente sometido a vibraciones y carga.



Figura 1. Vista general del Puente Atirantado sobre el Río Cuarto

Diseño conceptual y tipología estructural

En el año 2007, como parte de los estudios de conectividad y tránsito realizados en la ciudad de Río Cuarto, atravesada de Noroeste a Sureste por el río del mismo nombre, surgió la necesidad de una nueva vinculación vial en el corredor Norte-Sur de la ciudad, vinculando los barrios San Antonio de Padua, al Sur, con el barrio Banda Norte.

Teniendo en cuenta, por un lado, los condicionantes hidráulicos del río con una elevada actividad hidrodinámica que genera grandes erosiones del cauce durante las crecidas, y por otro lado, aspectos del desarrollo urbano de un sector perimido de la ciudad, se impulsó la ejecución de una obra que por su propia impronta produjera un fuerte impacto regional, optándose por una estructura atirantada de grandes luces, con apoyos convenientemente ubicados en las márgenes del río, protegidos contra la erosión, y dotada de una imagen estética que genera un nuevo polo de desarrollo en la ciudad.

Ante el requerimiento de realizar un proyecto para la conexión vial, en primera instancia se procedió al diseño conceptual de la estructura del puente atirantado, basado en las siguientes ideas estructurales y procesos constructivos.

- Solución del tablero con un entramado ortogonal de vigas principales y secundarias, tendiente a emplear una tipología de construcción con elementos prefabricados, de tamaños y peso acotado, de fácil puesta en obra.
- Solución de atirantamiento en doble capa, una a cada lado de las veredas laterales del tablero, de forma de materializar un sistema de apoyos ubicados en los extremos de las vigas transversales, próximo a los puntos de apoyo provisorio que se utilizan para construir el tablero. De esta forma, la transferencia de carga del sistema de apoyos provisorios al definitivo brindado por los obenques es prácticamente directa, y en el estado constructivo los elementos estructurales del tablero no sufren solicitaciones mayores a las de servicio.
- Tablero suspendido completamente de los obenques, sin apoyos sobre el travesaño de las pilas principales, evitando la aparición de momentos negativos importantes en dicha zona por la presencia de “puntos duros”.
- Pilas con fustes inclinados que se cierran en elevación, que mejoran notablemente el comportamiento torsional del tablero frente a cargas asimétricas y viento, por la propia geometría de los obenques que forman planos oblicuos inclinados hacia el interior del puente, con una apreciable componente de fuerza fuera del plano vertical de las vigas longitudinales del tablero.
- Solución de cables en abanico corregido, que aprovecha al máximo las ventajas de las disposiciones puras en abanico o en arpa; por un lado, la mayor eficacia del atirantamiento y menor altura de pila de la solución en abanico, y por otra, la sencillez de anclaje de los cables y la estética y armonía de la solución en arpa.
- Diseño de la parte superior de las pilas principales, incluido sus fustes y el extremo superior con el sistema resistente para el anclaje de los obenques, con estructura completamente metálica, que permitió su fabricación en taller, en condiciones óptimas de ejecución y control de calidad. Por otro lado, permitió la ejecución de este componente en forma paralela a la construcción del tablero.
- Verticalizado de las pilas metálicas por rebatimiento mediante un sistema especial de montaje, con gatos, cables y estructuras auxiliares, diseñadas con componentes modulares de fácil transporte y montaje en obra, que permitió garantizar un nivel muy alto de seguridad durante toda la maniobra de montaje de las pilas.

El diseño final del puente atirantado resultó en una estructura de tres vanos con luces parciales de 50.5 m – 110 m - 50.5 m, con una longitud total entre sus juntas extremas de 211 m, con un tablero de hormigón pretensado de 18.60 m de ancho total, formado por dos semi calzadas de 6.70 m de ancho cada una, delimitadas por un separador central y defensas laterales tipo New Jersey, y veredas peatonales de

2.0 m de ancho protegidas con una baranda peatonal ubicadas en ambos laterales del tablero.

El tablero se encuentra apoyado elásticamente en los obenques distribuidos en luces parciales uniformes de 11.0 m, mediante dos familias de obenques ubicados en planos inclinados, fijados mediante anclajes pasivos en el extremo superior de los pilones y anclajes activos ubicados en los bloques de anclaje especiales adosados en los extremos de las vigas transversales del tablero. La inclinación de los obenques permite materializar el gálibo horizontal y vertical requerido por el diseño vial, garantizando, por una parte, la protección de los cables mediante una holgura geométrica entre los propios cables y el perfil de los vehículos que circulan por el puente, y por otra parte, un paso libre suficiente para la circulación peatonal en las veredas.

La disposición de las familias de cables corresponde a la tipología de abanico corregido o semiarpa, es decir, los obenques se anclan en el tablero a intervalos regulares, mientras que en la pila lo hacen buscando la máxima altura posible, y en la cara correspondiente al mismo lado del obenque, lo que permite lograr un ordenado diseño de los anclajes en el interior de la pila.

Las pilas principales del puente tienen una configuración en forma de "H" corregida, con dos fustes laterales inclinados, vinculados debajo del tablero con una viga travesaño, y en su extremo superior los fustes se verticalizan y se arriostran mediante dos vigas. Las pilas principales del puente poseen una altura total de 49.0 m, de los cuales los primeros 11.15 m a partir del cabezal se ejecutaron de hormigón armado incluyendo la viga travesaño inferior, y el resto de la pila de 37.85 m de altura se resolvió con una estructura metálica. En Figura 2 se presenta una vista frontal de las pilas del puente.



