

Puente arco del este (East bridge) sobre el río Jiangxi en Chengdu, China

The east bridge over the Jiang xi River in Chengdu, China

Javier Muñoz-Rojas Fernández^a, Pedram Manouchehri^b, Tianyi Ying^c, Manuel Valero Barat^d y Darío Pérez Sebastián^e

^a Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Carlos Fernández Casado S.L. jmrojas@cfcsl.com

^b Ingeniero Civil. Carlos Fernández Casado S.L.- Universidad Politécnica de Madrid manouchehri@cfcsl.com

^c Ingeniero Civil. SMEDI group yingtianyi@smedi.com

^d Ingeniero de Civil. Carlos Fernández Casado S.L. mvalero@cfcsl.com

^e Arquitecto. Carlos Fernández Casado S.P. – HUALCA. dario.perez@cfcsl-latam.com

RESUMEN

El Puente Este sobre el río Jiangxi en Chengdu, Sichuan, es un arco de acero diseñado para equilibrar la funcionalidad con la integración estética en su entorno. Con una longitud de 292 metros y un vano principal de 152 metros, el puente presenta una geometría espacialmente curva alineada con el trazado, lo que introduce una complejidad adicional. Se requirió del diseño de uniones metálicas especiales para optimizar el comportamiento estructural, mejorar la resistencia a fatiga y garantizar la durabilidad. El confort de los peatones se consiguió mediante grandes jardineras y un parque lineal, realzando la conexión del puente con el entorno. Con ello se consigue una estructura eficiente y que armoniza con su entorno.

ABSTRACT

The East Bridge over the Jiangxi River in Chengdu, Sichuan, is a steel arch designed to balance functionality with aesthetic integration into its surroundings. With a length of 292 meters and a main span of 152 meters, the bridge has a spatially curved geometry aligned with the layout, introducing additional complexity. The design of special steel connections was required to optimize structural performance, improve fatigue strength and ensure durability. Pedestrian comfort was achieved through large planters and a linear park, enhancing the bridge's connection to its surroundings. This results in an efficient structure that harmonizes with its surroundings.

PALABRAS CLAVE: Arco metálico, geometría espacial, fatiga, integración peatonal, sostenibilidad, optimización estructural, puente carretero

KEYWORDS: Steel arch, spatial geometry, fatigue, pedestrian-friendly design, sustainable infrastructure, structural optimization, road bridge.



Figura 1. Vista aérea nocturna

1. Introducción

El puente Este sobre el río Jiangxi es uno de los seis puentes icónicos planteados para una nueva zona de desarrollo urbano en Chengdu, Sichuan¹. De entre los requisitos del concurso destaca la búsqueda de soluciones innovadoras y originales que convirtiesen la nueva estructura en un icono urbano. Con el fin de minimizar el impacto funcional y visual sobre el nuevo parque de ribera y las vías peatonales adyacentes, se demandaba igualmente una zona libre de apoyos intermedios en el cauce y su entorno inmediato.

Dada la preferencia por tableros ligeros para evitar soluciones visualmente pesadas, el diseño se dirigió naturalmente hacia puentes arco o atirantados. Finalmente, se escogió un arco autoanclado con un vano principal de 152 m sobre el río, con dos parejas de vanos laterales de 24 y 35 m a cada lado.

La característica más notable y a la vez el mayor desafío del diseño es la incorporación del trazado curvo de la carretera a la geometría del arco. Para conseguir este objetivo se adoptó una

geometría espacial, con ambos semiarcos a cada lado de las vías de tráfico y siguiendo el trazado correspondiente a cada una de ellas. La geometría obtenida, que no sigue ningún plano ni eje de simetría, permite salvar igualmente los gálibos verticales y horizontales para el tráfico de la carretera.

