

Puente Manchuria – Lecciones aprendidas de la construcción del primer puente en arco tipo network de Chile

Manchuria Bridge – Lessons learned from the construction of the first network arch bridge of Chile

Frank Schanack^{*, a}, Óscar Ramón Ramos^b, Roberto Escalona de la Fuente^c

^a Prof. Dr. Institute of Civil Engineering, Director of the Laboratory of Bridge Engineering, Universidad Austral de Chile

^b Prof. Dr. Institute of Civil Engineering, University of Cantabria

^c Eng. Project Engineer, WSP Spain.

RESUMEN

El Puente Manchuria es un puente en arco tipo network de 60,5 m de luz y fue construido en Curacautín, Chile en 2019. Debido a las condiciones reales durante la construcción, fue necesario elaborar modificaciones de diseño. Las principales son: cambio del desapeo del puente, ajuste de longitud de péndolas sin carga, cambio de geometría de conexiones de péndolas inferiores y superiores, tirante transversal entre arcos, cambio de anclaje de barandas, agrupación de barras antisísmicas e instalación de luminarias en péndolas. Además, se recomienda diseñar puntos de gateo del puente y considerar la real rigidez del nudo arco-tablero durante el diseño.

ABSTRACT

The Manchuria Bridge is a network arch with a span of 60.5 m, which was built in Curacautín, Chile in 2019. Due to the actual construction conditions, design modifications were necessary. The most important are: change of scaffold lowering method, hanger length adjustment without load, change of upper and lower hanger connection details, transverse tie between arches, change of handrail anchorage, joining of antiseismic anchorages and connection of street lamps directly to the hangers. Furthermore, we recommend to design lifting support points and to consider the real stiffness of the arch-deck node during the design phase.

PALABRAS CLAVE: puente, arco tipo network, construcción, alzaprimado, péndola, pretensado.

KEYWORDS: bridge, network arch, construction, scaffolding, hanger, prestress.

1. Introducción

A 11 km de la ciudad de Curacautín, Chile, en la intersección de la Ruta 181 CH y la Ruta R-919, se emplaza sobre el Río Cautín el Puente Manchuria. Es el primer puente en arco tipo network de Chile y fue construido en 2019 en reemplazo a un antiguo puente colgante que

había en el lugar. En Chile, esta tipología de puente es considerada no convencional, por lo que era necesaria adaptar el diseño a las posibilidades tecnológicas de construcción existentes en el país. Sin embargo, debido a las condiciones reales encontradas durante la

construcción y a los procedimientos tecnológicos específicos de la empresa constructora ARAUCO S.A., fue necesario elaborar modificaciones de diseño. El presente artículo se centra en estas modificaciones para servir de antecedente para futuros diseños de puentes en arco tipo network mejorados.



Figura 1. Puente Manchuria en construcción.

2. Descripción general del puente

La estructura principal del puente se compone de dos arcos metálicos, de 60,5 m de luz de cálculo, de directriz circular y sección cajón cuadrada. Cada arco se dispone en un plano inclinado hacia el interior en un ángulo de 10°. Los arcos se encuentran arriostrados transversalmente por vigas de sección circular formando una viga Vierendeel.

El tablero de hormigón postensado une los dos extremos de los arcos.

El tablero del puente tiene un ancho de 15,76 m y un gálibo vertical mínimo de 6,12 m respecto a la primera viga transversal de arriostramiento. Esta sección alberga una calzada de 8 m con dos pistas de circulación más dos veredas sobre los voladizos laterales. Las veredas tienen una anchura libre de 1,5 m y 2,5 m lo que crea una sección asimétrica y permite a esta última dar cabida al paso de bicicletas. El tráfico vehicular queda segregado de las veredas mediante barreras vehiculares de hormigón.

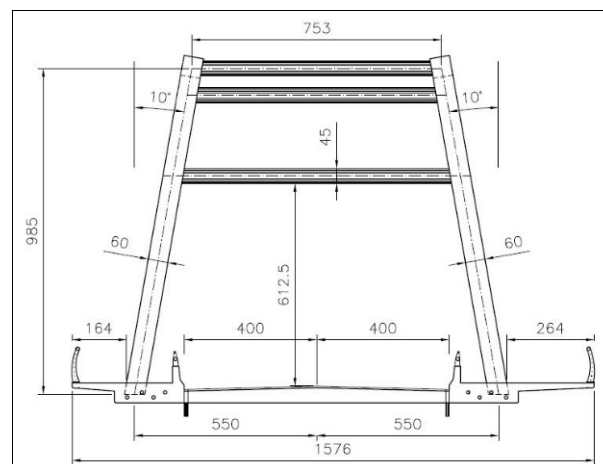


Figura 2. Sección tipo.

