

PUENTE PEATONAL MODULAR Y ARMABLE CON ENSAMBLAJE MANUAL

Carlos Gerbaudo^{(1),(2)} y Leonardo Cocco^{(1),(2)}

⁽¹⁾ M.Cs. Ing. Civil, INGROUP Oficina de Proyectos, Córdoba – Argentina.

⁽²⁾ Profesor del Departamento de Estructuras de la FCEFyN de la U.N.C., Córdoba - Argentina.

Resumen: En el presente trabajo se presentan los estudios y análisis realizados para el diseño de un puente peatonal para el cruce del Río Condorito en el Parque Nacional Quebrada Condorito de la Provincia de Córdoba, ubicado al pie de la majestuosa quebrada inaccesible para vehículos y equipos.

Aspectos topográficos, geotécnicos, constructivos y ambientales condicionaron fuertemente el diseño y características del puente peatonal, realizándose en una primera etapa un estudio de factibilidad de alternativas con diversas tipologías estructurales y soluciones tecnológicas, resultando finalmente un diseño de puente metálico modular y armable con estructura principal en arco de 27.24 m de luz y tablero suspendido.

Debido a las restricciones de accesibilidad hasta la zona de implantación de la obra, la estructura principal de los arcos y su sistema de rigidización fueron diseñados con piezas metálicas modulares compuestas por tubos de acero, de peso controlado, para permitir el transporte y ensamblaje manual in situ, con uniones abulonadas, mientras que la estructura del tablero se proyectó con perfiles de chapa plegada con uniones atornilladas en obra y superficie de tránsito con tirantería de madera dura. Las fundaciones se resolvieron con bases de hormigón armado.

Mediante el esfuerzo de Projectistas y Constructores fue posible materializar la obra que permitirá el paso de los visitantes del Parque Nacional Quebrada El Condorito hacia el balcón Sur, privilegiado sitio dentro de la reserva natural donde es posible el avistaje de magníficos ejemplares de cóndores.

Abstract: *In this work the study and analyses performed for the design of a pedestrian bridge over the Condorito River at the Quebrada El Condorito National Park in the Province of Córdoba are presented, it is located at a majestic canyon being a zone not accessible to vehicles and equipments.*

The topographical, geotechnical, constructive and environmental aspects have strongly conditioned the design and the features of the pedestrian bridge, it was performed in a primary stage a feasibility study of alternatives with several structural typologies and technological solutions, resulting finally a design of metallic modular assembled bridge with a main arc structure of an span of 27.24 m and suspended deck.

Due to the restrictions of accessibility throughout the implantation zone, the main structure of the arcs and its system of stiffeners were designed with metallic modular pieces composed by tubes of steel, of controlled weight, to allow the transportation and hand-assemble in situ, with bolt joints, while the deck structure was designed with profiles of folded sheet with joints screwed in situ and the transit surface with hard wood timbers. The foundations were solved by bases of reinforced concrete.

Thanks to the hard work of Designers and Constructors was possible to materialize this work which will allow the visitors of the Quebrada El Condorito National Park to

cross to the south balcony, which is a privileged site in the natural reserve where it is possible to see magnificent specimens of Condors.

1 Introducción

En el presente trabajo se presentan los estudios y análisis realizados para el diseño de un puente peatonal metálico para el cruce del Río Condorito en el Parque Nacional Quebrada Condorito, constituido por una estructura principal en arco y tablero suspendido.

El desarrollo del proyecto de puente peatonal para un Parque Nacional contempla ciertos aspectos que para proyectos emplazados en otros lugares suelen ser relegados a un segundo plano, como son los aspectos estéticos y ambientales. Estos últimos se refieren no sólo a los cambios introducidos en el ambiente por la construcción del puente propiamente dicho, sino también al impacto visual que produce la implantación de una obra de arte en este marco de reserva natural.

De esta forma las alternativas de proyecto planteadas debían cumplir con dos condicionantes adicionales, el estético y ambiental, además de los habituales de resistencia y rigidez. En este sentido se plantearon tres alternativas de proyecto que satisficieran los condicionantes de proyecto. Estas alternativas consistían en dos alternativas de puentes colgantes, una de puente en arco y una de puente con vigas reticuladas. El análisis de factibilidad de las alternativas determinó que la alternativa con mejor desempeño era la que planteaba un puente en arco.