Es bien conocido que, a menos que su geometría siga una geometría antifuncular precisa, los arcos no planos están sujetos a fuerzas fuera de su plano que provocan momentos flectores transversales adicionales, así

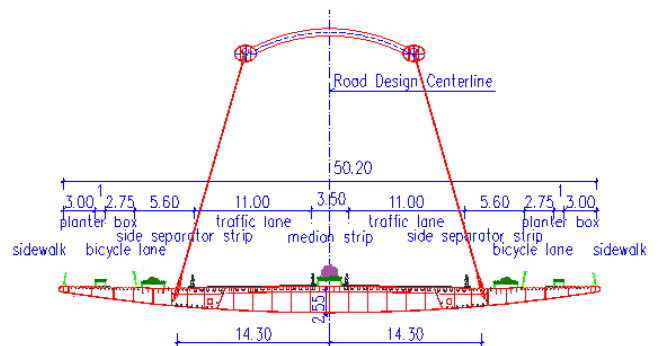


Figura 2. Sección transversal del puente

como cortante transversal. Puentes anteriores [1-3] con esta misma problemática han resuelto esta cuestión mediante estrategias como incrementar la sección del arco para aumentar su capacidad transversal o usando cables activos para contrarrestar las fuerzas de desvío.

En este puente se adoptó una estrategia diferente, combinando los arcos con la celosía para generar una forma espacial. Los arcos

laterales se arriostran mediante un tejido de diagonales. El trabajo combinado de ambos elementos consigue una respuesta eficiente en la que los arcos actúan como los cordones principales de una cercha y el sistema de arriostramiento distribuye las fuerzas fuera de plano entre ellos. Los semiarcos quedan pues sometidos principalmente a fuerzas de compresión (diferente en cada arco). Por su lado, y contrariamente a lo que ocurre en los arcos convencionales, el sistema de arriostramiento sufre fuerzas de compresión no solo bajo cargas horizontales sino también verticales, incluyendo el peso propio. La eficiencia de la respuesta de la estructura espacial se completa con la rigidez del tablero y las péndolas inclinadas.

Comparándola con una solución de arco en un plano convencional, el comportamiento estructural es de mayor complejidad, requiriendo un cuidadoso análisis estructural. Un aspecto crítico del diseño incluyó las verificaciones de las uniones en X y en K en la intersección de las diagonales y arcos, dado su papel esencial en la integridad estructural.

2. Descripción de la estructura

El puente tiene una longitud total de 272 metros, distribuidos en cinco vanos de 10-24-36-152-36-24-10 metros. El vano principal, situado sobre el cauce del río, es soportado por el arco superior. El tablero, de 50,2 metros de anchura, alberga dos calzadas de tres carriles cada una, junto a sendas zonas laterales para peatones y ciclistas.

El tablero es continuo de estribo a estribo y actúa como cordón de tracción para los arcos de la sección central, auto anclando la componente horizontal del arco. Se compone de dos vigas cajón longitudinales principales situadas en los bordes de la plataforma reservada para el tráfico y conectadas por vigas transversales que soportan un tablero de acero ortótropo. Las costillas transversales se extienden en voladizo hacia los laterales para dar cabida a las vías peatonales.

El arco presenta una sección tubular de anchura variable y está arriostrado transversalmente por tubos circulares dispuestos en celosía. El tablero está suspendido de los arcos mediante péndolas inclinadas.

El vano principal se apoya en pilas de hormigón con fustes inclinados que siguen la inclinación del arco. Estas pilas están unidas por un diafragma transversal que sobresale del nivel del suelo. La cimentación consiste en pilotes perforados con diámetros que oscilan entre 1,2 y 1,8 metros y profundidades entre 11 y 28 metros.

