

Pasarela Malecón Checa sobre el río Rímac en Perú

Malecon Checa footbridge over the Rimac River in Peru

Juan Luis Bellod Thomas^a, David Sanz Cid^b, Diego Aita Santos^c

^a Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Cesma Ingenieros, S.L. Director General. cesma@cesmaing.com

^b Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Cesma Ingenieros, S.L. Ingeniero. cesma@cesmaing.com

^c MSc Project Manager - Ingeniero de Obras Públicas. Cesma Ingenieros, S.L. Ingeniero. peru@cesmaing.com

RESUMEN

La pasarela Malecón Checa sobre el río Rímac en Perú sustituye a la pasarela atirantada anterior que colapsó durante las inundaciones causadas por El Niño en 2017. Su diseño está condicionado por la socavación en el cauce y por el sismo. La pasarela cuenta con un único vano de 84 m, alejando los estribos de la zona inundable, con cimentaciones profundas para evitar su descalce. Este vano se resuelve con un doble arco superior, con 11.2 m de flecha ($f/L = 1/7.5$), uniéndose ambas mitades en el encuentro con el tablero. Dicho tablero presenta un ancho variable de 5 a 8 m, y está formado por un cajón metálico de 1.7x0.8 m, con costillas laterales que sustentan un forjado mixto de 0.16 m de espesor.

ABSTRACT

The Malecon Checa footbridge over the Rimac River in Peru replaces the previous cable-stayed footbridge that collapsed during the 2017 El Niño's floodings. Its design is conditioned by the scour on the riverbed and by the seismic action. The footbridge features an 84 m single span that distances the abutments from the flood zone, with deep foundations to avoid scouring. Such span is solved with a double top arch, featuring a sag of 11.2 m ($f/L = 1/7.5$). Both halves of the arch merge at the connection with the deck. The deck itself features a variable width from 5 to 8 m, and it is solved with a 1.7x0.8 m steel box girder, with transverse beams that support a 0.16 m thick composite deck.

PALABRAS CLAVE: pasarela, socavación, sismo, estructura mixta, arco, defensa ribereña

KEYWORDS: footbridge, scour, seismic action, composite structure, arch, river protection

1. Introducción

Con objeto de mantener unas adecuadas condiciones de interconexión sobre el río Rímac entre las avenidas Malecón Checa y Libertadores, se plantea construir una pasarela peatonal a la altura de la cuadra 18 de la Avenida Malecón Checa, que da continuidad al tránsito de peatones entre los distritos de San Juan de Lurigancho y El Agustino, en la ciudad de Lima, Perú.

Esta pasarela reemplaza la estructura previa en dicho punto del cauce, severamente dañada durante el fenómeno de El Niño de 2017.



Figura 1. Vista general de la pasarela

2. Antecedentes

En el mes de marzo de 2017, se produjeron inundaciones extraordinarias en toda la costa del Perú, provocadas por el fenómeno de El Niño. Este evento climático generó un incremento excepcional del caudal del río Rímac a su paso por la ciudad de Lima. Esto, sumado al deterioro progresivo de las riberas del cauce de este río en los últimos 40 años, que han reducido el ancho natural del río en más del 50%, originaron una socavación general del cauce, así como una socavación local al pie de las estructuras ejecutadas directamente sobre el citado cauce.

En el caso de la pasarela atirantada anterior, el terreno socavado por el río debilitó el apoyo de la cimentación del estribo de la margen izquierda, generando el desequilibrio global de la estructura, lo que provocó su colapso a pesar de los esfuerzos y medidas de contingencia extraordinarias que se implementaron.

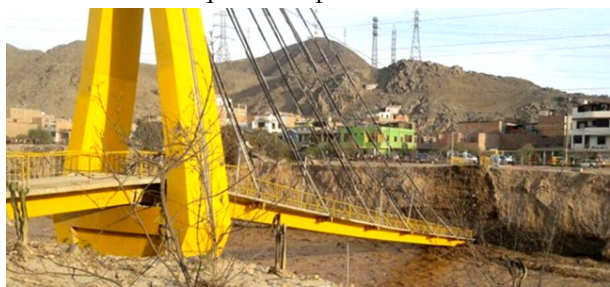


Figura 2. Colapso de la pasarela atirantada anterior, marzo 2017

En respuesta a los daños reportados por este evento extraordinario, el Gobierno Central creó la Autoridad para la Reconstrucción con Cambios (ARCC), con la misión de restituir toda la infraestructura física dañada y destruida por el fenómeno de El Niño. Dentro de este Plan Integral, se dispuso el diseño y construcción de una nueva pasarela con el nombre de pasarela Malecón Checa con el objetivo de restablecer la conectividad entre los distritos afectados por el colapso de la infraestructura anterior.