2.1 Arcos

Los arcos son de acero y tienen una directriz circular de radio 50,75 m. Tienen una luz de 60,5 m y una flecha de 10 m, correspondiente al 16,5% de la luz. Los dos arcos están separados 11 m en el arranque y 7,53 m en la clave.

La sección transversal de cada arco es una sección cajón de 600 x 600 mm, con espesores diferenciados en 3 secciones tipo (entre 50 mm y 25 mm).

Los arcos llevan un arriostramiento superior con 5 vigas transversales. La sección de los arriostramientos es circular de 450 mm de diámetro. El espesor varía entre las vigas exteriores y el resto.

El acero utilizado tanto para los arcos como para los arriostramientos es de calidad Grado 50 (ASTM A 572) siendo su límite elástico 345 N/mm².

2.2 Tablero

El tablero del puente se materializa mediante una losa de hormigón postensado. Tiene un espesor variable entre 35 y 45 cm. En el plano de los arcos la losa cuenta con un sobrecanto hasta alcanzar los 60 cm, necesarios para acomodar los ductos del postensado y los anclajes de las péndolas.

Además, en la zona de apoyo del tablero, la losa posee un sobrecanto adicional de 15 cm,

necesario para acomodar los anclajes del arco y los anclajes de postensado.

El postensado consiste en 2 grupos de cables, uno bajo cada arco formado por 4 ductos de 19 cables de diámetro 0,6" cada uno. Esta carga contrarresta la componente horizontal de la carga transmitida por el arco.

En la dirección transversal el tablero está armado con armadura pasiva.

2.3 Péndolas

La red de péndolas de cada arco del Puente Manchuria está formada por dos juegos de péndolas. Cada juego tiene 11 péndolas distribuidas de forma radial, es decir, las distancias de las péndolas a lo largo del arco y el ángulo entre cada péndola y el arco son iguales [1]. Estos parámetros de distribución se optimizan para cada proyecto particular. En nuestro caso, el ángulo toma un valor de 55° y la separación 2,75 m.

Para las péndolas se utilizan barras de acero de alta resistencia lisas con roscas en los extremos y diferentes longitudes de acuerdo a la geometría. El diámetro es de 76 mm.

El acero de las barras posee una tensión de fluencia mínima de $F_y = 460 \text{ N/mm}^2$. Las barras se conectan a los arcos y a la losa por medio de conexión horquilla.

Las péndolas se disponen excéntricas respecto al plano teórico del arco evitando así su choque.

3. Proceso constructivo

En general, y según el proyecto, la construcción del puente contemplaba su ejecución en 7 fases:

1. Construcción de estribos con sus fundaciones
2. Instalación de un alzaprímado provisorio en el río
3. Armado y hormigonado de la losa de hormigón del tablero

4. Postensado de cables longitudinales
5. Instalación de arcos, arriostramientos y péndolas
6. Desapeo controlado del alzaprímado, retiro del alzaprímado
7. Terminaciones

4. Modificaciones del proyecto

Como se menciona en la introducción, debido a las condiciones reales encontradas durante la construcción, se realizaron una serie de modificaciones del proyecto que se explicarán en detalle en los siguientes capítulos. A modo de resumen, las modificaciones aquí presentadas son:

- cambio del método de puesta en marcha del puente (en vez del desapeo del alzaprímado se ejecutó un levantamiento del puente en sus apoyos)
- necesidad del ajuste de longitud de péndolas (barras redondas con horquillas) sin carga
- reducción de geometría de conexiones de péndolas inferiores
- adaptación geometría conexión de péndolas superiores
- rotación en 90° de chapa de conexión de péndolas superiores para permitir soldabilidad
- conexión transversal de arranques de arco mediante chapa de acero
- cambio de anclaje de barandas
- agrupación de barras antisísmicas
- instalación de luminarias en péndolas
- puntos de gateo del puente
- fuerza en primera péndola

