

Cimbras metálicas modulares autoportantes instaladas por voladizos sucesivos con atirantamiento provisional para la construcción de tres puentes arco de hormigón en Perú

Self-Supporting Steel Modular Forms erected in cantilever with auxiliary stays used in the construction of three Concrete Arch Bridges in Peru

Javier Muñoz-Rojas^a, Miguel Ángel Gil^b, Manuel Valero^c Pedram Manouchehri^d, Sergio de la Lastra^e, Donata Trost^f, Jorge Delgado^g, Alberto Pérez Monreal^h, Juan Manuel Juezⁱ, Jorge Toroj, Jorge Giganto^k, Jesús Pérez^l, Pablo Delgado^m

^{a, b, c} Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Carlos Fernández Casado, SL.

^d Ingeniero Civil. Carlos Fernández Casado, SL.

^f Ingeniero Civil. Carlos Fernández Casado, SL Sucursal Perú.

^{e, g, h} Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Carlos Fernández Casado SL Sucursal Perú

^{i, j, k, l, m} Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Hualca Ingenieros.

RESUMEN

La construcción de arcos de hormigón en Perú se ve condicionada por la orografía y el régimen pluvial irregular que desaconseja la utilización de apoyos provisionales. Se presenta la experiencia de CFC en tres obras con luces entre 75 y 150 metros donde la construcción de los arcos se ha resuelto con cimbras metálicas autoportantes modulares. Estas se instalan por voladizos sucesivos con tirantes provisionales, con suministro de los módulos por medio de blondines. Una vez terminado el hormigonado, el descimbrado del arco definitivo se realiza por apertura en clave mediante gateo. La cimbra se retira liberando la clave donde hay previstos uniones con agujeros rasgados.

ABSTRACT

Concrete arch construction in Peru is often constrained by the orography and climatic conditions, where intermediate temporary supports are discouraged. CFC has taken part in several of these projects with arch spans between 75 and 150 m. The arch is erected with the help of modular self-supporting forms installed in cantilever with auxiliary stays. After the arch concreting, poured in several stages, arch lifting is performed by via key jacking. The falsework is dismantled by releasing the long-slotted holes placed at the key element.

PALABRAS CLAVE:

Puente arco de hormigón, cimbra metálica autoportante, atirantamiento provisional, cimbra modular,

KEYWORDS:

Concrete arch bridge, self-supporting falsework, erection with auxiliary staying, modular formwork.

1. Introducción

CFC S.L. ha participado en la construcción de tres puentes arco en Perú cuyo denominador común era la necesidad de resolver la ejecución de arcos de hormigón en ubicaciones cuya orografía o fuerte régimen pluvial impedía implantar apoyos provisionales en el cauce para soportar la cimbra:

- Puente de Maranura. Luz 150 m.
- Puente de Chacanto. Luz 100 m.
- Puente de Tingo. Luz 75 m.

En todos ellos tras un proceso de comparación de diversas alternativas, se optó por realizar los arcos sobre cimbras autoportantes metálicas modulares diseñada por CFC instaladas con atirantamiento provisional metálica modular.

2 Planteamiento de la solución

La cimbra autoportante es un sistema que ha sido empleado frecuentemente en la construcción de arcos de hormigón en el siglo pasado,



Figura 1 Montaje de la cimbra autoportante para la construcción del arco de la Guaira. Caracas. Venezuela. E. Freyssinet 1962.

No obstante progresivamente fue desplazado por otros sistemas más eficientes o rápidos como la construcción por avance en voladizo o la rotación de semiarcos.



Figura 2. Construcción de arcos por voladizos sucesivos con atirantamiento provisional (puente de Alcántara CFC 2018) y por abatimiento (viaducto sobre el río Tera CFC 2014)

No obstante cuando estos nuevos sistemas no son viables (por falta de tradición o de medios, dificultades de suministros o de empresas especializadas, menores costes laborales...etc.) o sigue siendo una solución adecuada de relativa sencillez.