3. Condicionantes

Tal y como queda patente en el apartado anterior, el principal condicionante al que se enfrenta esta pasarela es la eventual socavación de su cimentación en un evento de fuerte avenida, lo que ocurre con frecuencia en el río Rímac.

Por tanto, como paso previo al proyecto, se realizó un estudio hidrológico e hidráulico pormenorizado, a partir de la información disponible en el registro de los aforos existentes, con una antigüedad de 95 años, empleando una distribución extrema Gumbel como análisis estadístico de mejor ajuste.

En concreto, de acuerdo con las especificaciones del Manual de Diseño del Ministerio de Transportes y Comunicaciones de Perú (MTC), se evaluaron los caudales esperables para los periodos de retorno de 150 años (Evento Extremo I) y de 500 años (Evento Extremo II), obteniéndose valores de $540 \text{ m}^3/\text{s}$ y $685 \text{ m}^3/\text{s}$, respectivamente. Para dichos periodos de retorno se obtuvo una profundidad máxima de socavación de 5 m en los estribos de la pasarela.

Por contextualizar dichos valores, durante el fenómeno de El Niño de 2017, que produjo el colapso de la estructura previa, el caudal máximo estimado en la zona de la pasarela fue de $200 \text{ m}^3/\text{s}$.

Otro de los condicionantes principales fue la mala calidad del terreno, con espesores de rellenos antrópicos cercanos a los 6 m, lo que, unido a la profundidad de socavación mencionada anteriormente, obligó a emplear una cimentación profunda.

Asimismo, de acuerdo con el mapa sísmico del Perú, la pasarela se encuentra en la zona 4 (muy alta sismicidad), con una aceleración pico del terreno (PGA) de $0.62g$, y una clase de sitio tipo C, correspondiente a suelo muy denso y roca suelta.

Finalmente, como condicionante añadido, existen en ambos márgenes de la ribera del río Rímac numerosos servicios existentes, entre los que cabe destacar la presencia de una línea aérea de alta tensión en el margen izquierda, lo que condicionó los medios de ejecución para la cimentación de la nueva estructura.

4. Concepción estructural y descripción

Los condicionantes citados anteriormente fueron resueltos mediante la definición de una estructura de un único vano, de 84 m de longitud total entre ejes de estribos, compuesta por un doble arco superior que arranca del centro de la sección, con péndolas formadas por tubos de sección circular y tablero mixto. El ancho del tablero es variable, siendo el ancho mínimo en los estribos igual a 5 m e incrementándose hasta los 8 m en la parte central mediante un sector circular de 563.82 m de radio que se adosa en los extremos.



Figura 3. Vista interior de la pasarela

Los arcos superiores tienen una flecha de 11.2 m, lo que corresponde con una relación flecha/luz de $f/L = 1/7.5$. La sección es trapezoidal, con 1 m de canto y lados superior e

inferior de 0.4 m y 0.5 m respectivamente. Estas secciones se unen en los arranques, formando un único cajón del mismo canto y ancho variable y se van separando entre sí a lo largo del tablero hasta un máximo de 1.05 m entre caras interiores en la sección central.

El tablero está formado por un cajón metálico de ancho 1.7 m y canto 0.8 m del que arrancan costillas cada 3 m, formadas por vigas armadas con sección doble T y canto variable, hasta unas vigas de borde formadas por perfiles laminados de 0.35 m de canto.



Figura 4. Vista lateral de la pasarela

El tablero y los arcos se unen mediante péndolas verticales resueltas con sección tubular de $\varnothing 0.324$ m de diámetro, lo que resultó más adecuado considerando la flecha del arco, y permitió un cierto ahorro económico respecto al eventual empleo de cables o de barras.