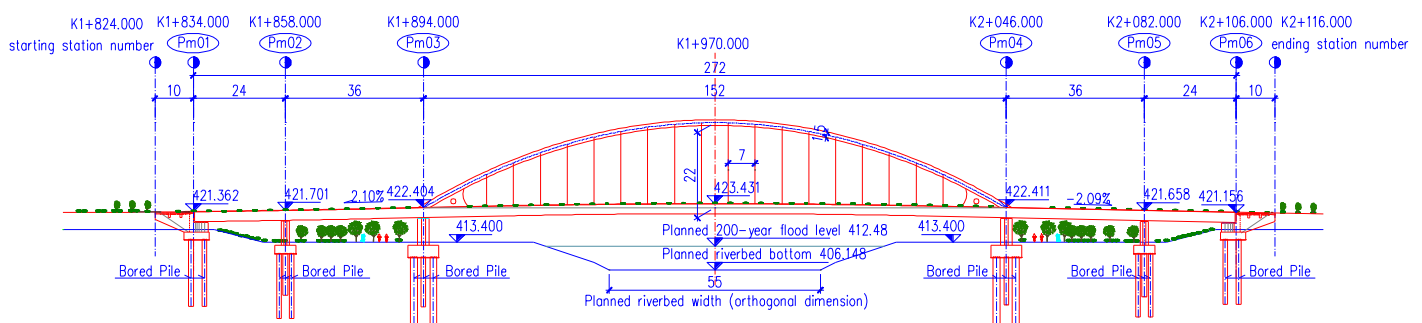


Figura 3. Alzado del puente



Figura 4. Vista en planta

Como se ha indicado anteriormente, el comportamiento de los arriostramientos transversales en un puente de arco curvo es mucho más complejo que en un puente de arco recto. El arriostramiento transversal está sometido a una variedad de esfuerzos, incluyendo tracción, compresión, flexión, corte y torsión. Durante la fase de diseño conceptual, se seleccionaron secciones circulares con propiedades isotrópicas para el arriostramiento transversal con el fin de satisfacer mejor los requisitos estructurales.

Las uniones soldadas entre secciones circulares huecas presentan un comportamiento estructural complejo, por lo que su comportamiento estático y de seguridad frente a la fatiga resultan críticos durante la fase de diseño para la construcción. La opción de rellenar con hormigón tubos metálicos (CFST), empleada en China en los arcos principales de grandes puentes, no es tan adecuada para resolver los problemas específicos de las uniones en K o en X tan numerosas en esta obra. En ellas además de transmitir esfuerzos axiales deben resistirse momentos concentrados relevantes en los que las soluciones rigidizadas son más eficaces. Se Igualmente la ejecución es compleja para garantizar la correcta entrada del hormigón, así como para controlar los fenómenos reológicos del hormigón, particularmente la

retracción, con el tiempo pueden formarse huecos entre el hormigón y los tubos de acero. Asimismo, el peso añadido del hormigón aumenta los esfuerzos que actúan sobre las uniones.

Se optó por ello por recurrir a uniones rigidizadas con diafragmas internos adaptados al comportamiento estructural de cada uniones.

En la intersección entre el arriostramiento y los arcos se forman uniones soldadas en K. Dada la complejidad de las fuerzas actuantes sobre el arriostramiento, se añadieron diafragmas en las intersecciones entre chapas para mejorar el comportamiento de las uniones y reducir las tensiones en las soldaduras. Este enfoque mejora el comportamiento estructural y asegura la seguridad a largo plazo del puente.

Entre riostras se forman uniones en X. Según la magnitud de las fuerzas en dichas uniones se disponen de dos a cuatro rigidizadores en ángulo en el interior de los tubos. La posición de las chapas se determina mediante cálculos de detalle que optimizan el comportamiento estructural.

La conexión arco-tablero mediante el sistema de péndolas se realiza mediante un sistema de cartelas tanto en el arco como en el tablero. Estas cartelas, que llevan la inclinación del sistema de péndolas para evitar la introducción de esfuerzos fuera del plano del sistema de arriostramiento, están soldadas a cada

uno de los elementos estructurales principales del puente en la parte superior e inferior. Las uniones son rotuladas y con detalles que mejoran el comportamiento a fatiga de los elementos de la unión.

Tal y como se explica en la sección 4, estas péndolas fueron puestas en carga en la estructura sobre apeos tras un estudio detallado de la secuencia de tesado que permitiese un estado tensional del puente óptimo bajo cargas permanentes.

3. Análisis y diseño de las uniones

En colaboración con la universidad de Tongji, se llevó a cabo un estudio especializado sobre el diseño de uniones entre secciones circulares huecas. Este trabajo incluyó el desarrollo de modelos locales precisos de elementos finitos (MEF) en 3D utilizando elementos sólidos para analizar el comportamiento estructural de las uniones. Además, se llevaron a cabo pruebas de carga estática y de fatiga de prototipos a gran escala.