El desarrollo del proyecto del puente en arco a nivel de proyecto ejecutivo conllevó un desafío más, ya que el acceso a la zona de implantación sólo podía realizarse a pie era necesario diseñar los componentes estructurales de tal forma que pudieran dividirse en piezas de tamaño transportable por una persona. Además era necesario que el posterior armado de los componentes estructurales fuera factible por medio manual por parte de los operarios.

Debido a estas restricciones de accesibilidad hasta la zona de implantación de la obra, la estructura principal de los arcos y su sistema de rigidización fueron diseñados con piezas metálicas modulares compuestas por tubos de acero, de peso controlado, para permitir el transporte y ensamblaje manual in situ, con uniones abulonadas, mientras que la estructura del tablero se proyectó con perfiles de chapa plegada con uniones atornilladas en obra y superficie de tránsito con tirantería de madera dura. Las fundaciones se resolvieron con bases de hormigón armado apoyadas en roca.

Por último los materiales constituyentes del puente debían cumplir con criterios de durabilidad adecuados al lugar de emplazamiento de la obra, además de que por los problemas de accesibilidad, antes mencionados, cualquier tarea de mantenimiento puede presentar inconvenientes para su ejecución.

Teniendo presente todos los condicionantes antes mencionados se proyectó un puente en arco que fue aceptado por el comitente y brindará al Parque Nacional Quebrada Condorito no solo un paso de cruce para el avistaje de Cóndores sino también un medio de seguridad para el Parque Nacional.

2 Estudio y selección de alternativas

En primer término, y a pedido del Comitente, se realizó un estudio y selección de alternativas teniendo en cuenta aspectos topográficos, geotécnicos, constructivos, funcionales, ambientales y estéticos.

Las alternativas analizadas fueron:

- Un puente colgante con cables anclados a la roca
- Un puente colgante con pilas autoportantes
- Un puente en arco con tablero suspendido
- Un puente de viga reticulada con tablero inferior.

El puente colgante con cables anclados a la roca, ampliamente difundido para este tipo de obras de paso peatonal en Parques Nacionales, fue descartado por condicionantes geotécnicos del macizo rocoso fuertemente diaclasado, especialmente en la ladera Norte, que impedían el anclaje del cable principal a la roca mediante un sistema de anclajes cortos que podía ser ejecutado con equipo rotopercutor manual. La solución estructural del anclaje del cable requería la utilización de anclajes relativamente largos ejecutados con barrenos, pero no se disponía de un plano de trabajo necesario para apoyar el equipo, y disposiciones ambientales no permitían la alteración de la vegetación ni modificación del terreno actual. Otra alternativa consistía en la ejecución de un bloque de hormigón de suficiente peso para estabilizar el sistema de cables, pero no contaba con la viabilidad ambiental ni constructiva por la carencia de suficientes materiales disponibles en la zona para producir el hormigón.

La siguiente alternativa analizada consistía en el puente colgante con pila autoportante para eliminar los anclajes a la roca, solución que quedó descartada por requerir también anclajes largos a la roca de difícil ejecución en obra.

Otra alternativa analizada consistió en un puente de viga metálica reticulada, simplemente apoyado en pequeños dados de hormigón, pero esta alternativa carecía de relevancia estética a juicio del Comitente.

Finalmente, la alternativa seleccionada consistió en un puente peatonal metálico con estructura principal en arco de 27.24 m de luz, que aprovecha el funcionamiento del arco y la transmisión de esfuerzos predominantemente de compresión a los apoyos del puente sobre la ladera de la quebrada, mejorando sustancialmente la estabilidad del macizo rocoso donde se concentran las reacciones del puente. Además, esta alternativa requería unos dados de apoyo de relativamente bajo volumen de hormigón, no intervenía en las condiciones naturales de la quebrada conservando la vegetación y las condiciones actuales de la laderas rocosas, y fundamentalmente la solución en arco permitía la fabricación modular en piezas de bajo peso, el transporte manual hasta el emplazamiento del puente y el montaje y ensamblaje de las partes mediante uniones abulonadas y atornilladas.

3 Aspectos estructurales del puente en arco

La estructura principal de la pasarela se resolvió con dos arcos paralelos formados cada uno por un tubo de acero de sección circular de 273 mm de diámetro externo y 4 mm de espesor, aprovechando el buen comportamiento que presentan los tubos sometidos a cargas axiales longitudinales, principalmente de compresión. Los dos arcos se vinculan transversalmente mediante tubos de acero que garantizan la estabilidad lateral de la estructura.