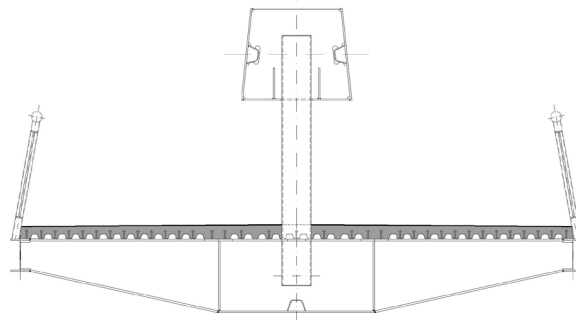


Figura 5. Sección tipo de tablero, arco y péndolas

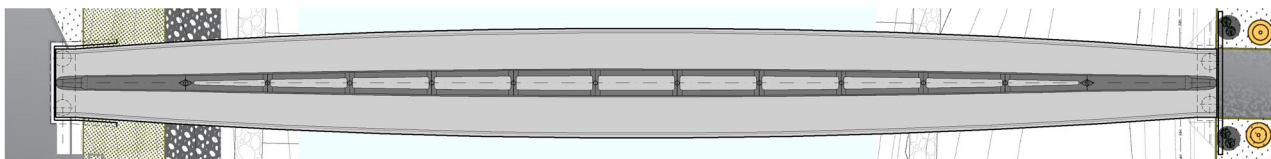


Figura 6. Vista en planta de la pasarela

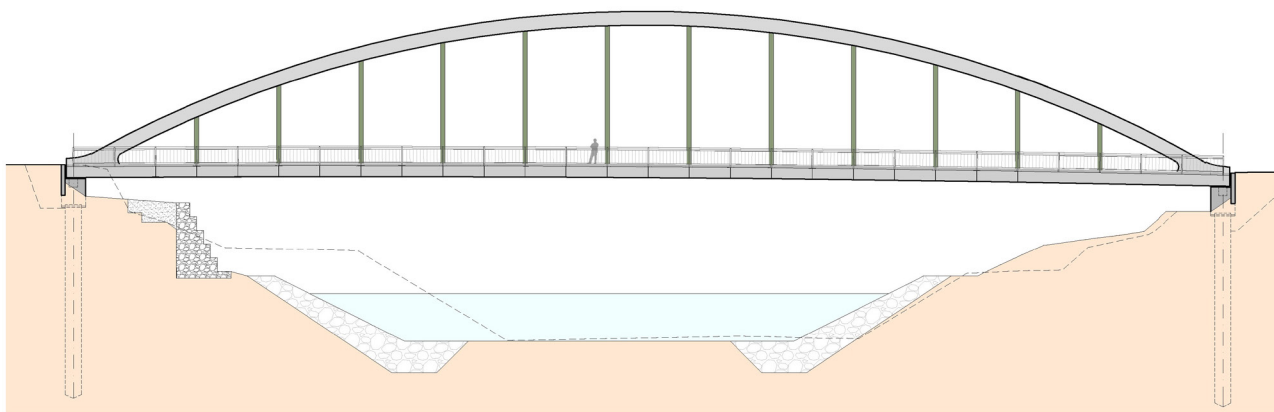


Figura 7. Vista en alzado de la pasarela

El forjado mixto presenta un espesor total de 0.16 m y se materializa mediante una chapa grecada colaborante de acero galvanizado, sobre la cual se vierte el hormigón armado que conforma la superficie de rodadura final, mediante el empleo de un producto desactivante que permite descubrir el árido superficial y, por tanto, dotar de rugosidad suficiente a la rasante.

Los estribos se definen mediante una silla cargadero de hormigón armado con aletas en vuelta, con cimentación profunda por medio de 2 pilotes de 1.20 m de diámetro y 14 m de longitud. Se buscó optimizar al máximo la profundidad de los pilotes, teniendo en cuenta los condicionantes indicados en el apartado anterior. La ejecución de dichos pilotes siguió un método poco convencional, descrito en el apartado de proceso constructivo.

En la parte central de la silla cargadero se aloja una ménsula metálica unida a la superestructura que sirve como tope sísmico.

5. Actuaciones de defensa ribereña

Con objeto de prevenir la erosión en la zona del cauce donde se encuentra la pasarela, se ejecutaron medidas de defensa ribereñas.