4.1 Levante en lugar de desapeo

El proyecto contemplaba un desapeo controlado del puente en los 3 ejes de apoyo centrales del alzaprímado. Los descensos en los ejes de apoyo iban ser uniformes, en un mínimo

de dos fases, y proporcionales a la deflexión final esperada en cada eje. De esta forma, se buscaba evitar sobrecargas excesivas en las torres del alzaprímado y esfuerzos no considerados en el puente. Todos los esfuerzos iban ser proporcionales a los que se esperan en el puente al final del proceso de desapeo.

Para realizar esta maniobra, se requiere que, en primer lugar, el alzaprímado sea ajustable en su altura y, en segundo lugar, se emplee al menos 6 gatos hidráulicos con recorridos controlados entre sí.

Como alternativa, la constructora propuso levantar el puente en sus ejes de apoyo finales. En este caso el tablero se va despegando del alza primado de una forma no proporcional al estado final. Consecuentemente, se realizó una simulación de este proceso constructivo con el modelo de elementos finitos, donde el tablero se apoya en muelles no lineal, que solamente trabajan en compresión. Estos resortes liberan el tablero a medida que este se levanta sobre el alzaprímado.

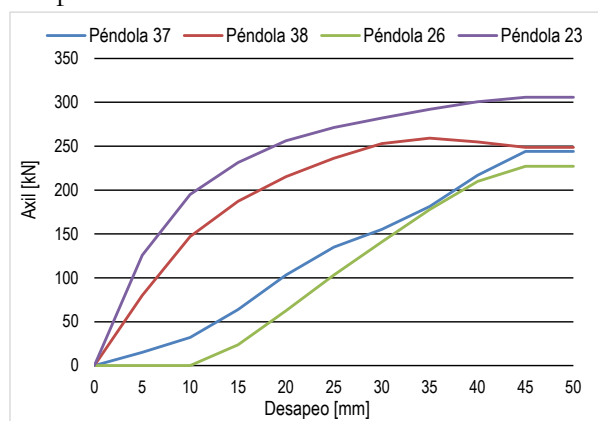


Figura 3. Desarrollo de fuerzas en algunas péndolas durante el levante del puente.

Como resultados, se pudo demostrar que sin bien los esfuerzos en el puente no se desarrollan proporcionalmente al estadio final bajo PP, no existen en ningún momento esfuerzos significativamente mayores. Como ejemplo, se muestra en el siguiente diagrama el desarrollo de las fuerzas en algunas péndolas durante este método de desapeo.

4.2 Ajuste de longitud de péndolas

Es sabido que en los puentes arco tipo network, debido a tolerancias normales de construcción y diferencias entre comportamiento teórico y real de la estructura, se requiere ajustar la longitud de las péndolas, una vez terminada la construcción del puente. En el presente caso, el ajuste de longitud se iba a hacer mediante roscas dispuestas en las horquillas de las péndolas y, adicionalmente, en unas coplas roscadas en las péndolas más largas.

Sin embargo, en barras redondas con diámetro de 76 mm resulta imposible girar las roscas bajo carga. Los proveedores de las barras proponen usar gatos hidráulicos especiales, que se instalan en las coplas de las barras y descargan la copla para poder realizar el giro. No fue posible conseguir este gato hidráulico especial y se optó por bajar nuevamente el puente para descansar sobre el alzaprímado. Para evitar daños por deformaciones no completamente elásticos en el tablero de hormigón, se consideró ejecutar esta operación una sola vez.

Aun así, el ajuste de longitud de péndolas instaladas mediante roscas ha sido difícil, dado que en una péndola descargada, al acortarla, sí recibe axil nuevamente.

4.3 Geometría conexión de péndolas inferiores

La geometría proyectada de las chapas de conexión inferior de las péndolas, considera un aumento de ancho como muestra la siguiente figura.