Para las pruebas se utilizaron equipos avanzados, como un sistema de carga universal de tonelaje ultra grande y una plataforma de pruebas de fatiga estructural de ingeniería a gran escala. A continuación, se resumen las principales conclusiones [4]:

- **Mejora de la capacidad de carga estática:** La adición de diafragmas mejoró significativamente la capacidad de carga

estática de las uniones. En el caso de las uniones en K soldadas, el esfuerzo máximo bajo carga estática en la línea de intersección entre perfiles se redujo en un 72%, mientras que en el caso de las uniones X, la reducción fue del 54%.

- **Comportamiento elástico e índices de redundancia:** Tanto las pruebas de carga estática como el análisis según el MEF confirmaron que las uniones soldadas en K y X permanecían en rango elástico bajo las cargas de diseño, con índices de redundancia de 4.7 y 3.5, respectivamente. Se observó una gran deformación plástica en las regiones de intersección cuando se alcanzaron las cargas de rotura, lo que indica una redundancia suficiente.
- **Distribución de tensiones y reducción de tensiones en puntos críticos:** La inclusión de diafragmas de refuerzo redujo significativamente las tensiones de los puntos críticos de las regiones de intersección de las uniones. Se identificaron nuevos puntos críticos de acumulación de tensiones en las intersecciones de dichos diafragmas y las líneas de intersección, junto con los puntos habitualmente esperables.
- **Mejora del comportamiento a fatiga:** Los diafragmas internos reducen la carrera de tensiones en fatiga en los puntos críticos de la unión soldada hasta un 48%. Esta reducción incrementa la vida frente a fatiga de estas uniones hasta un 535%, lo que

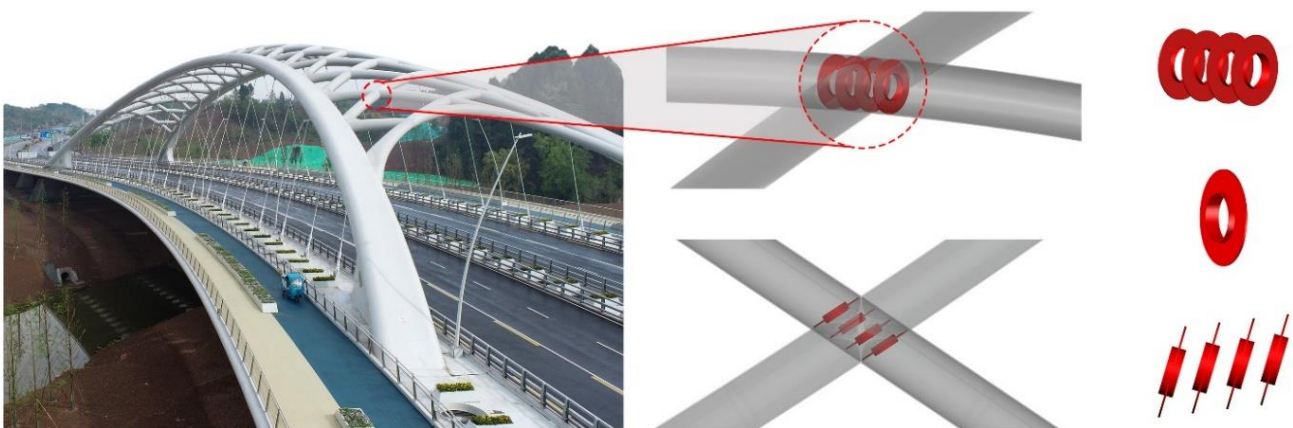


Figura 5. Configuración del nudo tubular en Unión X con rigidizadores

demuestra una mejora significativa del comportamiento frente a este fenómeno.