En concreto, en la margen derecha del río, que es la más susceptible a la erosión y que, además, se encuentra más próxima al estribo de la estructura, se dispuso un muro de gaviones escalonados hasta alcanzar una altura de 5 m.

Adicionalmente, en ambas márgenes se ejecutaron escolleras de protección de los taludes, para evitar la erosión del pie de talud, lo que podría provocar un fenómeno de deslizamiento de ladera.



Figura 8. Muro de gaviones y escollera de pie de talud

Estas labores de protección se ejecutaron durante la temporada de estiaje del río entre los meses de mayo y octubre.

6. Detalles

Los detalles constructivos fueron concebidos para asegurar unos adecuados mecanismos de transferencia de las fuerzas entre los elementos de la estructura y garantizar su durabilidad, así

como para facilitar la fabricación y el ensamblaje de los elementos de la pasarela.

En concreto, el detalle de mayor complejidad del proyecto fue la unión del arco con el tablero, para el cual resultó necesario definir gran número de rigidizadores y de detalles de soldadura, todo ello teniendo en cuenta la secuencia de ensamblaje para garantizar que todos los elementos eran instalables y soldables. Para ello, se realizó un modelo 3D de la unión.

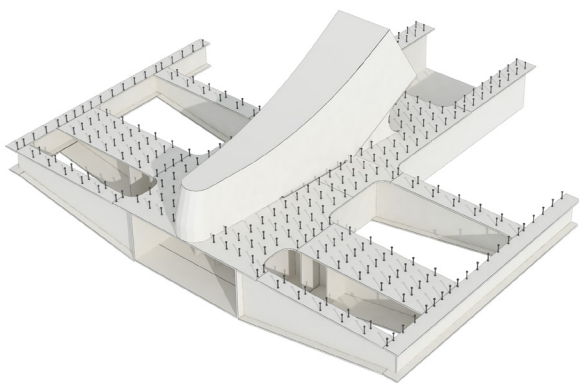


Figura 9. Modelo 3D del nudo de unión entre el tablero y el arco

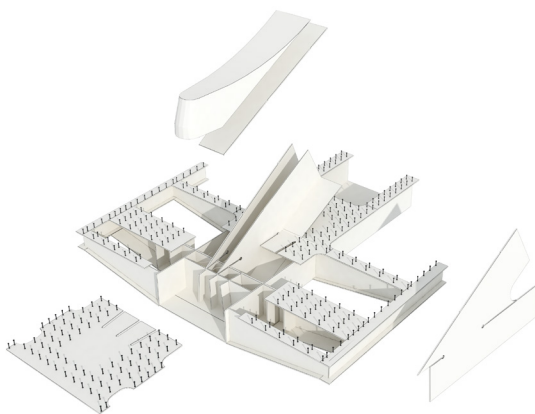


Figura 10. Despiece del nudo de unión entre el tablero y el arco

Por otro lado, el tope sísmico dispuesto en ambos estribos se resolvió mediante una ménsula metálica que se inserta en el dintel del estribo. Esta ménsula queda abrazada por cuatro apoyos de neopreno-teflón, coaccionando el movimiento del puente en todas las direcciones.