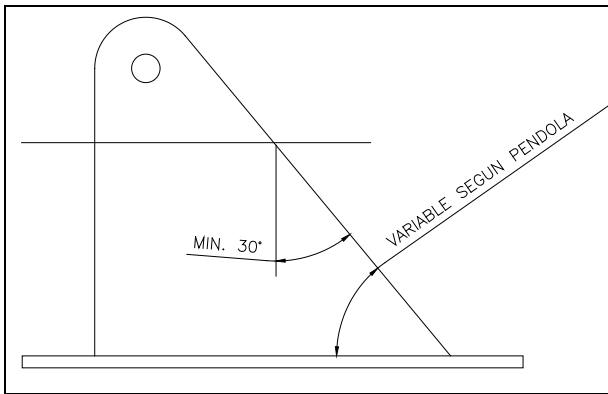


Figura 4. Geometría tipo proyectada.

Sin embargo, en algunas péndolas, esta geometría lleva a chapas de conexión extremadamente grandes, como muestra la siguiente figura.

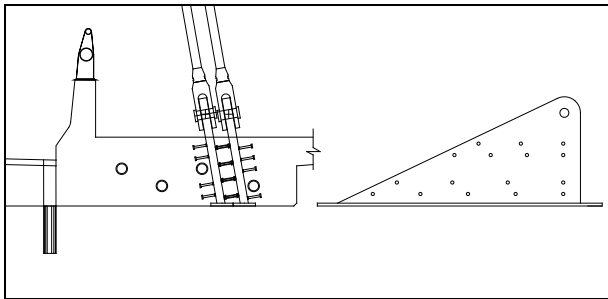


Figura 5. Geometría en péndolas más bajas.

Esta geometría impide el paso de armadura transversal en un 40% de la longitud del puente. Como alternativa, se diseñó la siguiente conexión, que se limita en su extensión a lo estructuralmente necesario que provee perforaciones para el paso de la armadura transversal.

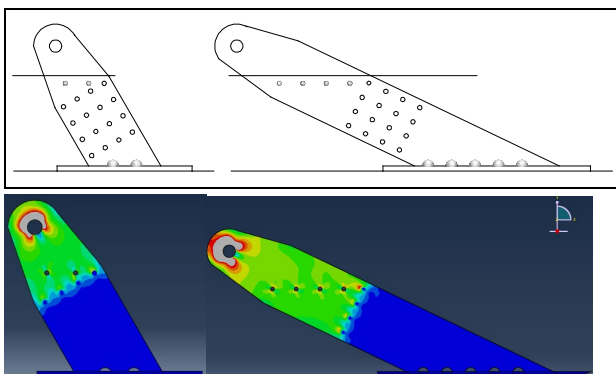


Figura 6. Geometría alternativa ejecutada.

4.4 Conexión de péndolas superiores

La geometría de las conexiones de péndolas superiores era similar a las inferiores.

Sin embargo, dado que el ángulo péndola-arco es casi igual en todas las péndolas, la geometría no cambia tanto. El objetivo de cambiar la geometría de chapa de conexión es tener la posibilidad de reubicar la perforación una vez montados los arcos. Al reubicar la perforación, cambia la distancia entre conexión inferior y superior y de esta forma se permite ajustarse a las longitud de las péndolas. La longitud de las péndolas viene desde fábrica, con la rosca laminada (no fresada), sin la posibilidad de cortar o alargar la péndola en obra.

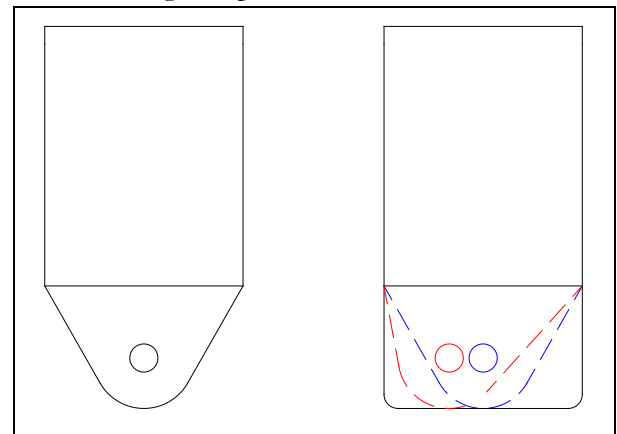


Figura 7. Izquierda: geometría proyectada. Derecha: geometría construida.