Figura 2. Vista general del Puente Atirantado sobre el Río Cuarto

Completan la infraestructura del puente las pilas de retención extremas y las pilas de retención intermedias ubicadas en la zona central de los tramos laterales del puente, ambas estructuras de hormigón armado.

El tablero, además de estar sustentado por los obenques, se apoya en las pilas de retención extremas e intermedias, en ambos casos mediante una articulación pretensada, materializada mediante barras de acero especial ancladas

superiormente en el tablero e inferiormente en un punto ubicado debajo del fuste, con objeto de impedir los posibles movimientos de elevación del tablero respecto de estas pilas, pero permitiendo el deslizamiento horizontal relativo entre ambos sistemas mediante los oportunos dispositivos de apoyo.

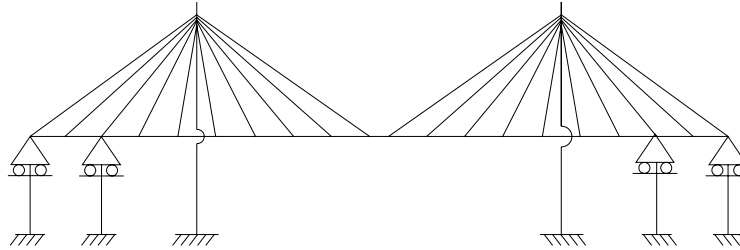


Figura 3. Esquema estático del puente atirantado

En la Figura 3 se representa el esquema estático del puente, donde se puede apreciar que la estabilidad longitudinal del puente en servicio se logra exclusivamente con la rigidez y resistencia de las pilas principales, actuando como grandes ménsulas arriostradas en su extremo superior por los obenques. En sentido transversal, el tablero se apoya en forma articulada en las seis pilas, dos principales y cuatro laterales, permitiendo la transferencia de las acciones del viento en proporción a las rigideces del conjunto tablero-pilas. En el caso del sismo, cuya verificación se realiza en estado límite último, se disponen de toques de contacto en todas las pilas, tanto transversales como longitudinales y las acciones del sismo se reparten en forma proporcional a las rigideces de las pilas.

Fundaciones

El puente está ubicado en la zona de cauce y planicie de inundación del Río Cuarto, que presenta características típicas de río de llanura, con cauce meandriforme. El perfil de suelos encontrado (Figura 4) consiste en un estrato superficial de 3 a 7 m de espesor de arenas gruesas, con transiciones hacia arenas limosas y limos arenosos, apoyado sobre un estrato inferior de limos arenosos y arcillas limosas de baja plasticidad, con resistencia relativamente blanda en superficie incrementándose en profundidad hasta valores medios de compacidad. La caracterización de los suelos se realizó mediante ensayos convencionales de penetración (SPT), con extracción de muestras y ensayos de laboratorio, y una campaña de ensayos complementarios de propagación de ondas (SASW).

Las características del perfil estratigráfico encontrado definieron las fundaciones del puente, de tipo profunda, con pilotes excavados y colados in situ.

La fundación de cada uno de los fustes de las pilas principales consiste en un grupo de 12 pilotes de 0.80 m de diámetro, de 28 m de longitud, vinculados por un cabezal ubicado inmediatamente por debajo del nivel del cauce del río, con una viga de fundación de sección rectangular de 1.0 m de ancho y 2.0 m de altura que arriostra ambos cabezales.

La fundación de las pilas de retención extrema esta formada por un grupo de 4 pilotes de 0.8 m de diámetro para cada una de sus columnas, conectados con un cabezal superior y una viga riostra inferior de sección rectangular de 0.6 m de ancho

y 1.2 m de altura, mientras que la fundación de las pilas de retención intermedia consiste en dos pilotes columna de 1.2 m de diámetro.

Dada la sensibilidad del método constructivo a posibles asentamientos de las estructuras de montaje auxiliares, así también por la sensibilidad a deformaciones diferenciales de los apoyos definitivos del sistema estructural del puente de alta hiperestaticidad, y la necesidad de realizar una verificación experimental de las capacidades geotécnicas de proyecto en pilotes construidos, se realizó una serie de ensayos de carga axial, cuyos resultados fueron cotejados con las predicciones de proyecto y fueron utilizados para validar los diseños a la luz de la evidencia empírica.

En la etapa de proyecto del puente, y a los fines del diseño de las fundaciones, se realizó la estimación de la respuesta carga deformación vertical de los pilotes (curvas t-z) de las pilas principales (Pilas N° 5 y 6), pilas de retención extrema e intermedia (Pilas N° 3 y 7), y pilotes auxiliares para el apoyo provisorio de la superestructura durante la construcción del puente, realizadas a partir de las propiedades del suelo determinadas en los estudios realizados en el emplazamiento (Gerbaudo et. al.^[1], 2008).

Asimismo, a los fines del diseño de las fundaciones de las pilas principales y de retención, se calcularon las curvas carga deformación lateral de los pilotes (curvas p-y), teniendo en cuenta la interacción del grupo de pilotes, aplicando la metodología del Manual de procedimientos de construcción y diseño de pilotes excavados (Reese y O'Neill^[2], 1988).

Las curvas t-z obtenidas mediante análisis fueron contrastadas mediante una serie de ensayos de carga dinámica a bajas deformaciones, con el objeto de verificar la rigidez inicial de los pilotes y predecir el comportamiento bajo cargas de servicio, complementándose las pruebas de campo con un ensayo estático de un pilote de la pila principal (Pila N° 6) hasta un nivel de carga ligeramente superior al de servicio, con el objeto de verificar las predicciones en el rango no-lineal.