Las fundaciones del arco se realizaron mediante una base de hormigón armado apoyada en el macizo rocoso, vinculando el arco a la base con un inserto metálico empotrado al hormigón y una unión abulonada.

El tablero del puente, de 1.20 m de ancho, se encuentra suspendido mediante péndolas o tensores del arco, y está constituido por una estructura de perfiles de chapa con un entablonado superior de madera.

Todas las piezas metálicas de la estructura poseen una protección externa mediante galvanizado y los medios de unión son zincados, lo que provee una adecuada protección de la estructura frente a la intemperie.

3.1 Bases de Diseño

De acuerdo a lo establecido en los Pliegos de Especificaciones, la ingeniería de detalle se realizó considerando las cargas permanentes constituidas por el peso de todas las partes resistentes más las necesarias para su funcionamiento y una sobrecarga peatonal de 400 kg/m². El diseño de las secciones de acero se realizó según el Reglamento CIRSOC 301, reglamentos y recomendaciones complementarias para estructuras metálicas. Los elementos de hormigón fueron diseñados conforme al reglamento CIRSOC 201. Las acciones del viento fueron determinadas en base al reglamento CIRSOC 102. Los estados y combinaciones de carga fueron determinados según el reglamento CIRSOC 105.

3.2 Estructura principal en arco

La estructura principal de la pasarela se resuelve con dos arcos paralelos formados cada uno por un tubo de acero de sección circular de 273 mm de diámetro externo y 4 mm de espesor, aprovechando el buen comportamiento que presentan los tubos sometidos a cargas axiales longitudinales, principalmente de compresión. Los dos arcos se vinculan transversalmente mediante tubos de acero que garantizan la estabilidad lateral de la estructura.

En la Figura 1 se presenta el puente peatonal terminado destacándose la estructura principal en arco y el tablero suspendido de las péndolas.

3.3 Tablero del puente

El tablero para circulación peatonal de 1.20 m de ancho se encuentra suspendido mediante péndolas o tensores del arco, y está constituido por 2 vigas longitudinales metálicas de sección tubular conformadas por 2 perfiles de chapa plegada tipo CC 100 x 50 x 15 x 2, vinculadas mediante presillas de chapa fijadas mediante tornillos autoperforantes.

Las vigas longitudinales continuas se apoyan sobre vigas transversales cada 2.0 m en coincidencia con las péndolas que transmiten las cargas a la estructura del arco. Las vigas transversales son de sección tubular de igual sección y configuración que las vigas longitudinales. Un detalle de la estructuración del tablero se puede apreciar en la Figura 2.

Las péndolas de sustentación del tablero son de acero dulce redondo de 12 mm de diámetro, con ambos extremos roscados que permite la regulación y reglaje final del tablero. La vinculación del tablero a la péndola se realiza mediante un muñón ubicado en los extremos de la viga transversal, reforzado mediante platabandas metálicas en forma de U vinculadas con tornillos autoperforantes como se puede observar en la Figura 3.



Figura 1. Pasarela Peatonal Quebrada Condorito

Las vigas longitudinales del tablero, junto con las vigas transversales y diagonales de perfil C de chapa doblada 100x50x15x2 conforman una viga horizontal de suficiente rigidez y resistencia para soportar las fuerzas horizontales del viento y el movimiento lateral generado por los peatones al caminar, transfiriendo las fuerzas horizontales hasta las fundaciones a través de una estructura metálica reticulada ubicada en ambos extremos del tablero.



Figura 2. Vista inferior del tablero del puente con arriostramiento horizontal



Figura 3. Uniones típicas mediante chapas metálicas y tornillos autoperforantes

Esta estructura metálica está formada por los propios arcos, columnas metálicas verticales de sección 2PNU100 soldados, diagonales y montantes de tubos de acero de 63 mm de diámetro y 2.5 mm de espesor, y un par de puntales metálicos diagonales conformados por tubos de acero de 127 mm de diámetro y 2.5 mm de espesor, que constituyen un sistema reticulado tridimensional con suficiente resistencia y rigidez vertical, transversal y longitudinal para soportar las fuerzas generadas en los apoyos del tablero del puente y transmitir las a las fundaciones.

La superficie de circulación de la pasarela está formada por un entablado superior de madera dura de 0.05 m de espesor fijado con tornillos autoperforantes.