Figura 3. Cimbra autoportante para la construcción del puente "Belisario Domínguez". México [4]

En las obras de Perú se dieron estas circunstancias aunque los proyectos originales preveían una construcción por voladizos sucesivos (Chacanto) o por abatimiento (Maranura), el contratista estimó más conveniente o económico cambiarlo por cimbra autoportante.

Con objeto de que estas pudieran poder ser reutilizadas en varias obras el diseño desarrollado fue del tipo modular con elementos de ajuste para así poderlas acomodar a obras de distinta geometría.

Este fue el principio seguido en el diseño de las cimbras de Chacanto y Maranura, donde debido al tamaño de las obras se diseñó una sección en cajón rectangular que fue utilizada inicialmente para la construcción del primer puente y luego adaptada y ampliada con nuevos módulos para ejecutar el segundo.

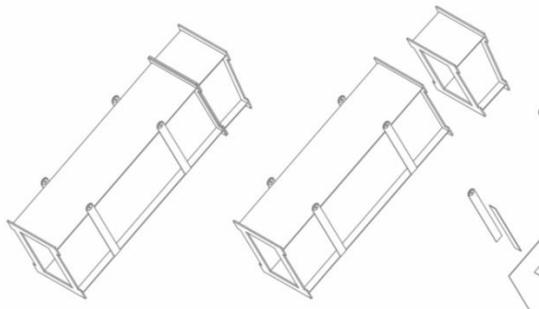


Figura 4. Módulo de 5 m + codo.

En el caso del puente de Tingo, su menor luz y el hecho de que en este caso el proyecto estuviera planteado con cuatro líneas de arcos permitió el empleo de soluciones más ligeras, en este caso realizadas con secciones abiertas en doble T.

En ambas lógicamente el trazado de la cimbra es poligonal según la dimensión de los distintos módulos, acomodando los giros necesarios entre ellos por medio de codos.

Otro aspecto fundamental que gobernó el diseño de la solución fue el conseguir una solución con un rápido montaje y manipulación. Para ello las uniones de los módulos son frontales, embridando los elementos con tornillos de alta resistencia.

Los módulos se montan por avance en voladizo sostenidos con un atirantamiento provisional desde torres colocadas sobre los arranques de los arcos.

3 Puente de Maranura

El puente de Maranura cruza el río Vilcanota en la provincia de la Convención. El arco inferior de hormigón, tiene una luz de 150 m y una flecha de 15 m, resultando en un arco tenso que

encaja muy bien en la escarpada orografía esculpida por el río.

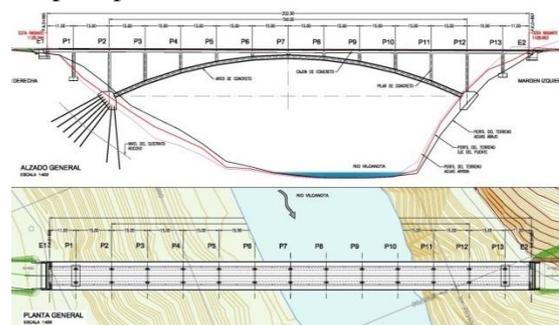


Figura 5. Alzado y planta del puente de Maranura.

El tablero se soporta sobre dos arcos paralelos con sección rectangular aligerada de canto constante. En los arranques la sección se maciza. El peso por metro lineal de cada arco varía pues entre 6250 en arranques y 4160 en el centro de vano. Los arcos tienen un trazado poligonal, con tramos rectos entre los arranques de los pilares donde se producen los quiebros, estando estos nudos circunscritos en la parábola de segundo grado que se genera entre ambos arranques y clave.