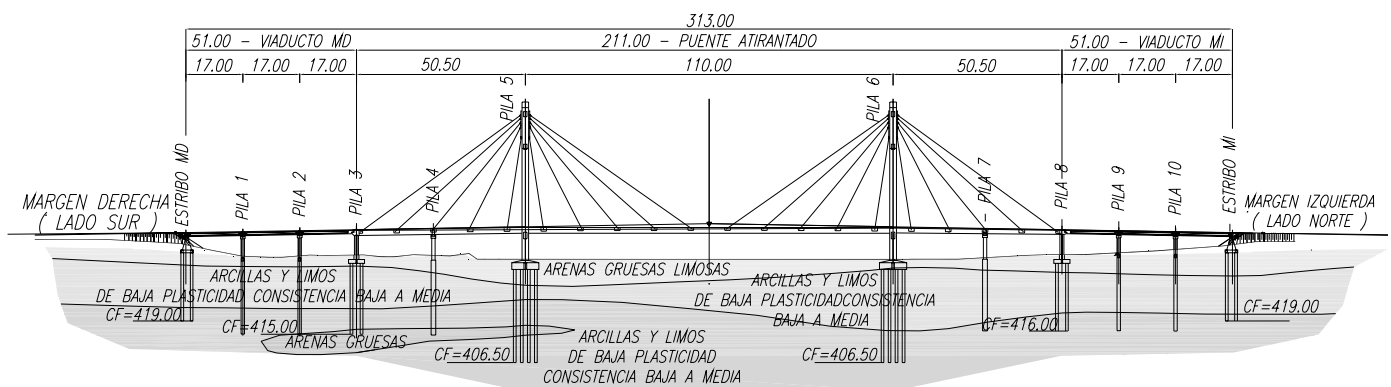
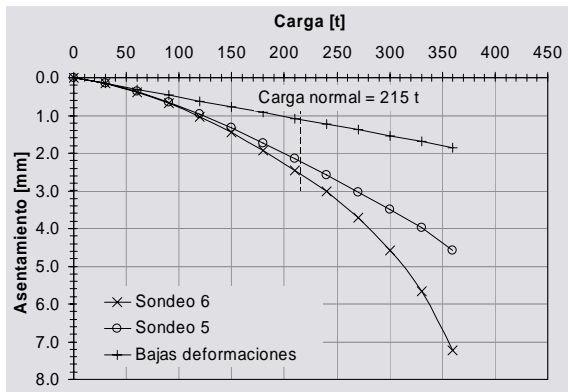
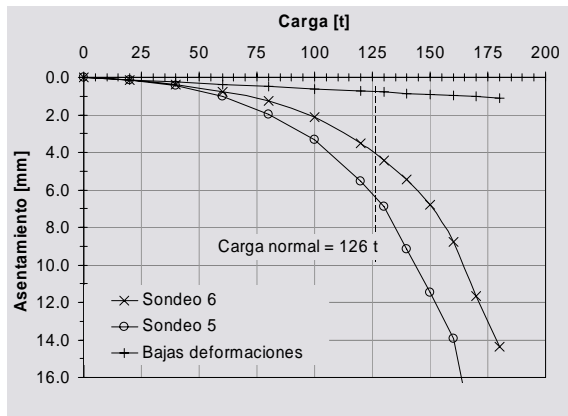


Figura 4. Perfil geológico en la zona del puente

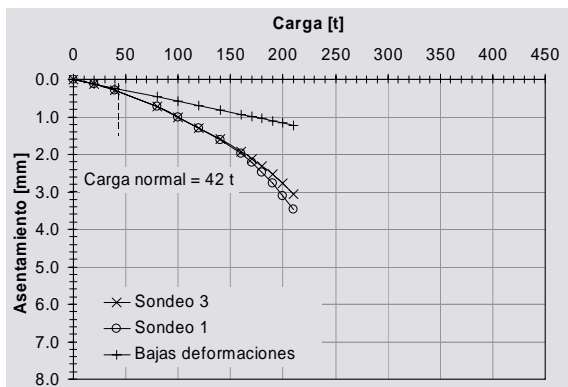
La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** muestra las curvas carga deformación vertical estimadas para las pilas principales, pilas de retención y pilas auxiliares, y también se grafica la estimación de la rigidez inicial para baja deformaciones, siendo esta dos curvas un límite superior e inferior respectivamente de las deformaciones esperadas en el rango de las cargas de servicio.



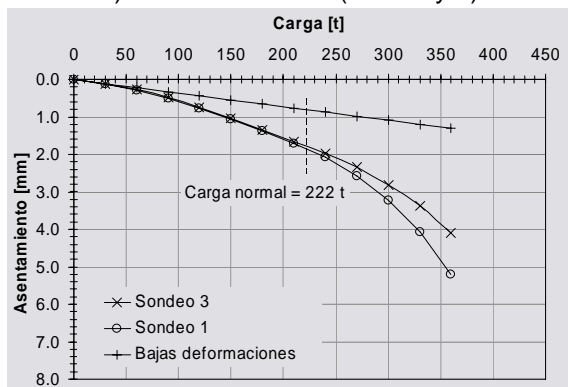
a) Pila principal (Pilas 5 y 6)



b) Pilotes auxiliares (Pilas 5 y 6)