Por otro lado, la chapa de conexión proyectada estaba perpendicular al eje del arco, formando un diafragma de la sección cajón. Esta disposición se ajusta las recomendaciones documentados en la literatura, como por ejemplo en [2]. Lo anterior, para facilitar la fabricación del arco. Sin embargo, la maestranza propuso alinear la chapa de conexión con el eje del arco, para evitar el corte transversal en la chapa inferior del cajón.

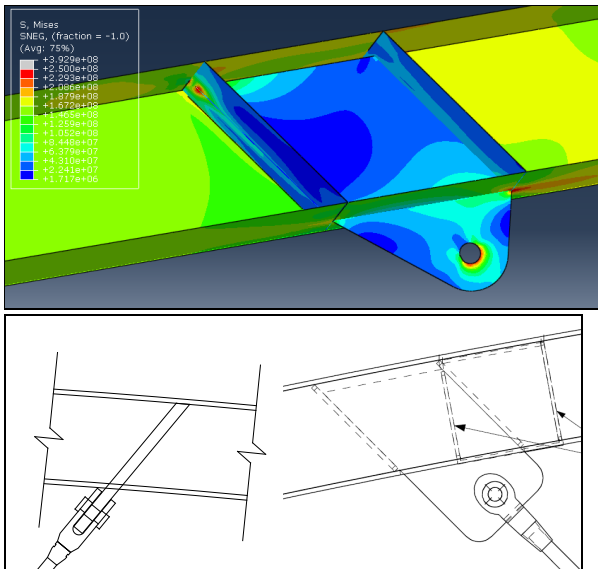


Figura 8. Izquierda: geometría proyectada. Derecha: geometría construida.

4.5 Tirante transversal

Similar al problema descrito en el apartado anterior, en los extremos del puente el nudo metálico del arranque del arco impide el paso de la armadura transversal. Dada la inclinación transversal que tiene los arcos, justo en esta zona la armadura transversal debe resistir el empuje horizontal transversal de los arcos. Como solución más económica, se optó por una chapa de acero transversal de una sección de 300 mm x 25 mm, que se suelda entre las placas bases de los arranques del arco.

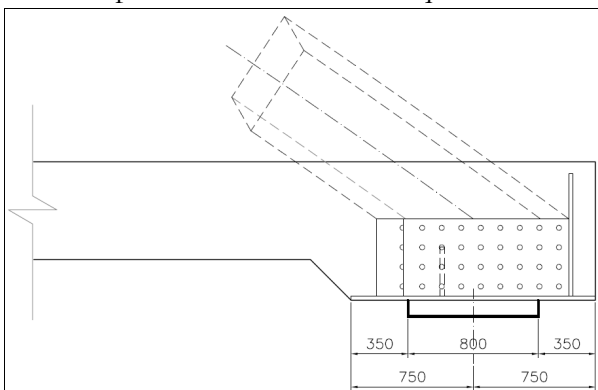


Figura 9. Vista lateral del nudo de arranque del arco.

4.6 Anclaje barandas

El proyecto contemplaba anclajes embebidos en el hormigón del tablero para las barandas.

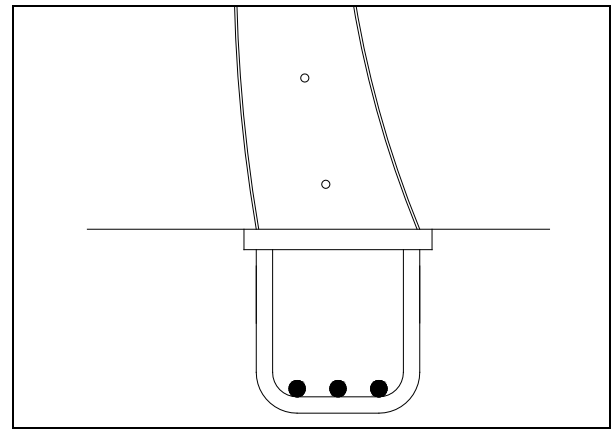


Figura 10. Anclaje de baranda proyectado.

Si bien este tipo de anclaje revista de mucha resistencia y durabilidad, aparte de la elegancia estética al no ser visible, conlleva grandes problemas constructivos por la precisión que requiere su ubicación. No permite compensar ninguna tolerancia de construcción. Este problema se agrava con el hecho de que en este puente, al hormigonar la losa, el puente aún está sobre cimbra y alzaprimado y no se puede prever las deformaciones que habrá durante la puesta en servicio.