3.1 Descripción de la solución adoptada

El proceso constructivo inicial preveía la construcción de los semiarcos en vertical sobre sus arranques y su abatimiento posterior con la ayuda de tirantes auxiliares. La empresa constructora adjudicataria de las obras, TAPUSA, planteó el cambio de este sistema por el de construcción cimbrada sobre un arco autoportante. La solución fue aprobada por la administración peruana en tanto no implicaba ningún cambio sustancial en la configuración final de la obra. Dada la luz y lo rebajado de la solución, las solicitaciones en la cimbra arco autoportante son significativas. La longitud total a salvar entre sus arranques es de 143.68 m y la flecha en clave 16.06 m, resultando por tanto en una esbeltez de 1/8.9.

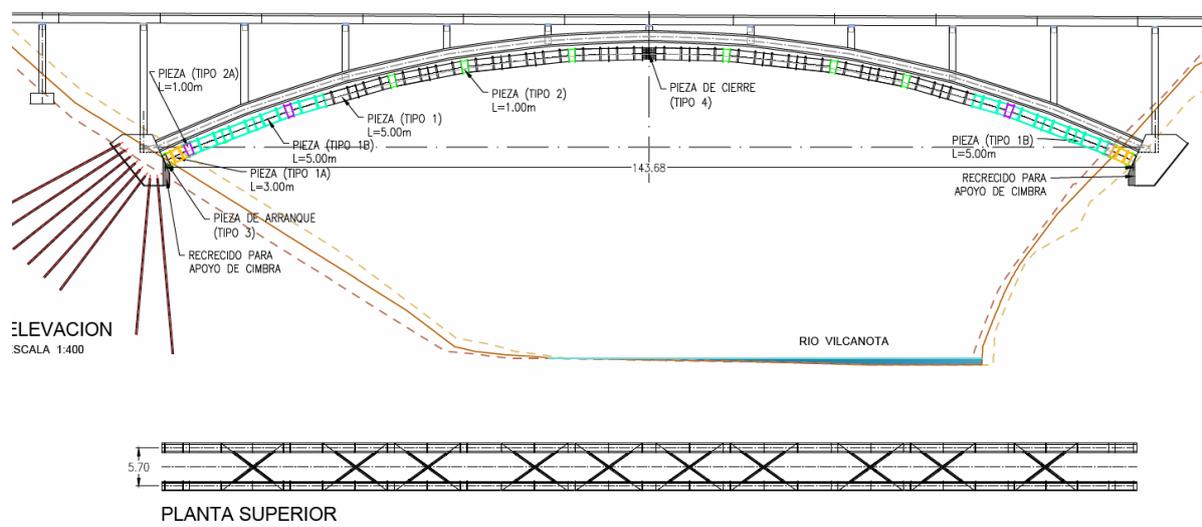


Figura 6. Alzado y planta de la cimbra

En estas condiciones la compresión máxima bajo el peso del hormigón del arco ascendía a unas 760 T. Otras acciones relevantes que condicionaron el diseño fueron el viento transversal así como la acción sísmica. En este caso hubo un requerimiento de la administración solicitando que el diseño se realizara asumiendo el sismo de proyecto ($T=100$ años, $a=0.40g$) algo inusual y muy penalizante para una fase de construcción. Se realizaron por tanto detallados cálculos dinámicos para comprobar la estabilidad y resistencia de la cimbra tanto bajo la carga del hormigón como descargada.

Igualmente se verificó analíticamente que la estructura no era susceptible a inestabilidades aeroelásticas, particularmente a la excitación por galope en la estela dada la configuración de doble línea de arcos que en alguna obra similar si había producido resonancias. La ausencia de vulnerabilidad frente a este fenómeno fue confirmado durante la construcción, en la que no se detectó ningún tipo de vibración relevante originada por el viento.

Todos estos condicionantes llevaron a plantear una sección cerrada rectangular de

canto 1.80 m y anchura 1.40 m colocado bajo cada una de las dos líneas de arcos paralelos que soportan el tablero. De esta manera están separados entre sí los 5.7 m, de entreje entre arcos los arcos de hormigón definitivos que se construyen sobre cada uno de ellos. El arriostramiento se realiza a nivel de fibra superior, con una disposición en cruz de San Andrés discontinua con perfiles en doble T de 24 cm de canto.