c) Pila de retención extrema



d) Pila de retención intermedia

Figura 5. Curvas carga-deformación vertical estimadas

En la Tabla 1 se presenta la comparación entre la predicción analítica de la rigidez vertical del pilote a bajas deformaciones y la rigidez inicial de los pilotes determinada con los ensayos dinámicos, observándose que en general la rigidez medida fue superior a la calculada, entre un 30 a 40 %, pudiéndose explicar estas diferencias, en parte debido a cierto grado de conservadurismo que presentan los métodos prácticos de diseño que recomiendan adoptar un módulo de corte del suelo igual a $2/3$ del valor determinado en los ensayos SASW, y por otra parte, en el caso de los pilotes con ensanchamiento de la punta, el aporte efectivo a la rigidez vertical del acampanamiento del pilote que fue despreciado en las predicciones analíticas. Teniendo en cuenta estos aspectos mencionados, los resultados de la evaluación experimental mostraron que los pilotes se comportaron en forma muy satisfactoria, presentando una rigidez vertical superior a la prevista.

Tabla 1. Ensayos de rigidez vertical a bajas deformaciones

Ubicación	Diámetro fuste [m]	Diámetro campana [m]	Rigidez estimada Kv_0 [tn/m]	Rigidez medida Kv_0 [tn/m]
Pila principal (Pila 6, pilotes 7 y 8, L=28m)	0.80	-	195,000	277,000 266,000
Pila de retención extrema (Pila 3, pilote 6, L=21.3m)	0.80	1.20	172,000	293,100
Pila de retención intermedia (Pila 7, pilote 1, L=22.5m)	1.20	1.60	276,000	387,500
Pilote auxiliar (Pilas 1 y 15, L=11/15m)	0.90	1.30	150,000 180,000	170,200 257,500

En forma complementaria a las mediciones dinámicas, se realizó un ensayo de carga estático sobre un pilote correspondiente a la Pila Principal N° 6 hasta una carga máxima de 283 t, ligeramente superior a la de servicio y que representa el 65 % de la capacidad geotécnica última esperada. Los resultados del ensayo estático prácticamente coinciden con los valores estimados mediante el modelo no-lineal en el rango de cargas de servicio. El asentamiento medido para la carga normal de servicio de 215 t fue de 1.5 mm, mientras que las previsiones de cálculo arrojaban un valor estimado de 2.5 mm. La rigidez inicial determinada con el ensayo estático arrojó un valor de 263200 t/m prácticamente idéntica a la medición a bajas deformaciones del ensayo dinámico.

Además, se pudo corroborar experimentalmente que la capacidad geotécnica última del pilote calculada en etapa de proyecto de un valor de 447 t concuerda aproximadamente con el valor de 476 t determinado a partir de los resultados experimentales del ensayo estático (Gerbaudo et. al.^[1], 2008).

En la Figura 6 se muestra la comparación entre los resultados del ensayo de carga estático, las predicciones de diseño, y los resultados del ensayo a bajas deformaciones con la predicción no-lineal, pudiéndose destacar que existe un excelente ajuste entre los resultados del ensayo estático y la predicción no-lineal realizada sobre la base de los ensayos dinámicos en el rango de las cargas normales de servicio, mientras que la curva carga deformación utilizada en el diseño arroja valores de desplazamiento un 60% superiores a los determinados experimentalmente.

Pilas principales

Las pilas principales del puente tienen una configuración en forma de “H” corregida, con dos fustes laterales inclinados, vinculados debajo del tablero con una viga travesaño, y en su extremo superior los fustes se verticalizan y se arriostran mediante dos vigas transversales. Las pilas principales del puente poseen una altura total de 49.0 m, de los cuales los primeros 11.15 m a partir del cabezal se ejecutaron de hormigón armado incluyendo la viga travesaño inferior, y el resto de la pila de 37.85 m de altura se resolvió con una estructura metálica.

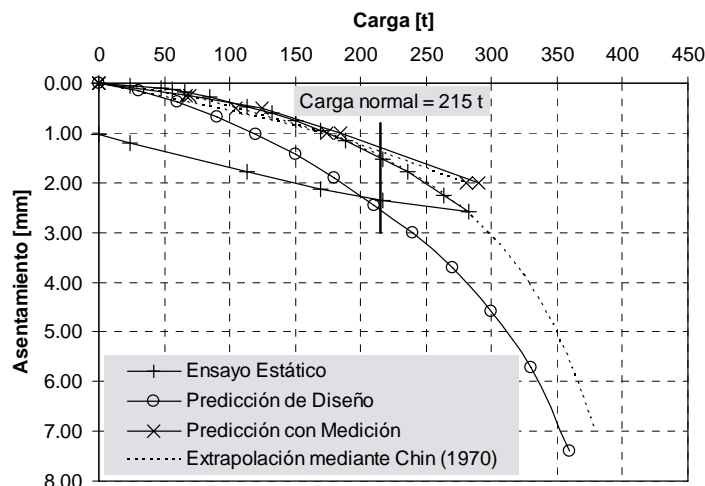


Figura 6. Predicciones vs. resultados de ensayo de carga estático

Los fustes laterales inclinados del tramo inferior de hormigón armado son de sección cajón de 2.10 m de ancho, 2.50 m de canto y 0.40/0.60 m de espesor, y la viga transversal ubicada inmediatamente debajo del tablero también es de sección cajón de 1.80 m de ancho y 2.00 m de altura, con espesores de almas de 0.30 m y alas de 0.40 m. La parte metálica se resolvió con una sección tipo cajón de 1.50 m de ancho por 2.00 m de largo, armada con chapas planas y rigidizadores longitudinales y transversales, con uniones soldadas en taller.