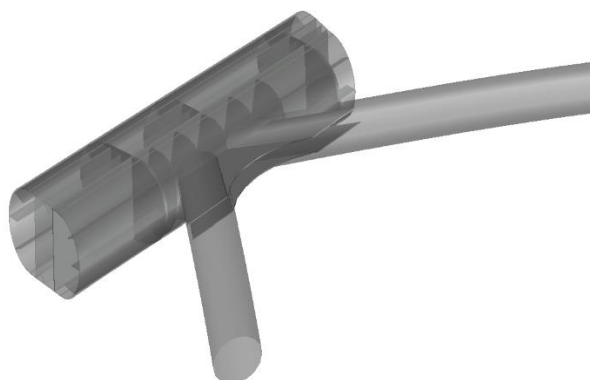


Figura 6. Unión K con rigidizadores

4. Construcción

La construcción del puente comenzó en el verano de 2020 y finalizó en diciembre de 2022. El tablero, arcos y estructura de rigidización se construyeron en taller. In situ, se realizó la construcción del tablero apeado, aprovechando la baja altura con respecto al lecho del río y el parque fluvial circundante. La secuencia de construcción fue la siguiente:

- Construcción de cimentaciones, pilas y apeos provisionales.
- Transporte a obra de cada uno de los tramos del tablero, montaje sobre apeos y soldadura in situ.
- Montaje de los tramos del arco con la estructura apeada. Esto incluye la ejecución de arriostramientos y uniones entre tramos.
- Tesado de las péndolas según secuencia establecida y desapeo del puente
- Retirada de los apeos, equipamientos y finalización del puente.

Las cuantías de acero en el tablero y los arcos son de 410 kg/m² y 170 kg/m², respectivamente, y el

peso total del puente es de alrededor de 7.800 toneladas.

Dadas las grandes dimensiones de cada sección metálica, los requerimientos resistentes, el gran espesor de chapa de acero y las características curvas del arco de acero, los tramos de estructura metálica se subdividieron en múltiples subtramos para su facilitar su fabricación y montaje. Para conseguir las secciones tubulares, las planchas de acero se curvaron con una prensa hidráulica de 2.000 toneladas.



Figura 7. Corte CNC y producto acabado

Los tubos se armaron con el denominado «método intermitente», empleando dos semi secciones circulares. La preparación contemplaba las tolerancias para compensar los procesos de doblado y corte. Para controlar la longitud de los componentes y minimizar la deformación causada por la liberación de tensiones se aplicaron diversas medidas como la mejora de extremos y un corte muy preciso de las secciones de conexión.



Figura 8. Ejecución del arranque del arco

soldaduras de penetración total y mejorar la resistencia a la fatiga. Adicionalmente, se aplicó un martilleo ultrasónico para mitigar las tensiones residuales y garantizar la integridad de las soldaduras y su resistencia a la fatiga a largo plazo.

Se controló la compleja geometría del puente y sus numerosos nodos irregulares se gestionaron mediante tecnología digital de premontaje, lo que permitió un estricto control de la geometría y un montaje exacto de la estructura.

En el caso de los tubos de acero de mayor diámetro, se utilizó tecnología de corte de líneas de intersección de alta precisión para preparar las uniones, garantizando la exactitud y la alineación adecuada. A continuación, se empleó un proceso de soldadura en dos pasos para garantizar



Figura 9. Montaje del tablero sobre apeos

5. Diseño orientado a los peatones

Además de sus características estructurales, el diseño prioriza la comodidad y usabilidad de las zonas para peatones y ciclistas. Largos trayectos próximos al tráfico pueden crear una experiencia poco agradable para el peatón, sobre todo cuando los vehículos están demasiado cerca. Para mejorar la comodidad de los usuarios, las zonas destinadas a peatones se situaron a ambos lados de las vigas longitudinales principales, apoyadas en ménsulas transversales y separándolas de las zonas de tráfico. Las 36 péndolas del puente, ancladas entre la zona de tráfico rodado y peatonal contribuyen aún más a la comodidad de los peatones al crear una barrera física.

Esta separación se ve reforzada por la inclusión de grandes jardineras y un parque lineal a lo largo del puente, situados entre las péndolas y los carriles para peatones y ciclistas. Estas jardineras, diseñadas para albergar árboles y flores, no sólo mejoran la comodidad de los usuarios, sino que también crean una conexión visual y ecológica entre el puente y el parque circundante.



Figura 10. Vista del paseo peatonal

6. Conclusion

El diseño de este puente de arco metálico implicó una cuidadosa integración de innovación y atractivo estético, dando como resultado una estructura que equilibra resistencia,

funcionalidad y elegancia visual. Mediante el empleo de arcos metálicos espaciales el puente es capaz de alcanzar luces significativas al tiempo que minimiza la necesidad de apoyos adicionales, optimizando el uso de materiales y la eficiencia de la construcción.