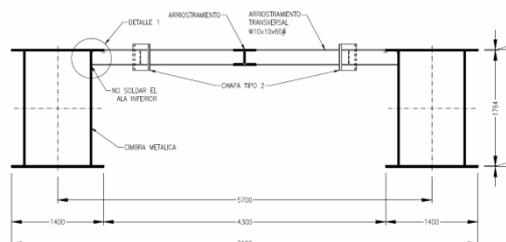


Figura 7. Sección transversal completa de la cimbra.

La modulación de la cimbra se realiza en tramos rectos de 5 metros y conseguir el necesario quiebro para configurar el trazado del arco por medio de otras piezas estándar, en este caso codos trapeciales de 0.95 m que permitieran un giro de 5 grados

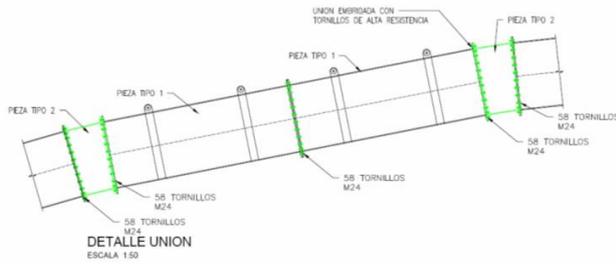


Figura 8. Alzado de modulación tipo

Estos codos resuelven el problema de adaptar una misma cimbra a dos arcos con diferente curvatura, como es el caso de Chacanto y Maranura. En el caso de Chacanto se intercala uno de estos elementos por cada módulo recto de 5 m. En Maranura, en cambio, se añade cada 2 ó 3 cajones.

Las uniones frontales entre elementos son enbridadas y realizadas con tornillos de alta resistencia. Los módulos se montan por avance en voladizo sostenidos con un atirantamiento provisional desde torres colocadas sobre los arranques de los arcos.

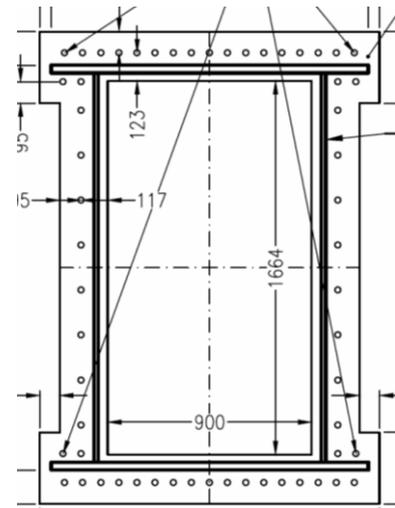
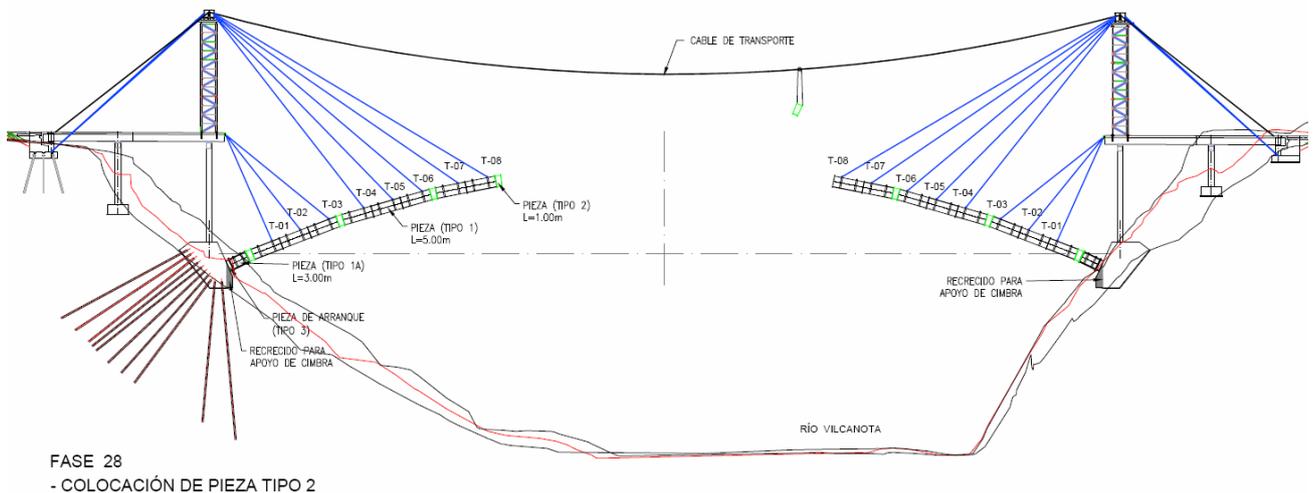