El extremo superior de la pila principal, donde se anclan los obenques, se diseñó con dos columnas metálicas de sección cajón armada, reforzadas con perfiles y chapas de acero y vinculadas con dos vigas de arriostramiento también metálicas.

Las uniones en obra de los diferentes partes en la que subdividió la estructura metálica para su fabricación en taller fueron resueltas con uniones abulonadas.

El extremo superior de la pila posee los tubos de encofrado metálicos con los perfiles de soporte y placas de acero de apoyo de los obenques, lo que permitió la prefabricación completa en el taller de esta pieza de geometría compleja.

El diseño geométrico del extremo superior y la disposición de los obenques en abanico corregido permitió un adecuado esquema de espaciado de los anclajes superiores, que facilitó el montaje y las potenciales tareas de mantenimiento o reemplazo de obenques.

Pilas de retención

El sistema de apoyos y vínculos del puente se completa con la instalación de una pila de retención ubicada en ambos extremos del puente principal y una pila de retención intermedia ubicada aproximadamente en el centro de ambos tramos laterales del puente.

La pila de retención extrema está constituida por dos columnas principales ubicadas en los extremos de la pila, de sección circunvalar de 1.10 m de diámetro, con dos tabiques intermedios de 1.20 m de ancho y 0.40 m de espesor y una viga travesaño superior de sección rectangular de 0.60 m de ancho y una altura de 1.20 m. Los obenques de retención tienen su anclaje en el eje de esta pila, y transfieren su carga

a la fundación mediante un grupo de tensores verticales de acero especial de alta resistencia.

La pila de retención intermedia está constituida por un pórtico transversal formado por dos pilotes-columnas de 1.20/1.10 m de diámetro, vinculados a nivel superior por una viga cabecera de sección rectangular de 0.60 m de ancho y una altura de 1.20 m, e inmediatamente por debajo del nivel del cauce por una viga riostra de igual sección. La componente vertical de los obenques de retención correspondientes a esta pila se transmite a la fundación mediante un par de tensores verticales de acero especial de alta resistencia ubicados en el centro de las columnas.

Tablero

La estructura del tablero del puente principal está constituida por un conjunto de vigas transversales espaciadas cada 11.0 m, de sección doble te invertida, con un ala inferior de 1.20 m de ancho por 0.30 m de altura, y un alma de altura variable de 1.87 m a 2.09 m, que tiene adosado en sus extremos los bloques de anclajes de los obenques con una escotadura donde se conectan con hormigón de segunda etapa las dos vigas principales longitudinales de sección cajón, de 1.80 m de altura total, formada por una sección tipo U premoldeada de 1.20 m de ancho y 1.57 m de altura y una losa superior de espesor variable de 0.20 m a 0.23 m.

Además, sobre la viga transversal se apoyan un conjunto de cinco vigas secundarias de sección doble te de 0.78 m de altura con una losa superior de 0.16 m de espesor mínimo que completan el tablero del puente. Se mantiene la pendiente transversal del tablero del 2 % a dos aguas, con drenajes convenientemente dispuestos sobre la calzada y veredas del puente. La terminación superficial de la calzada se realiza mediante una carpeta asfáltica de un espesor mínimo de 4 cm.

Los obenques se anclan en forma directa sobre los bloques especiales adosados a las vigas longitudinales cuyas dimensiones son de 1.70 m de largo, 1.13 m de ancho, y 1.87 m de altura, cada uno de ellos contiene un cajetín y el tubo de encofrado con la inclinación correspondiente a cada obenque. En la Figura 7 se representa esquemáticamente la composición estructural del tablero del puente.

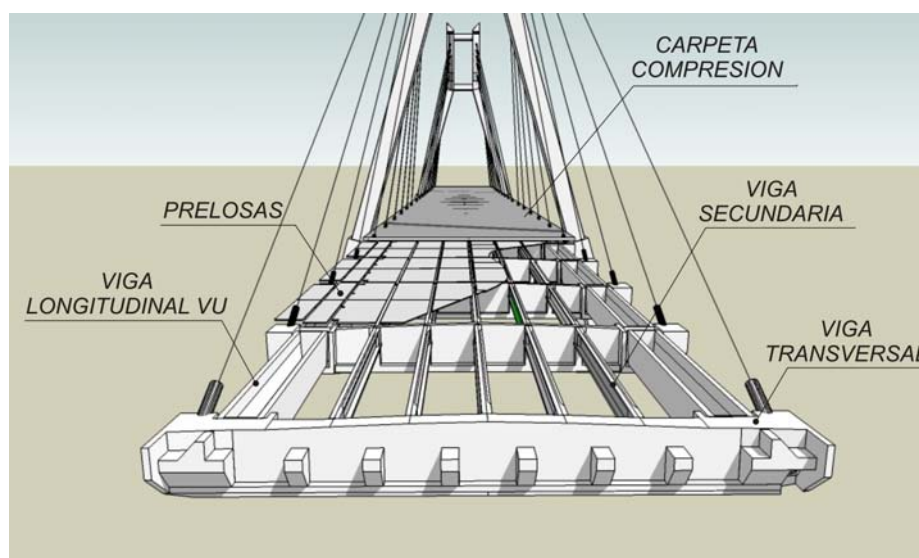


Figura 7. Representación esquemática de la estructura del tablero

Obenques

Los obenques son los elementos estructurales encargados de brindar apoyo elástico al tablero del puente y transferir las cargas a las pilas principales. El sistema de obenques adoptado en el puente, además de garantizar una adecuada capacidad de carga a rotura y resistencia a la fatiga, presenta un diseño especial que asegura la durabilidad y permite la intercambiabilidad de los cordones individuales que forman el obenque.