4 Método constructivo

Debido a las dificultades de accesibilidad a la zona de emplazamiento del puente, situado en la garganta de la quebrada, con laderas prácticamente de pared vertical de unos 400 m de altura, cuyo acceso actualmente consiste en un sendero peatonal

sinuoso con fuertes, diseño de la pasarela estuvo fuertemente condicionado por el sistema constructivo.

Además, las fuertes corrientes de viento que se generan en el canon longitudinal de la quebrada, tampoco permiten el descenso de equipos y materiales mediante helicóptero, por lo que el método constructivo debía contemplar la posibilidad de bajar con materiales y equipo liviano transportado a mano.

Teniendo en cuenta estos condicionantes, la estructura completa del puente pasarela fue modulada en partes de no más de 100 kg de peso cada una, proyectándose todas las uniones abulonadas y atornilladas. Los tubos del arco principal fueron divididos en 12 partes y vinculados entre sí mediante una brida abulonada. El resto de los elementos de la estructura de arriostramiento del arco también fueron construidos en partes y vinculados en obra mediante uniones abulonadas.

El tablero del puente fue ejecutado completamente con perfiles de chapa plegada en frío, galvanizadas, y unidas en obras mediante chapas y platabandas de acero y uniones con tornillos autoperforantes.

Todas las piezas fueron construidas en taller, galvanizadas en caliente, transportadas a obra y finalmente se realizó el montaje in situ.

5 Análisis dinámico del puente

La tipología estructural que se utiliza para un puente peatonal condiciona su desempeño tanto en los estados límites de rotura como en los estados límites de servicio. Particularmente los estados límites de servicio, en puentes peatonales, están relacionados con el confort de los peatones cuando transitan el puente, al cual se lo conoce como estado límite de vibraciones. Este estado de servicio queda caracterizado por medio de un parámetro elegido para cuantificar el confort de los peatones. En general este parámetro es la aceleración vertical que se produce en el puente bajo una carga normalizada.

Al respecto la Norma Española RPX-95 en su apartado “5.4. Estado Límite de Vibraciones” brinda recomendaciones para pasarelas peatonales. Esta norma fue utilizada para la verificación del confort en el puente peatonal en estudio. La Norma Española regula la aceleración vertical máxima permisible y la flecha estática máxima permisible ambas para una carga normalizada. Las expresiones de estos límites se resumen a continuación:

$$a_{max} = 0.5\sqrt{f_o} \quad y_e \leq \frac{\sqrt{f_o}}{80f_o^2\kappa\psi} \quad (1)$$

donde:

- a_{max} Aceleración vertical máxima permisible [m/s²]
- y_e Flecha estática producida por el peatón de 750 N situado en el punto de máxima deflexión [m]
- f_o Frecuencia del primer modo de vibración vertical [Hz]

κ Factor de configuración, según Tabla 5.4.a)

ψ Factor de respuesta dinámica, según Tabla 5.4.b)

La determinación de estos parámetros de cuantificación del confort del puente en estudio requería primeramente un estudio dinámico de la estructura, consistente en el cálculo de las frecuencias naturales y modos de vibrar del puente. Para ello se utilizó un modelo numérico, compuesto por elementos tipo viga que representaban todo los componentes estructurales del puente y se adicionó la masa aportada por el entablonado que materializa la superficie del tablero del puente. En la Figura 4 se puede apreciar la geometría del modelo numérico utilizado. El estudio dinámico del puente arrojó los modos y frecuencias naturales que se resumen desde la Figura 5 hasta la Figura 12.