Para asegurar que todos los anclajes estén bien alineados vertical y horizontalmente, se optó por el uso de 4 pernos de anclaje 1/2" x 100 mm.

4.7 Agrupación de barras antisísmicas

De acuerdo a la normativa actual de diseño de puentes en Chile [3], todos los puentes debe disponer de barras antisísmicas verticales en sus ejes de apoyo. En este caso, el puente requiere de 8 barras de 32 mm en cada estribo. Las barras son de acero A44-28 H, no disponible en Chile en mayores diámetros.

Para permitir los movimientos horizontales del tablero (temperatura, R+F, sismo, etc.) las barras se suelen instalar en tubos de acero galvanizado, en los cuales puede moverse libremente. Debido al tamaño del puente, el movimiento libre es de $\pm 94,4$ mm, requiriendo tubos de >200 mm de diámetro. Según la práctica habitual, se instalaría un tubo por barra, es decir, 8 tubos en cada extremo del

tablero. Por el tamaño de los tubos, se vería fuertemente afectada la disposición de armadura en el tablero.

Como alternativa, se optó por agrupar 4 barras en un tubo un poco más grande, teniendo solamente 2 tubos de 12" en cada extremo del tablero.

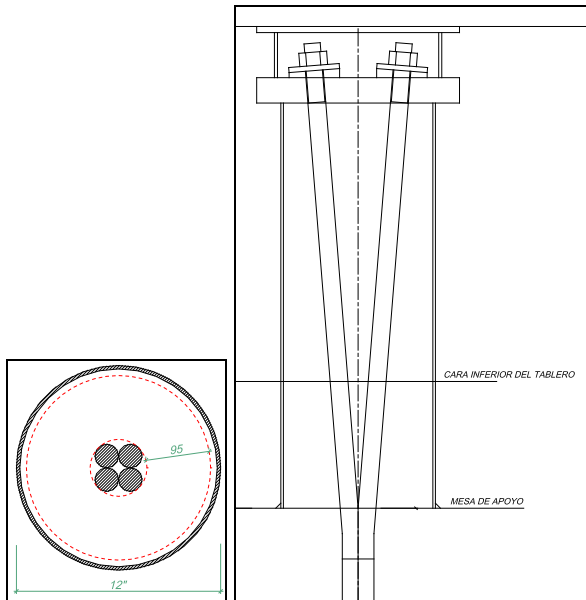


Figura 11. Barras antisísmicas por grupos de 4.

4.8 Luminarias en péndolas

El proyecto contemplaba la instalación de postes de luz en el tablero del puente para iluminarias solares. El anclaje iba estar en el tablero. Como alternativa, y para menor intervención de la estructura si optó por adosar las iluminarias directamente a las péndolas mediante abrazadera metálicas.



Figura 12. Fijación de iluminarias directamente en las péndolas.

4.9 Puntos de gateo del puente

Se ha visto que puede existir la necesidad de gatear el puente, es decir, levantarlo encima de los estribos, por varias razones. Como por ejemplo, para instalar/reemplazar/ajustar los aparatos de apoyo, para la instalación de las barras antisísmicas, para cambiar de posición del puente durante la construcción o después de un sismo, etc. Dadas las enormes fuerzas verticales que provienen de los arcos, el puntos de gateo no puede estar en cualquier lugar sino tienen que estar cerca del arco. Idealmente, en el proyecto del puente se define los puntos de gateo y dimensiona la losa del tablero para resistir las fuerzas correspondientes.

4.10 Fuerza en primera péndola

Las primeras péndolas en ambos extremos del puente, están muy cerca del nudo arco-tablero. En el cálculo teórico, el nudo se ubica en la intersección de los ejes neutros de arco y tablero respectivamente. Sin embargo, las dimensiones reales provocan que el empotramiento se materialice en una zona mucho más amplia.