Los obenques adoptados en el puente corresponden al sistema compacto SSI 2000 de VSL^[3], formado por cordones paralelos, cuyas características principales son:

- Cordones paralelos de acero especial individualmente revestidos (monocordón)
- Vaina externa de HDPE (polietileno de alta densidad) en toda la longitud libre del obenque, con sistema antivibración.
- Instalación del obenque cordón por cordón.
- Capacidad para reemplazar individualmente cada cordón.

Método o proceso constructivo

El método más utilizado para la construcción de puentes atirantados de grandes luces, sobre un curso de agua mayor o para sortear elevadas alturas en zonas montañosas o quebradas muy pronunciadas, es la técnica de avance por voladizos sucesivos, donde se ejecuta el tablero a partir de un punto o apoyo fijo, en general, un tramo inicial de tablero vinculado a la pila, a partir del cual se avanza progresivamente en la construcción del tablero, generándose estructuras parciales estabilizadas con tensores auxiliares o los propios obenques definitivos del puente.

En el caso de puentes atirantados de luces medianas, en general, hasta unos 200 m de longitud, ubicados sobre cauces de agua donde es posible desviar el río o reducir la sección de escurrimiento mediante terraplenes de avance, o para emplazamientos en zonas urbanas donde es viable instalar estructuras auxiliares, es muy utilizada y conveniente la técnica de construcción del tablero completo sobre un conjunto de apoyos provisionales, o incluso sobre terraplenes de suelo que sirven de apoyo continuo al tablero. Al completar este proceso, se construyen o montan las pilas principales, y a continuación se colocan los obenques alcanzando la configuración estática final de la estructura. Luego se remueven los apoyos provisionales o los terraplenes que se utilizaron para la construcción del puente alcanzando la situación final de proyecto.

El proceso constructivo del puente atirantado sobre el Río Cuarto fue desarrollado siguiendo esta última metodología.

Además, la construcción de las diferentes estructuras se resolvió en mayor parte con sistemas de prefabricación, tanto para el tablero construido con componentes de hormigón pretensado, como las pilas principales resueltas con una estructura metálica fabricada en taller, ambos conceptos de fabricación con un notable desarrollo en nuestro país.

La construcción del puente se inició con la ejecución de las fundaciones, las cuatro pilas de retención, las pilas auxiliares de apoyo y los fustes y viga travesano inferior

de las pilas principales del puente, hasta el nivel de empalme con el tramo de pila metálico.

El tablero del puente atirantado fue construido íntegramente sobre un sistema de apoyos auxiliares formado por pares de pilotes-columnas de hormigón armado. En primer término se montaron las vigas transversales, en segundo lugar las vigas longitudinales tipo "U", las vigas secundarias tipo "I" y las prelosas del tablero. A posteriori se colocaron las armaduras complementarias en los nudos y losa y se completó el hormigonado de segunda etapa. Además, durante la ejecución del tablero se ejecutaron los pretensados longitudinales y transversales conforme a proyecto, siguiendo el protocolo previsto en el diseño.

Una vez completado el tablero del puente, se procedió al montaje de las pilas metálicas que fueron ensambladas en posición horizontal sobre el tablero del puente, adicionándole todos los elementos y estructuras auxiliares necesarios para el proceso de rebatimiento de la pila y para el montaje de los obenques, tales como orejetas de tiro, pasarelas, andamios, escaleras y guinches para el izaje de piezas.

El verticalizado de la componente metálica de las pilas principales se realizó mediante un procedimiento de rebatimiento de la pieza sobre un par de bisagras solidarias al tramo inferior de hormigón de la pila, con un sistema especial de montaje compuesto por gatos hidráulicos, un pórtico auxiliar de volteo, cables de acero y estructuras auxiliares.

Finalmente, una vez puestas las pilas en su posición definitiva, se procedió al montaje y tesado de los obenques del puente y remoción de los apoyos auxiliares, alcanzándose la configuración estática final de la estructura.

Verificación del comportamiento del puente

Dada la importancia de la obra proyectada, se realizó una verificación del comportamiento de la estructura construida, mediante la realización de un conjunto de pruebas de carga estática y ensayos dinámicos.

Los ensayos realizados en el puente atirantado fueron los siguientes:

- Prueba de carga estática con vehículos cargados ubicados en el centro de la luz principal del tablero, dividida en dos partes: una primera prueba con los vehículos cargados sobre la calzada de lado aguas abajo, y una segunda prueba con los vehículos posicionados sobre la calzada de aguas arriba.
- Prueba de carga con tránsito itinerante, haciendo circular el mismo tren de carga de camiones cargados utilizados para la prueba estática, a una velocidad controlada de aproximadamente 5 km/hora, por todo el desarrollo del puente principal atirantado efectuando detenciones parciales a $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ y $\frac{3}{4}$ de luz del tablero.
- Ensayo dinámico del tablero del puente.
- Ensayo dinámico de vibraciones de obenques.

A continuación se reportan los resultados de los pruebas de carga y su comparación con las previsiones de proyecto.