Figura 9. Unión enbridada tipo.

En el caso del puente que nos ocupa, la construcción empieza por los dos primeros vanos a cada lado del arco. Esto permite colocar sobre el tablero las torres provisionales necesarias para la construcción de la cimbra por voladizos y reducir la altura de estos elementos provisionales.

Un total de 12 pares de cables, tres de ellos anclados al tablero y el resto llevados a la torre, sirven de sistema de atirantamiento durante la construcción de la cimbra.



FASE 28
- COLOCACIÓN DE PIEZA TIPO 2

Figura 10. Proceso de construcción de la cimbra.

La retenida es llevada a los estribos a través de ventanas dejadas en el tablero. Los cables de transporte se anclan directamente a aquel, al coincidir su posición con las de las vigas longitudinales.



Figura 11. Cimbra en construcción.

Debido a estas acciones horizontales, no previstas en fase de servicio del puente, fue necesario diseñar elementos de bloqueo temporales que permitieran recoger estas cargas en las pilas y estribos.

El control geométrico de montaje incluyó un estudio detallado por fases, con correcciones por variaciones térmicas y de tensión en los tirantes. En caso de imperfecciones en los elementos (falta de planeidad, excesos de longitud, giros de las secciones), el ajuste se realiza mediante la utilización de calas intercaladas en las uniones entre los módulos.

Al cierre de la cimbra se procede a la retirada de los tirantes, quedando la cimbra autoportante a la espera del montaje de los encofrados y el hormigonado del arco definitivo.



Figura 12. Cimbra autoportante sobre cruce actual sobre el río.

Una vez construido el arco de hormigón y descimbrado por gateo en clave, la cimbra se cuelga de aquel y se procede al desmontaje liberando los tornillos situados en clave con agujeros rasgados preparados a tal fin.



Figura 13. Pieza de clave siendo preparada en obra antes de su colocación.



Figura 14. Arco en fase intermedia de hormigonado – enero de 2020.

3.2 Cálculo

Se realizaron modelos globales de la cimbra para permitir el cálculo del proceso, así como el dimensionamiento de acuerdo con las fases de hormigonado proporcionadas por el contratista. El modelo de cálculo global permite igualmente estimar la longitud de agujero rasgado necesaria para descargar la cimbra una vez terminado el arco de hormigón.

El cálculo se realiza en segundo orden debido a las fuertes compresiones a las que está sometida por su naturaleza de arco, especialmente rebajado en este caso.

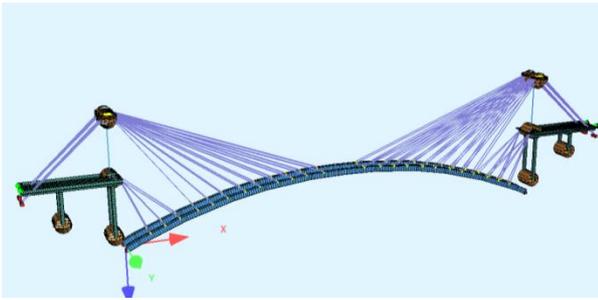


Figura 15. Modelo global de la cimbra de Maranura.