El proyecto requirió de herramientas de análisis avanzadas, especialmente en las intersecciones entre secciones circulares huecas, para dar respuesta a los requerimientos que se desprenden de una geometría compleja y los efectos de la fatiga. La combinación de los semiarcos laterales y la celosía metálica intermedia forma un sistema estructural capaz de resistir fuerzas fuera del plano y los momentos laterales que esto provoca. Se configura así una respuesta estructural más compleja pero eficaz que permite adaptar los soluciones en arco a trazados curvo, permitiendo de esta forma mantener el aspecto ligero y atractivo de este tipo de estructuras y sumando una componente más espacial y dinámica visualmente.

La durabilidad y comportamiento a largo plazo del puente se han mejorado gracias a su diseño, que requiere un mantenimiento mínimo y reduce su huella de carbono a largo plazo. Además, el uso de acero 100% reciclable garantiza la sostenibilidad al final de la vida útil del puente. El puente combina la eficiencia estructural con un diseño sencillo pero elegante. Las suaves curvas espaciales de los arcos, junto con los arriostramientos transversales, contribuyen a su discreto atractivo. Además de cumplir como parte funcional de la infraestructura de transporte, el puente complementa su entorno y ofrece a los usuarios una experiencia visual agradable.

En conclusión, el diseño original de un puente de arco de acero representa una mezcla armoniosa de innovación, funcionalidad y excelencia estética, que lo convierte en un elemento destacado en cualquier paisaje, al tiempo que proporciona una infraestructura de transporte fiable y eficiente.

Agradecimientos

El diseño experimental detallado de las uniones entre secciones circulares huecas se realizó en las instalaciones del Laboratorio Estatal de Mitigación de Desastres en Ingeniería Civil en la universidad de Tongji, Shanghai, China; en colaboración con SMEDI (Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd) y Huning Steel Mechanism Co., Ltd. Los autores expresan su gratitud a estas organizaciones por sus valiosas aportaciones, incluida la aportación de información crítica y soporte técnico, lo que contribuyó al éxito del estudio.

Ficha técnica

• **Propiedad:** Chengdu Lecheng International Airport New Town Construction Co., Ltd

• **Diseño conceptual y preliminar:**
Carlos Fernández Casado S.L. (CFC):
Javier Muñoz-Rojas, Pedram Manouchehri,
Manuel Valero, Darío Pérez Sebastián

• **Diseño de detalle e ingeniería de construcción:**
SMEDI (Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd):
Tianyi Ying

• **Constructor principal:**
Sinohydro Bureau 7 CO., LTD

• **Supervisión de la construcción:**
Sichuan Yuanfeng Construction Project Management Co., Ltd

• **Suministrador de la estructura metálica:**
Jiangsu Huning Steel Mechanism Co., Ltd:
Wu Wen-ping

Referencias

- [1] Manterola Armisen, J. & Muñoz-Rojas Fernández, J. (2008) Nuevo puente sobre el río Bidasoa Endarlatsa, *IV Congreso de la Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural - Congreso Internacional de Estructuras*, Valencia, 24–27 de noviembre de 2008.
- [2] Manterola, J. & Gil Ginés, M.A. (2008) Puente sobre el río Galindo en Baracaldo, *IV Congreso de la Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural - Congreso Internacional de Estructuras*, Valencia, 24–27 de noviembre de 2008.
- [3] Manterola, J., Muñoz-Rojas, J. & Gil, M.A. (2011) Spatial Arch Bridges Over the Galindo and Bidasoa Rivers, *Structural Engineering International*, 21(1): 114–121. <https://doi.org/10.2749/101686611X12910257102794>.
- [4] Chen, Y., Zhou, F., Wang, W., Xia, X., Ying, T. & Yue, G. (2023) Experimental and numerical studies on the hot spot stress calculation method for welded CHS X-joints stiffened by internal ring stiffeners, *Advances in Structural Engineering*, 26(3): 459–476. <https://doi.org/10.1177/13694332221128848>.