Prueba de carga estática

La prueba de carga estática se realizó con cuatro camiones cargados, de 42 t de peso total cada uno, ubicados en el centro de la luz principal del tablero atirantado, recostados sobre una u otra calzada para cada una de las dos pruebas realizadas. El momento flector en la viga principal del tablero alcanzado durante la prueba de carga estática resultó de un valor del 67 % del momento de diseño debido a máxima sobrecarga móvil reglamentaria. La prueba de carga se realizó en dos escalones de carga, un primera etapa con el 50 % de la carga y una segunda etapa completando el 100 % de la carga aplicada. Se tomaron lecturas en los puntos topográficos de control mediante nivelación de precisión con nivel óptico provisto de micrómetro de caras paralelas y mira de invar.

En la Tabla 2 y Tabla 3 se presenta la comparación entre los desplazamientos verticales medidos en los puntos de control y los calculados con el modelo numérico, observándose que en todos los casos las diferencias entre los valores medidos y calculados son inferiores al 5 %, confirmando que el puente responde en forme satisfactoria conforme a lo proyectado. Luego de la descarga se procedió a tomar lectura en todos los puntos de control, comprobando que se recuperaron completamente las flechas producidas por las cargas, confirmando que la estructura del tablero y los obenques presentan un comportamiento esencialmente elástico.

Tabla 2. Desplazamientos verticales en puntos de control para la Primera Prueba de carga estática lado aguas abajo

Puntos Control	1ra Etapa de Carga		2da Etapa de Carga		Observaciones
	Cálculo	Medido	Cálculo	Medido	
[Nº]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[texto]
PC11	-46	-46	-83	-82	Obenque C5, aguas abajo P5
PC12	-47	-47	-86	-86	Centro de puente, aguas abajo
PC13	-46	-44	-83	-83	Obenque C5, aguas abajo P6
PC15	-22	-23	-40	-40	Obenque C3, aguas abajo P6
PC212	-19	-25	-47	-51	Centro de puente, aguas arriba

Tabla 3. Desplazamientos verticales en puntos de control para la Segunda Prueba de carga estática lado aguas arriba

Puntos Control	1ra Etapa de Carga		2da Etapa de Carga		Observaciones
	Cálculo	Medido	Cálculo	Medido	
[Nº]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[texto]
PC211	-46	-49	-83	-86	Obenque C5, aguas arriba P5
PC212	-47	-51	-86	-90	Centro de puente, aguas arriba
PC213	-46	-47	-83	-85	Obenque C5, aguas arriba P6
PC215	-22	-23	-40	-41	Obenque C3, aguas arriba P6
PC12	-19	-26	-47	-54	Centro de puente, aguas abajo

La flecha máxima medida durante la prueba de carga estática, en el centro del tramo principal del Puente Atirantado de 110 m de luz, fue de 86 mm y 90 mm para la carga máxima aplicada del lado aguas abajo y arriba respectivamente. Considerando que la carga aplicada representa un valor normal de sobrecarga móvil para el puente, las flechas medidas arrojan una relación flecha/luz de 1/1279 y 1/1222 respectivamente, que se consideran aceptables para esta tipología de puentes.

Prueba de carga itinerante

En la Prueba de Carga con Tránsito Itinerante sobre el Puente Principal Atirantado se constató visualmente el comportamiento del tablero bajo carga máxima, a medida que circulaban los camiones a marcha lenta, verificándose la ausencia de anomalías en el tablero durante el tránsito de los vehículos.

Además, se realizaron detenciones parciales de los cuatro vehículos cargados en línea a $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ y $\frac{3}{4}$ de la luz principal del tablero, midiendo las flechas en los puntos principales de control para cada una de las estaciones o paradas programadas. En la Tabla 4 se resumen los desplazamientos verticales calculados con el modelo numérico ajustado y los medidos en obra durante la prueba de carga itinerante, observándose que las flechas medidas presentan una alta correspondencia con los valores de cálculo, con divergencias inferiores al 10 %, lo que corrobora que el comportamiento del puente es satisfactorio. Además, el tablero se comportó en todos los casos elásticamente recuperando toda la deformación luego de retirada la carga.

Tabla 4. Desplazamientos verticales en puntos de control para la Prueba de Carga Itinerante

Puntos de Control	1/4 Luz		1/2 Luz		3/4 Luz	
	Cálculo	Teórico	Cálculo	Teórico	Cálculo	Teórico
[Nº]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
VU Aguas abajo	-32	-34	-72	-69	-32	-34
Centro	-32	-36	-73	-70	-32	-36
VU Aguas arriba	-31	-34	-74	-69	-33	-34

Ensayos dinámicos

Formando parte de los ensayos experimentales de evaluación de la estructura construida, se realizó una campaña de ensayos dinámicos mediante el registro de vibraciones ambientales con un sistema de adquisición de datos compuesto por acelerómetros y analizadores de señales, determinando las frecuencias naturales de vibración de la estructura.

En la Tabla 5 se presentan los periodos y frecuencias naturales de vibración de los primeros 10 modos calculados con el modelo numérico calibrado del puente, y las frecuencias medidas experimentalmente. En las Figura 8 y Figura 9 se representan las formas modales de vibración correspondientes al primer modo de flexión vertical y torsión del tablero, respectivamente, representativos del comportamiento dinámico de la estructura.