Se realizó también un estudio de la estabilidad global, así como frente a fallos locales de los módulos, introduciendo en los modelos ad hoc imperfecciones iniciales asociadas a los modos de pandeo locales para estudiar la abolladura de las secciones.

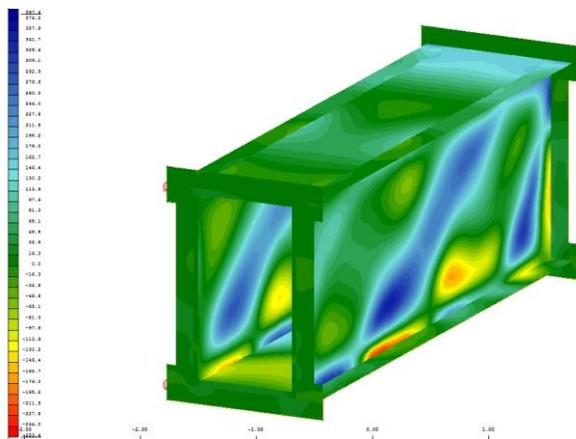


Figura 16. Tensiones principales asociadas a la combinación de máximo corte + axil e imperfección según primer modo de pandeo local.

Como se ha comentado en apartados previos, debido a los condicionantes sísmicos se ha verificado igualmente, aun tratándose de una estructura temporal, la capacidad frente al sismo. Igualmente, se ha comprobado la estabilidad de la cimbra ante fenómenos aeroelásticos.

3.3 Cuantías principales

El peso total de la estructura metálica es de 368.7 toneladas, lo que representa 2560 kg/m.

El peso del arco a soportar era de 4200 kg/m aproximadamente (cada rama), total 8400 kg/m

3.4 Ficha técnica

- Constructor TAPUSA. Javier Romero, Jorge Delgado, Alberto Pérez
- Proyecto puente Maranura y accesos CPS. Gonzalo, Jorge Toro.
- Diseño del puente CFC+HUALCA. Javier Muñoz-Rojas, Sara Fernández, Juan Manuel Juez
- Diseño de la cimbra CFC. Javier Muñoz-Rojas, Miguel Ángel Gil, Manuel Valero
- Fiscalización CFC Sucursal Perú. Donata Trost, Sergio de la Lastra
- Fabricante cimbra metálica: Técnicas metálicas.

4 Puente de Chacanto

El puente de Chacanto es un arco intermedio que cruza el río Marañón entre los departamentos de Cajamarca y Amazonas. Para la construcción de este arco se utilizaron los módulos que forman la parte central de la cimbra de Maranura, ya que la luz del arco de hormigón en este caso es de 100 m por 150 m de aquel. El autor del proyecto es del ingeniero Oscar Muroy.

La flecha del arco es de 20 m, quedando la relación flecha/luz en 1/5.

4.1 Descripción de la solución

Al tratarse de una estructura de menor luz y menos tendida que la de Maranura, los esfuerzos totales son sensiblemente menores que en el caso de aquella. Esta circunstancia se aprovechó para no compensar todo el peso de la cimbra durante el proceso de construcción por voladizos, permitiendo que fuera esta la que soportara parcialmente su peso por flexión. De esta manera se consiguió reducir la carga vertical transmitida a las torres, que en este caso y al no estar situadas sobre el tablero

necesitaban una altura mayor (30 m) y reducir asimismo la cuantía de tirantes.

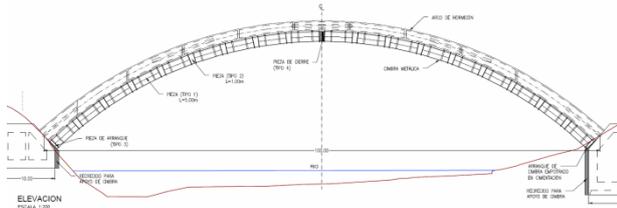


Figura 17. Alzado de la cimbra de Chacanto.