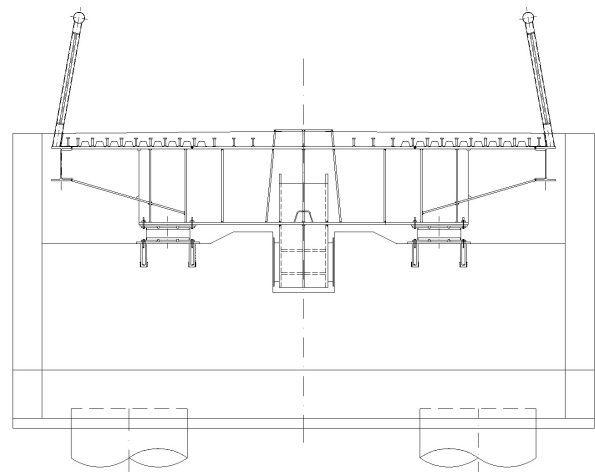


Figura 11. Alzado de estribo

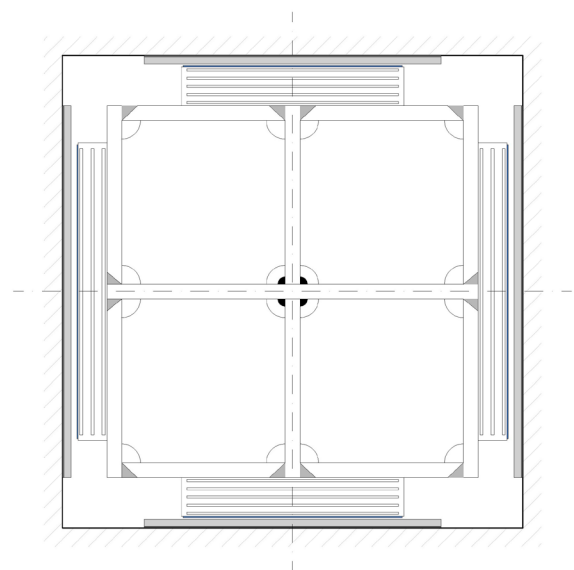


Figura 12. Detalle de tope sísmico

7. Cálculo y comportamiento dinámico

7.1 Análisis del pandeo del arco superior

Puesto que desde el primer momento se buscaba realizar una estructura ligera y de gran transparencia, se prestó una gran atención a la verificación detallada de los elementos comprimidos frente al pandeo, para evitar su sobredimensionamiento. En este caso, el elemento crítico es el arco superior, al no estar arriostrado transversalmente.

Para tener en cuenta el comportamiento del arco, y considerando que las péndolas presentan cierta rigidez fuera del plano, se recurre a un cálculo no lineal mediante elementos finitos, en el que se considera una deformada inicial equivalente a las imperfecciones geométricas de los arcos, distinguiendo entre imperfecciones geométricas simétricas y asimétricas. Posteriormente, se realiza un cálculo no lineal a nivel geométrico que permite obtener la amplificación de esfuerzos derivada de los efectos de 2º orden de la estructura.

Se pudo observar que, de los esfuerzos totales solicitantes en el arco superior, un 50% correspondía a los efectos de 2º orden, para las combinaciones más desfavorables.

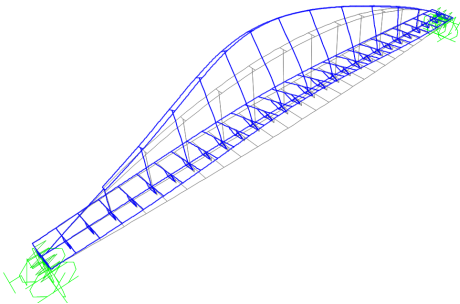


Figura 13. Primer modo de pandeo fuera del plano

7.2 Análisis frente a acciones extremas

Tal y como se ha comentado anteriormente, la subestructura de esta pasarela está fuertemente condicionada por la acción sísmica y por la socavación.

Para tener en cuenta ambas situaciones, los pilotes de la cimentación se analizaron mediante el programa RIDO, teniendo en cuenta el perfil del terreno. En concreto, se tuvo en cuenta la presencia de un talud próximo al pilote, lo que obligó a disminuir el coeficiente de balasto horizontal en el lado del cauce.

En primer lugar, para la combinación EXTREMO I, se analizó la acción sísmica

aplicando las reacciones transmitidas por el tablero en la cabeza de los pilotes, y considerando la mitad de la profundidad de socavación total.

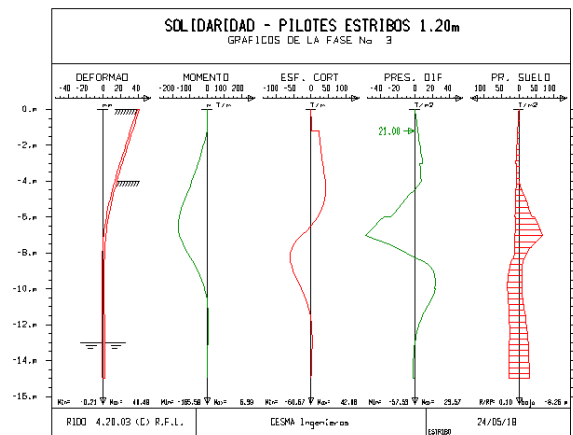


Figura 14. Cálculo de los pilotes en RIDO

En segundo lugar, para la combinación EXTREMO II, los pilotes se analizaron considerando la profundidad de socavación total.