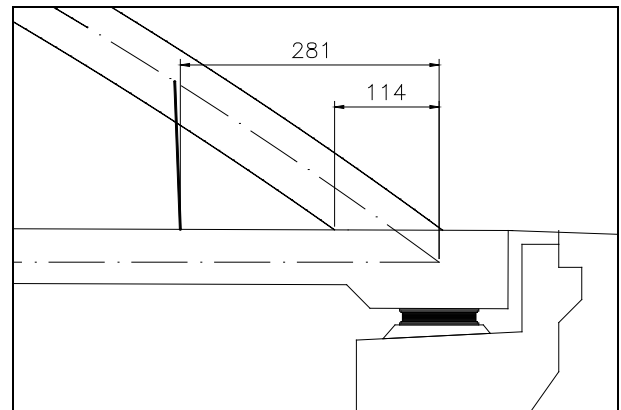


Figura 13. Primera péndola y nudo arco-tablero.

Como se puede apreciar en la figura, la primera péndola está a unos 280 del nudo teórico, pero solo a 1,65 del término de intersección real arco-tablero.

Durante la medición de las fuerzas de péndola bajo el peso propio del puente, se ha visto que la primera péndola en cada una de las 4 esquinas del puente, está prácticamente sin

carga. La fuerza teórica según el modelo de cálculo está entre 300 y 400 kN.

Por lo visto, la explicación radica en que la capacidad real de deformación del nudo de conexión es muy inferior a lo que se obtiene considerando solamente un empotramiento en la intersección de ejes neutros.

5. Resumen y conclusiones

El Puente Manchuria es el primer puente en arco tipo network de Chile. Es un puente de carretera, tiene 60,5 m de luz y fue construido en 2019. Tiene dos arcos metálicos con sección cajón de 60 cm x 60 cm y un tablero de hormigón armado, longitudinalmente postensado de 45 cm de espesor. En cada arco hay 22 péndolas de barras lisas redondas.

Durante la construcción del puente se introdujeron varias modificaciones al proyecto, respondiendo así a las condiciones reales de la obra. Muchas de estas modificaciones puede considerarse mejorarse al diseño del puente y sirven como referencias para nuevos proyectos de puentes en arco tipo network similares.

En consecuencia, se pueden derivar las siguientes lecciones/recomendaciones:

1. En vez de un desapeo controlado, proporcional al estado final (que es más fácil de construir), se debe considerar levantar el puente en los estribos (que es más fácil de ejecutar). En el presente ejemplo, la segunda opción no produjo sobrecarga excesiva ni esfuerzos no considerados.
2. Se debe asegurar que el sistema de ajuste de longitud de péndolas también funciona bajo carga.
3. Se debe asegurar que las conexiones de péndolas inclinadas en el tablero, no interfieren con la armadura transversal.
4. La disposición transversal de las chapas de conexión superior de las péndolas no siempre es lo más conveniente desde el punto de vista de fabricación.

5. En arcos inclinados transversalmente uno contra el otro, resulta más económica conectar sus arranques mediante una estructura metálica en vez de usar armadura pasiva.
6. El uso de pernos de anclajes para las barandas asegura la correcta posición vertical y horizontal, lo cual no se puede garantizar al usar anclajes embebidos en el hormigón.
7. Resulta más conveniente agrupar varias barras antisísmicas en un sólo tubo más grande.
8. Resulta más conveniente instalar las iluminarias solares directamente en las péndolas en vez de usar postes de luz encima del tablero.
9. Se deben definir y dimensionar los puntos en el tablero donde será posible levantar el puente mediante gatos hidráulicos.
10. Se debe realizar modelos de cálculo que consideran la extensión de empotramiento arco-tablero más allá del nudo en la intersección de los ejes neutros. Lo anterior para estimar de forma correcta la fuerza que toma la primera péndola.

Agradecimientos

Las mejoras aquí presentadas fueron ideadas, elaboradas y aprobadas en conjunto con la Inspectora Fiscal, Sra. Myriam Navarro Cifuentes y el Ingeniero Residente de la obra, Sr. Fernando Valdés Moyano.

Referencias

- [1] F. Schanack, B. Brunn, Generation of network arch hanger arrangements, *Stahlbau*. 78 (2009) 477 – 483
- [2] E. Fiedler, The strut arch in using of steel road bridges mainly in Germany – trends of developments into the last 50 years – Part II, *Stahlbau*. 74 (2005) 281 - 294

[3] Dirección de Vialidad, Manual de Carreteras,
Ministerio de Obras Públicas, Chile, 2018,
<https://mc.mop.gob.cl/>.