El proceso de construcción se realizó de manera análoga al de Maranura, llevando los tirantes de retenida a unos macizos de anclaje situados en la parte trasera de las torres.



Figura 18. Colocación de la pieza de clave.

Una vez concluido el hormigonado por fases se procedió al gateo de los arcos. Para ello se colocaron dos chapas de apoyo en clave del arco sobre las que gatear.



Figura 19. Dispositivo de gateo en clave del arco.

En ellas se dispusieron dos gatos hidráulicos por arco, para proporcionar un axil total de 180 T en cada rosca. Esta carga permitía la puesta en tensión del arco y el despegue de la cimbra. La apertura en clave fue de un total de 24 mm, siendo el desplazamiento vertical de 31.



Figura 20. Final de la maniobra. Observense las chapas adicionales dispuestas sobre los tetones de apoyo para proceder a la retirada de los gatos.

Una vez terminada esta maniobra se procede a retirar los encofrados, colgando después la cimbra del arco. Se hace perder a la cimbra la carga de peso propio gracias a la unión con agujeros rasgados en clave. Una vez colgados los módulos del arco de hormigón se van retirando uno a uno con ayuda del blondín de transporte.



Figura 21. Puente de Chacanto terminado.

4.2 Cuantías principales

El peso total de la estructura metálica (2 cimbras) es de 249.2 toneladas, lo que representa 2515 kg/m arco.

El peso del arco a soportar por cada cimbra era de 3960 kg/m (cada rama)

4.3 Ficha técnica

- Constructor TAPUSA. Javier Romero,
- Proyecto Ing. Oscar Muroy
- Asistencia técnica a TAPUSA. CFC Sucursal Perú-Hualca. Jorge Toro, Sergio de la Lastra, Jesús Pérez
- Diseño de la cimbra CFC. Javier Muñoz-Rojas, Miguel Ángel Gil, Manuel Valero
- Taller metálico: Cimprotec.

5. Puente Tingo

El puente Tingo, cuyo diseño fue realizado por la firma Ingeniería 63, cruza una garganta en la ruta entre Cajamarca y Magdalena. El proyecto original preveía un arco de 75 m de luz y una relación flecha de 15 m, resultando en un arco poco tendido. Esta característica, así como la existencia de 4 líneas de arcos, provocan que las cargas a resistir por la cimbra fueran más moderadas lo cual habilitó la posibilidad de utilizar secciones abiertas en doble T para configurar la cimbra.

La solución original planteaba la ejecución de un solo módulo de cimbra con dos arcos para ejecutar la mitad del puente y posteriormente reutilizarla, tras su desmontaje y nuevo montaje en la nueva posición, para realizar la segunda mitad del puente. Sin embargo, los condicionantes de tiempo del proyecto hicieron finalmente que se construyeran dos cimbras gemelas sobre las que se construyeron los 4 arcos simultáneamente.

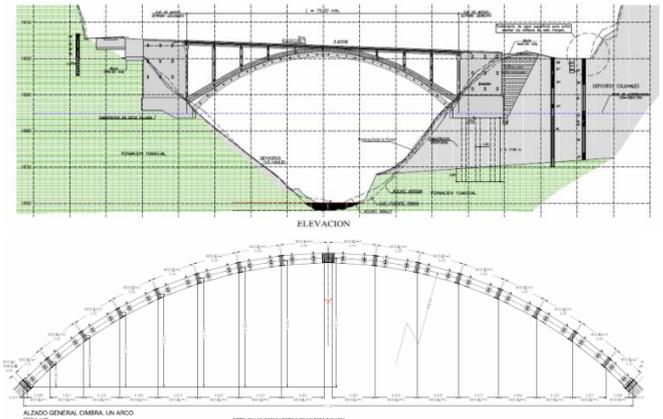


Figura 22. Alzado del puente Tingo (arriba) y alzado de la cimbra provisional (abajo).