Tabla 5. Modos y frecuencias naturales de vibración calculadas y medidas

Modo	Formado modal	Frecuencia cálculo	Frecuencia medida
[Nº]	[texto]	[Hz]	[Hz]
1	Traslación horizontal longitudinal tablero	0.52	-
2	Rotación horizontal tablero	0.55	-
3	Traslación horizontal transversal tablero	0.57	-
4	1er flexión vertical tablero	0.77	0.80
5	2do flexión vertical tablero	1.20	-
6	1er torsión tablero	1.27	1.30
7	2do torsión tablero	1.37	-
8	3er flexión vertical tablero	1.62	-
9	Flexión longitudinal pila retención	1.81	-
10	3er torsión tablero	1.85	-

La frecuencia del primer modo de flexión vertical del tablero calculada y medida fue de 0.77 Hz y 0.80 Hz respectivamente, mientras que la correspondiente al primer modo de torsión fueron de 1.27 Hz y 1.30 Hz. La relación entre dichas frecuencias es de 1.63 para ambos casos, es decir, se encuentran suficientemente alejada una de otra, lo que permite concluir que no es de esperar fenómenos de inestabilidad aeroelástica del tablero para velocidades de viento relativamente bajas por el acoplamiento entre dichas frecuencias.

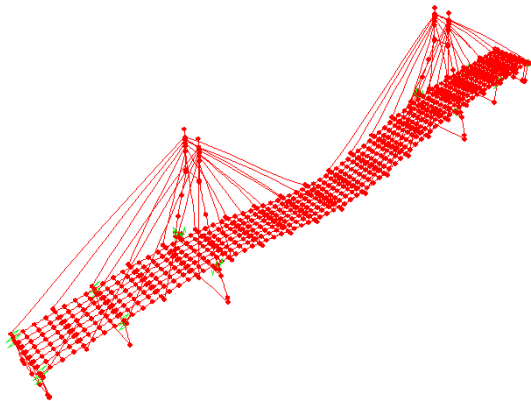


Figura 8. 1er modo de flexión vertical del tablero ($f = 0.77$ Hz)

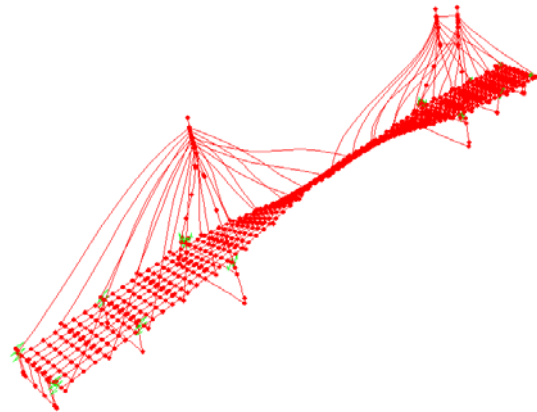


Figura 9. 1er modo de torsión del tablero ($f = 1.27$ Hz)

Por otro lado, el primer modo de flexión vertical del tablero de 0.80 Hz, asociado a los desplazamientos verticales para cargas normales de servicio, permitió verificar el confort de los usuarios frente a vibraciones, tanto desde el punto de vista analítico como experimental.

Registros de vibración de obenques

Con el objeto de medir las frecuencias naturales de vibración de los obenques antes de la habilitación al tránsito, y determinar las fuerzas en los cables mediante la teoría

de la cuerda vibrante, se realizó una campaña de medición de vibraciones de los obenques a cargas impulsivas mediante equipos e instrumentación específica.

Los registros de vibraciones dinámicas en el tiempo para cada uno de los obenques fueron transformados a respuesta en frecuencia mediante análisis espectral, de donde se obtuvieron las frecuencias fundamentales de vibración, a partir de los cuales se obtuvo la fuerza axial en los cables por vía experimental, las que fueron contrastadas con las fuerzas medidas durante la instalación de los obenques, corroborando que las fuerzas medidas por vibraciones en todos los casos presentaban una buena correlación con las medidas en obra con gatos hidráulicos, con diferencias individuales del orden de +/- 10 %, que se consideran satisfactorias para el nivel de precisión de los instrumentos de medición utilizados.

Conclusiones

El nuevo puente atirantado sobre el Río Cuarto, permitirá la conectividad vial entre dos sectores de la ciudad que se encontraban aislados, y actualmente se ha convertido en un hito urbano, cumpliendo ampliamente con los objetivos propuestos.

El sistema estructural y método constructivo adoptado del puente atirantado permitieron la ejecución de la obra sin imprevistos, alcanzándose todos los objetivos previstos en la planificación del proyecto.

El comportamiento de las fundaciones del puente medido a través de ensayos experimentales fue altamente satisfactorio, pudiéndose corroborar los diseños realizados en la etapa de proyecto, tanto desde el punto de vista de la resistencia como de las deformaciones previstas.

El esquema constructivo de prefabricación, tanto de los principales componentes del tablero de hormigón pretensado como de las pilas principales metálicas, permitió alcanzar un muy elevado nivel de calidad de la construcción, además de garantizar el cumplimiento de los plazos constructivos del proyecto.

El sistema de obenques de última generación utilizado en el proyecto asegura la resistencia y durabilidad de los tensores, además de permitir la intercambiabilidad de los cordones en forma individual.

Los resultados de las pruebas de carga estática y ensayos dinámicos realizados en el Puente Atirantado fueron muy satisfactorios, presentando una excelente correlación con las previsiones de cálculo.

Referencias

[1] Gerbaudo, C., Pinto, F., Prato, C. y Huerta, P. (2008) "Verificación experimental del comportamiento de pilotes para un puente atirantado en etapa de diseño y construcción", XX Jornadas de Asociación de Ingenieros Estructurales, Bs.As., Argentina.

[2] Reese, L C. y O'Neill, M. W. (1988) "Drilled Shafts: Construction Procedures and Design Methods," U.S. Department of Transportation, FHWA-HI-88-042, Dallas, TX, EEUU.

[3] VSL International Ltd., www.vsl.com.