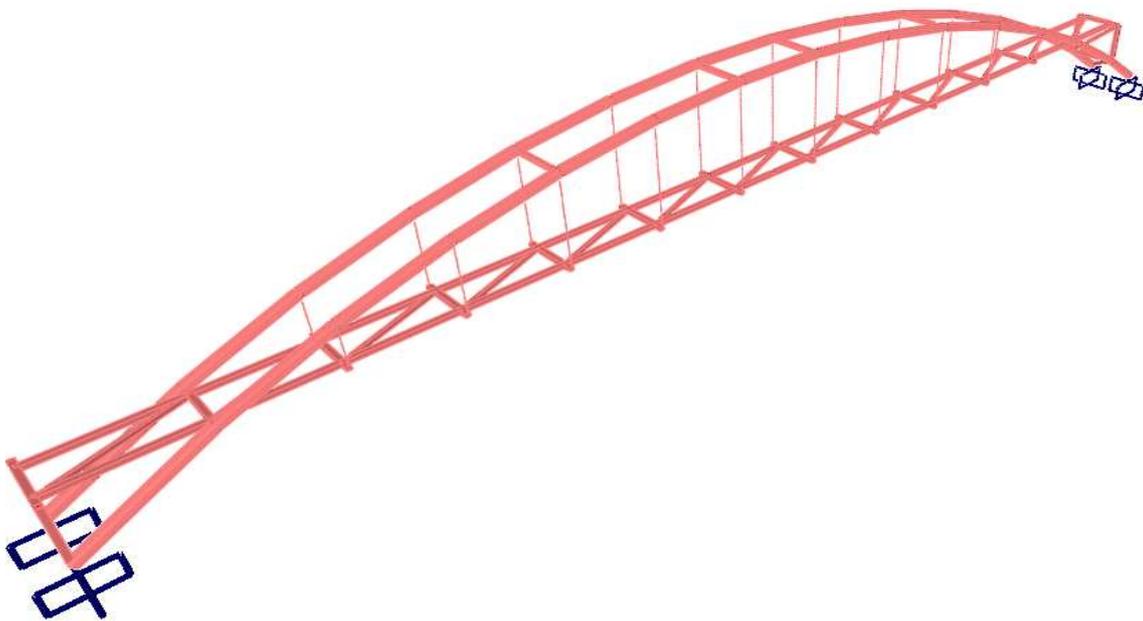


Figura 4. Geometría del Modelo Numérico

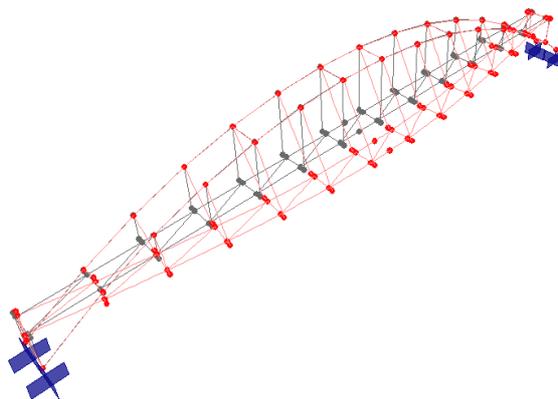


Figura 5. Modo1 Frecuencia 0.65 Hz

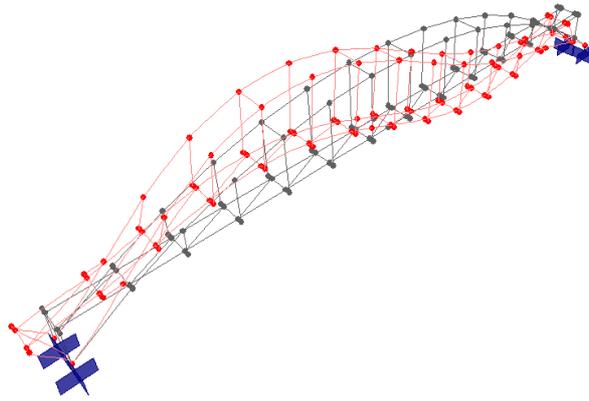


Figura 6. Modo 2 Frecuencia 1.32 Hz

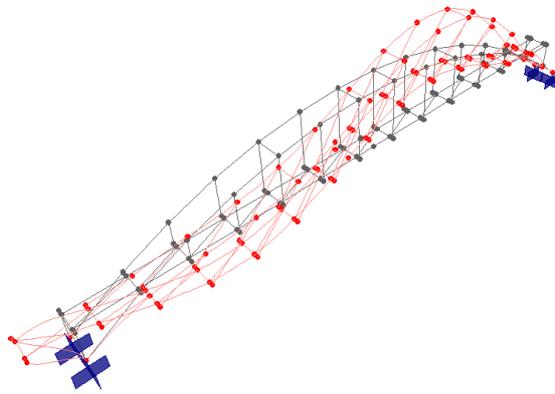


Figura 7. Modo 3 Frecuencia 1.62 Hz

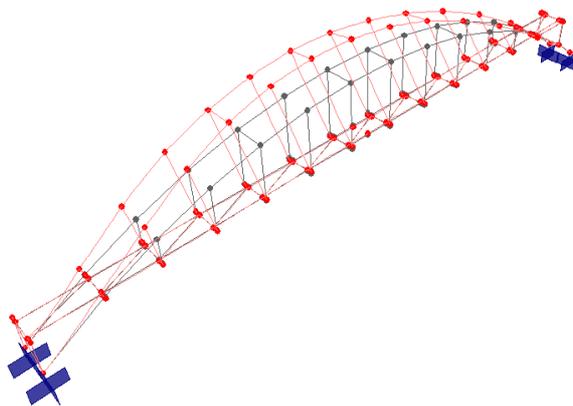


Figura 8. Modo 4 Frecuencia 1.97 Hz

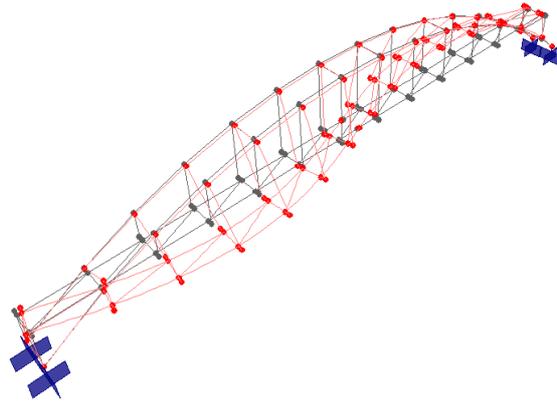


Figura 9. Modo 5 Frecuencia 2.24 Hz

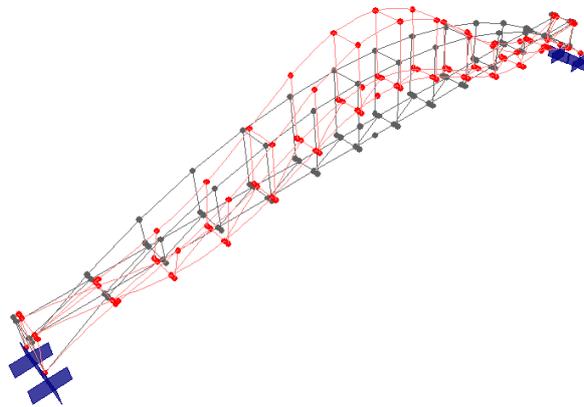