5.1 Descripción de la solución

La cimbra está configurada por sendas vigas en doble T unidas transversalmente mediante vigas. El arriostramiento transversal se realiza mediante cables en X situados en la cara inferior del emparrillado, pretensados en fase de colocación para que actúen frente a las acciones transversales.

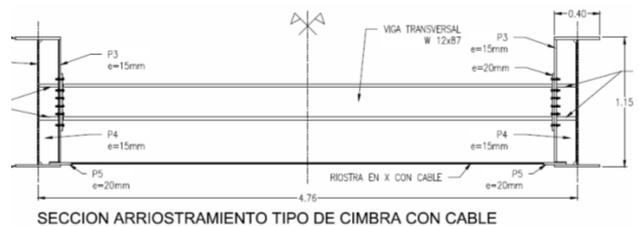


Figura 23. Sección transversal de la cimbra.



Figura 24. Cimbra de Tingo cerrada a la espera de la colocación de los encofrados.

La cimbra se modula en tramos de 5 metros unidos mediante cubrejuntas. Además de la holgura que permiten las uniones para el control geométrico, la flexibilidad de los

voladizos en doble T permite un sencillo control geométrico donde eventuales imperfecciones son corregidas mediante retesado de los tirantes.

5.2 Cálculo

Se realizó un modelo global de la cimbra de Tingo para el cálculo y definición del proceso de control geométrico. De igual forma se realizaron una serie de modelos locales para evaluar la estabilidad de los elementos más críticos, como la unión en clave, incluyendo el efecto de posibles imperfecciones de construcción de las chapas según los modos de pandeo locales.

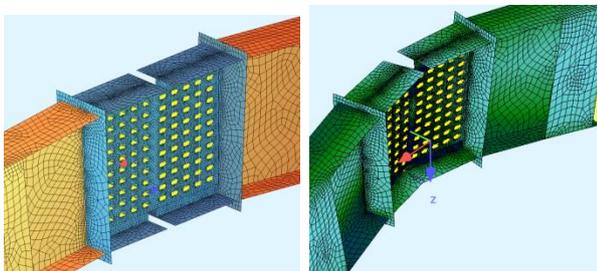


Figura 25. Modelo de elementos finitos de la clave con cubrejuntas y fallo por pandeo fuera del plano.

La construcción del puente continúa con el desmontaje de la cimbra, la ejecución de las pilas y finalmente el tablero.

5.3 Cuantías principales

El peso total de una cimbra es de 88.2 T, siendo el total finalmente ejecutado de 176.4 T

El peso del arco a soportar por cada cimbra era de 4200 kg/m

5.4 Ficha técnica

- Constructor: *Torres Cámara*.
- Proyecto puente: *Ingeniería 63*
- Asistencia técnica durante la construcción: *CFC Sucursal Perú-Hualca*. Jorge Toro, Pablo Pérez

- Diseño de la cimbra: *CFC*. Javier Muñoz-Rojas, Miguel Ángel Gil, Manuel Valero
- Fabricante cimbra metálica: *Técnicas Metálicas*.



Figura 26. Puente Tingo terminado.

Referencias

- [1] J. Muñoz Rojas et al., *Puente de Maranura sobre el río Vilcanota*, VIII Congreso ACHE Santander 2020.
- [2] Manterola J., Muñoz-Rojas J. et al. *Construcción de puentes arcos de grandes luces. Parte I. Construcción en voladizo con atirantamiento provisional*. 1ª Conferencia internacional de puentes. 2014. Santiago de Chile. Chile.
- [3] Manterola J., Muñoz-Rojas J. et al. *Construcción de puentes arcos de grandes luces. Parte II. Construcción por abatimiento de semiarcos*. 1ª Conferencia internacional de puentes. 2014. Santiago de Chile. Chile.
- [4] Secretaria de Comunicaciones *La construcción de puentes en México. XXI Construcción de arcos en concreto*. Pg 179-184.. Mexico D.F. 1985.