8. Proceso constructivo

8.1 Pilotes

Una de las principales actividades a llevar a cabo durante la construcción de la pasarela fueron las tareas relacionadas con la ejecución de la excavación de los pilotes de los estribos.



Figura 15. Vista general de la excavación manual de los pilotes del estribo de la margen derecha

Esta actividad se vio condicionada por la interferencia con una línea eléctrica de alta tensión sobre el eje transversal del estribo de la margen derecha que imposibilitaba garantizar la distancia mínima de seguridad para trabajar con los medios mecánicos habituales (pilotera, grúa, corel barrel, trépano, etc.). Como solución alternativa, se recurrió a procedimientos artesanales de uso frecuente en Perú, como la excavación manual basada en la excavación tradicional de pozos verticales.

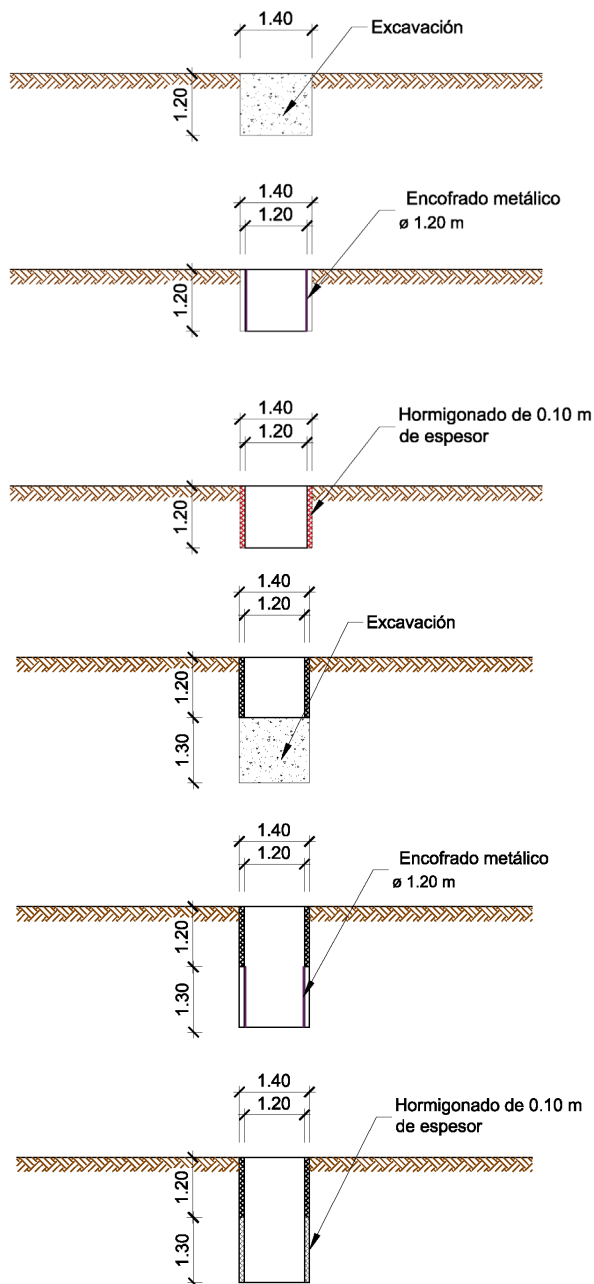


Figura 16. Secuencia de ejecución de los pilotes

Esta metodología consiste en realizar una primera excavación de 1.20 m de profundidad y 1.40 m de diámetro y, una vez realizada la excavación, proceder con la colocación de encofrado metálico de 1.20 m de diámetro y hormigonar todo el perímetro de la excavación, definiendo un anillo perimétrico de 0.10 m de espesor.

Después de 24 h del hormigonado de la primera fase de excavación, se realiza una nueva excavación de 1.30 m de profundidad y 1.40 m de diámetro, y se procede, de nuevo, a la colocación del encofrado metálico de 1.20 m de diámetro en el centro de la excavación para hormigonar todo el perímetro, definiendo un segundo anillo perimétrico de hormigón del mismo espesor que el anterior.