Figura 10. Modo 6 Frecuencia 2.45 Hz

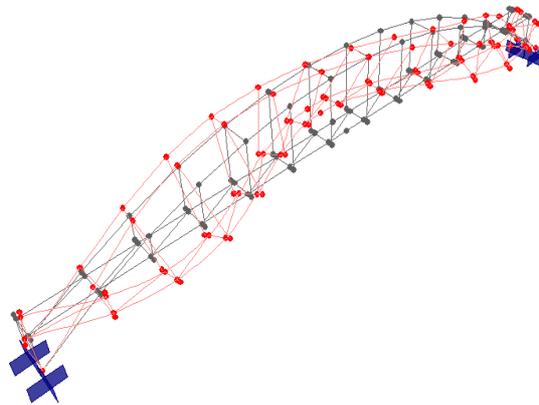


Figura 11. Modo 7 Frecuencia 4.24 Hz

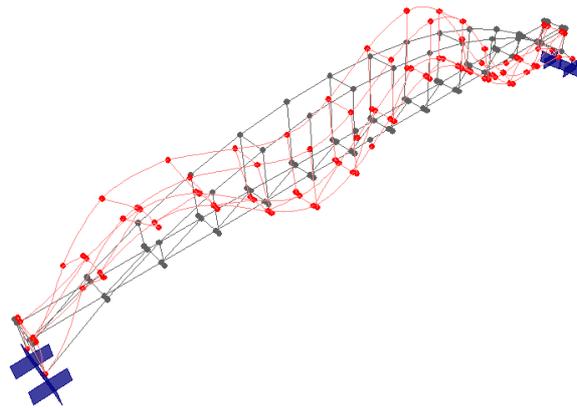


Figura 12. Modo 8 Frecuencia 4.52 Hz

Los modos representativos del comportamiento dinámico del tablero del puente peatonal son el Modo 1 de 0.65 Hz correspondiente a la flexión horizontal, el Modo 2 de 1.32 Hz correspondiente al primer modo de flexión vertical y el Modo 7 de 4.24 Hz correspondiente al primer modo de torsión.

Con los modos y frecuencias naturales calculadas se tienen los datos necesarios para la aplicación de la Norma Española a fin de verificar el estado límite de servicio de Vibraciones, pero además se puede realizar un análisis de la rigidez del puente. En relación a este último punto las frecuencias demuestran la adecuada rigidez del puente para las condiciones de uso del puente.

La determinación de la aceleración vertical experimentada por el puente para la carga normalizada de la Norma Española, supone la simplificación de la estructura como un oscilador simple de frecuencia natural igual a la frecuencia del primer modo de vibración vertical del puente. El valor obtenido para la aceleración vertical y la correspondiente flecha estática para la carga normalizada se resume en la Tabla 1.

Tabla 1. Resultados Obtenidos del Análisis de Vibraciones

		Desplaz.	Frecuencia	Acel. Vert.	Acel. Vert.	Acel. Adm.	Acel. Adm.
Modelo	Descripción	máximo	flexión f_0			$0.5 \sqrt{f_0}$	
		[m]	[Hz]	[m/s ²]	[%g]	[m/s ²]	[% g]
1	Carga Normalizada de 75 kg	0.0008	1.32	0.06	0.57%	0.57	5.85%

En la Tabla 1 se puede apreciar que la aceleración máxima experimentada por el puente en estudio, bajo la carga normalizada de la Norma Española, es menor a la aceleración admisible con lo cual se asegura el confort de los peatones mientras transitan el puente. Además se verificó la flecha estática debido a la carga normalizada siguiendo los lineamientos de la Norma RPX-95. Los resultados obtenidos se resumen a continuación.

$$\kappa = 0.9 \quad \text{De Tabla 5.4.a)}$$

$$\psi = 10.0 \quad \text{De Tabla 5.4.b)}$$

$$\text{Flecha Máxima Permissible [m]} = 0.0009$$

$$\text{Flecha Estática [m]} = 0.0008 \quad \text{Verifica}$$

La flecha estática obtenida para la carga normalizada es menor que la máxima permisible, por lo tanto se demuestra que la rigidez estructural es satisfactoria desde el punto de vista del confort de los peatones.

Los resultados del estudio dinámico del puente, muestran que la tipología estructural y la combinación de masa y rigidez de la estructura son adecuadas para el correcto desempeño del puente en las condiciones de servicio a lo largo de su vida útil.

Con respecto a la estabilidad aeroelástica del puente se puede concluir que el puente peatonal está asegurado frente a fenómenos de flameo para velocidades de viento relativamente bajas, ya que las frecuencias naturales de flexión vertical (1.32 Hz) y la de torsión (4.24) que tiene afinidad con la de flexión están suficientemente alejadas una de otra, siendo su relación de 3.21.

6 Conclusiones

Aspectos topográficos, geotécnicos, constructivos y ambientales condicionaron fuertemente el diseño y características del puente peatonal sobre el Río Condorito en la Quebrada el Condorito, resultando finalmente un proyecto de estructura en arco con tablero suspendido.

Los conceptos de puente modular y con ensamblaje manual fueron fundamentales para conseguir el proyecto y posterior ejecución del puente peatonal estudiado. Adicionalmente, la solución desarrollada garantizó el cumplimiento de los condicionantes estéticos y ambientales que en este proyecto particular tenían una importancia marcada.

Mediante el esfuerzo de Proyectistas, Constructores y Personal de Parques Nacionales fue posible materializar la obra que permitirá el paso de los visitantes del Parque Nacional Quebrada El Condorito hacia el balcón Sur, privilegiado sitio dentro de la quebrada donde es posible el avistaje de magníficos ejemplares de cóndores que le dan nombre al Parque Nacional.

7 Referencias y Bibliografía

1. Reglamento CIRSOC 301, "Reglamento Argentino de Estructuras de Acero para Edificios", 1982, Buenos Aires, Argentina.
2. Reglamento CIRSOC 201, "Proyecto, Cálculo y Ejecución de Hormigón Armado y Pretensado", Tomos I y II, 1982, Buenos Aires, Argentina.
3. Reglamento CIRSOC 102, "Acción del Viento sobre las Construcciones", 1982, Buenos Aires, Argentina.
4. Reglamento CIRSOC 105, "Superposición de Acciones (Combinaciones de Estados de Carga)", 1982, Buenos Aires, Argentina.
5. Norma Española RPX-95, "Recomendaciones para el proyecto de puentes mixtos en carreteras", 1996, España.