El proceso anterior se repite de forma simultánea cada 24 h (como mínimo) hasta alcanzar la longitud total de los pilotes definida en los planos del proyecto.

Por último, para conseguir una buena transmisión de esfuerzos mediante la adherencia entre las dos superficies en contacto del hormigón de primera fase (anillos del pozo de excavación) y el de segunda fase (columna completa del pilote) es importante garantizar la rugosidad y limpieza. Para ello, se cepilló la superficie del hormigón de primera fase, retirando parte del mortero hasta dejar a la vista el árido grueso y eliminando la presencia de polvo, grasa, aceites, restos de pintura, etc. que pudieran reducir la adherencia entre ambas superficies. Finalmente, se humedeció la superficie del hormigón antiguo y se esperó a que la superficie estuviera visiblemente seca para introducir la jaula de armadura y hormigonar los pilotes hasta completar su diámetro total.

8.2 Ingeniería de detalle para la fabricación de la estructura metálica

Como labor complementaria al proyecto, Cesma realizó el desarrollo de la ingeniería de detalle para la fabricación de la estructura metálica. Este trabajo se dividió en dos etapas.

En primer lugar, se llevó a cabo el diseño y creación de un modelo inteligente de acero estructural donde se definieron gráficamente los elementos, especificando detalladamente cantidades, tamaño, forma y/o ubicación respecto al conjunto del proyecto (Modelado BIM LOD 300 de la Superestructura Metálica). Con este modelo se analizó el proyecto, se resolvieron cuestiones de diseño, se acordó la secuencia de armado y se definió el formato y las dimensiones de las planchas de acero. Asimismo, en dicho modelo se incorporaron las contraflechas de proyecto.

En segundo lugar, partiendo del modelo BIM LOD 300 realizado en la fase anterior, se definió y desarrolló el proyecto de fabricación de la estructura metálica principal (Modelado BIM LOD 400), que contempla las diferentes fases a ejecutar para la fabricación de la superestructura metálica, tales como la elaboración de planos de taller y planos de fabricación, despiece y montaje; incluyendo, entre otros, cotas, biseles, juntas de soldadura, preparaciones de borde, ubicación de uniones y sus códigos de marcado en taller. Asimismo, se realizaron listados de planchas y perfiles para su compra, así como áreas de pintura exterior e interior.

8.3 Montaje de la superestructura

Para el montaje de la superestructura se dispusieron torres de apeo provisionales sobre el lecho del cauce, aprovechando la época de estiaje del río.

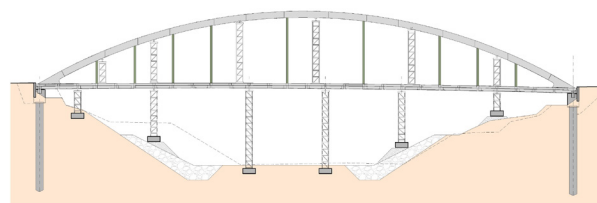


Figura 17. Montaje de la superestructura mediante torres de apeo provisionales

Finalmente, si bien no era el método concebido originalmente en proyecto, el tablero inferior se empujó desde el estribo derecho hasta alcanzar el estribo izquierdo. Una vez situado en su posición final se realizó el montaje del arco siguiendo la secuencia de armado definida en el proyecto, y con la que se habían elaborado los planos de taller.



Figura 18. Maniobra de montaje del arco sobre torres de apeo provisionales

9. Prueba de carga dinámica

Una vez finalizada la estructura principal, se llevó a cabo la prueba de carga dinámica con el objetivo de comprobar si la pasarela estaba dentro de los rangos de frecuencias propias problemáticas para el confort de los usuarios.

Para realizar las comprobaciones pertinentes fue necesario excitar la estructura mediante pasadas sucesivas de grupos de personas andando y corriendo, que avanzaban en paralelo y de manera acompasada a lo largo del tablero.



Figura 19. Excitación de la estructura por el paso de un grupo de personas corriendo

Para cada punto de medición, se reflejaron los datos correspondientes a cada fase de la prueba de carga en las que se registraron oscilaciones apreciables, inducidas por los grupos de peatones (fuente de excitación). Y para la máxima aceleración registrada, se especificó en qué punto y fase se dio.

Una vez especificado el caso más desfavorable se realizó el análisis crítico de la probabilidad de ocurrencia de esta situación, y se determinó que, para los valores tan bajos obtenidos, el comportamiento dinámico de la pasarela era aceptable.

10. Urbanización y acabados

El objetivo principal del proyecto consistía en dotar de permeabilidad y comunicación a los vecinos y transeúntes de la zona de forma que se transformase y mejorase la concepción preexistente del público en general como un espacio polivalente donde desarrollar actividades al aire libre.

Para la consecución del objetivo anterior, además de la construcción de la pasarela, se desarrolló un proyecto de mejora de la urbanización e iluminación del entorno directo, de forma que se garantizaran las condiciones de accesibilidad y se facilitasen la movilidad y el

desplazamiento autónomo de las personas en condiciones de seguridad potenciando la apariencia estética y la armonía de la estructura en una visión global dentro del entorno urbano en el que se ubica.

Para integrar la nueva estructura con la infraestructura existente, se realizó un tratamiento urbanístico, trabajando con diferentes texturas, colores y materiales. Se cuidó el pavimento empleado, así como el nuevo mobiliario urbano, fabricado a partir del uso de productos reciclados con un tratamiento de color armónico y visualmente estético, todo ello integrado con vegetación natural propia de la ciudad de Lima, de forma que su mantenimiento fuera sencillo y económico



Figura 20. Nueva plataforma de desembarco de la pasarela en la margen derecha

La zona de desembarco de la pasarela se efectúa a la cota del vial próximo por lo que fue necesario crear una plataforma nivelada de acceso. Para ello se dispusieron varios niveles de muros de gaviones. De este modo se realiza la contención de estas tierras y se da continuidad estética al criterio seguido por el diseño de la estructura.

Desde esta plataforma, dotada de vegetación y suficiente mobiliario urbano, se accede con facilidad a la pasarela y se generan espacios como zonas de esparcimiento. Se adecuaron los caminos del entorno, así como la creación de alguno nuevo para mejorar la circulación de peatones.

En la nueva plataforma de desembarco se incorporaron elementos de mobiliario urbano y jardineras que dieran un aspecto homogéneo y más cuidado al conjunto

Adicionalmente, se elaboró un proyecto de iluminación de la zona urbanizada, así como la iluminación utilitaria y ornamental de la pasarela, que debía lograr adecuadas condiciones de iluminación vial, peatonal y artística tanto de la estructura como del entorno urbanístico, mejorando la visión nocturna de la zona e incrementando el tránsito peatonal y la seguridad.

La solución incluye, entre otros, iluminación inferior longitudinal en el arco y en la viga principal del tablero mediante luminarias tipo LED en tiras; iluminación localizada del tablero, mediante luminarias de tipo FOCO dispuestas en el arco; iluminación ornamental de la plataforma de circulación peatonal mediante luminarias tipo LED empotradas en el tablero; así como farolas en las nuevas plataformas de desembarco de la pasarela.



Figura 21. Iluminación de la pasarela

Agradecimientos

Al arquitecto Andrés Portocarrero por sus aportes en materia de urbanización.

Referencias

- [1] AASHTO. Standard Specifications for Highway Bridges (2014).
- [2] MANUAL DE DISEÑO DE PUENTES. Ministerio de Transportes y Comunicaciones. Dirección general de caminos y ferrocarriles. Dirección de normatividad vial (2016).
- [3] NORMA TÉCNICA DE EDIFICACIÓN E0.30. Diseño sísmoresistente. Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (Lima, abril 2003).

Ficha técnica de la estructura

Datos de la obra	
Ubicación	Lima, Perú
Año de Ejecución	2021
Propiedad	Municipalidad Metropolitana de Lima
Proyecto constructivo y dirección de obra	CESMA Ingenieros
Empresa constructora	CODURSA
Datos técnicos	
Longitud total	84 m
Flecha del arco	11.2 m
Ancho del tablero	Var. de 5 a 8 m
Canto del tablero	0.96 m
Espesor medio de hormigón en situ	0.14 m
Cuantía de acero estructural en tablero	302 kg/m ²
Cuantía de acero de armar en tablero	49 kg/m ²
Presupuesto de ejecución material	890.732 €