

Proyecto y construcción del puente de Maranura sobre el río Vilcanota en Perú

Design and Construction of the Maranura Bridge over the Vilcanota River in Peru

Javier Muñoz-Rojas ^a, Sara Fernández ^b, Manuel Valero ^c, Pedram Manouchehri ^d,
Miguel A. Ginés ^e, Juan Manuel Juez ^f, Jorge Toro ^g, Jorge Delgado ^h, Donata Trost ⁱ
Alberto Pérez ^j,

^{a, b, c, e} Ingeniero de Caminos Canales y Puertos. Carlos Fernández Casado S.L. Madrid

^d Ingeniero Civil. Carlos Fernández Casado S.L. Madrid

^{f, g} Ingeniero Caminos, Canales y Puertos. HUALCA

^{h, i} Ingeniero Caminos, Canales y Puertos. CFC Sucursal Perú

^j Ingeniera Civil. CFC Sucursal Perú

RESUMEN

El puente de Maranura sobre el río Vilcanota está localizado en la región de Cusco y ha sido promovido por el M^o de Transportes y Comunicaciones-PROVIAS. Se trata de un puente arco de tablero superior de hormigón armado, que tiene una longitud total de 202 m, una luz máxima de 150 m correspondientes al arco parabólico de 15 m de flecha (1/10L) que salva el cauce a una altura de unos 100 m., y una separación de 15m entre las pilas. El tablero de 11.70 m de anchura, también se resolvió con una solución ligera y sencilla de construir por medio de una sección transversal en “π” de hormigón armado.

ABSTRACT

The Maranura bridge over the Vilcanota river is located in the Cusco region and has been promoted by the Ministry of Transportation and Communications-PROVIAS. It is an arch bridge of reinforced concrete top deck, which has a total length of 202 m, a maximum span of 150 m corresponding to the parabolic arch of 15 m of rise (1 / 10L) that saves the channel at a height of about 100 m., and a distance of 15m between the piers. The 11.70 m wide deck was also solved with a light and simple solution to build by means of a cross section in “π” of reinforced concrete.

PALABRAS CLAVE: Arco inferior, arco hormigón, tablero hormigón armado, aislamiento, push-over

KEYWORDS: Arch with upper deck, concrete arch, reinforced concrete girder, isolation, push-over

1. Introducción

El nuevo puente forma parte del proyecto “ESTUDIO DEFINITIVO PARA LA CONSTRUCCION DEL PUENTE DE MARANURA Y SUS ACCESOS” del M° de Transportes y Comunicaciones- PROVIAS del Perú, que fue adjudicado al Consorcio Maranura, integrado por las firma española CPS Ingenieros y Geoconsult.

CFC y HUALCA Ingenieros, han llevado cabo el estudio de alternativas y el proyecto constructivo del puente objeto de dicho contrato, concluido en Marzo de 2015.

El puente forma parte de la carretera Cusco – Quillabamba, tramo: Alfamayo – Chaullay – Quillabamba, de gran importancia dentro del sistema de carreteras de la región debido a la intensidad de tráfico que recoge y por el carácter turístico de toda la zona del Valle Sagrado del Inca. El objetivo de la actuación era mejorar el cruce sobre el río Vilcanota, en la localidad de Maranura (Provincia de La Convención, Departamento de Cuzco) que debía realizarse por un puente tipo Bailey, emplazado en el fondo del valle al que la carretera desciende con un trazado muy forzado.

En la fase inicial del proyecto se compararon diversos emplazamientos así como distintas soluciones constructivas para la nueva obra. Finalmente se decidió que el trazado que arranca desde la carretera hacia Quillabamba y tras sucesivas curvas suaves salva el río Vilcanota con un puente de 202 m de longitud, entroncando al otra lado con la carretera existente a la salida de la población de Maranura.

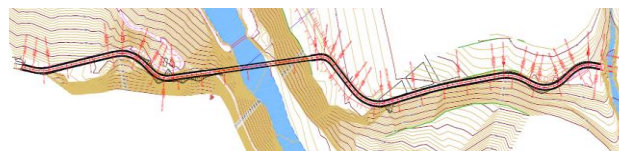


Figura 1 Trazado en planta

1.1 Planteamiento de la solución

Tras la comparación de diversas alternativas, la solución que se consideró más adecuada para resolver el cruce sobre el río fue la de un puente tipo arco de tablero superior. Éste se implanta de forma muy adecuada en laderas de fuerte pendiente como las de este cruce en tanto se apoya en ellas a media altura y transmite reacciones sensiblemente normales a las mismas.

La elección del tipo de material a emplear fue igualmente consecuencia de un estudio comparativo entre soluciones de hormigón y de acero/mixta. Se estableció finalmente que toda la obra se realizara en hormigón armado, decisión en la que tuvo un peso decisivo el interés de la Administración de minimizar los costes de mantenimiento de la obra a largo plazo.

En lo relativo a la solución constructiva del arco y tablero, el condicionante principal proviene de la dificultad de acceso de equipos y materiales a la obra en tanto se trata de un emplazamiento alejado de grandes centros urbanos. Por tanto se las soluciones que se estudiaron estaban basadas en secciones sencillas de construir y planteando vanos de dimensiones pequeñas para el empleo de soluciones en hormigón armado.

2. Descripción de la Obra

El encaje final ha aportado una longitud total de puente de 202 m, de los cuales 150 m corresponden al salto del arco sobre el cauce. Se distribuye en 14 vanos con luces 11.0+12x15.0+11.0. Los 10 vanos centrales se

apoyan sobre un arco parabólico de 150 m de luz y una flecha vertical en la clave de 15 m, encajando de una forma muy limpia y hermosa en la escarpada orografía del cruce. Los vanos extremos se apoyan sobre pilares cimentados directamente en la roca y en los estribos finales.

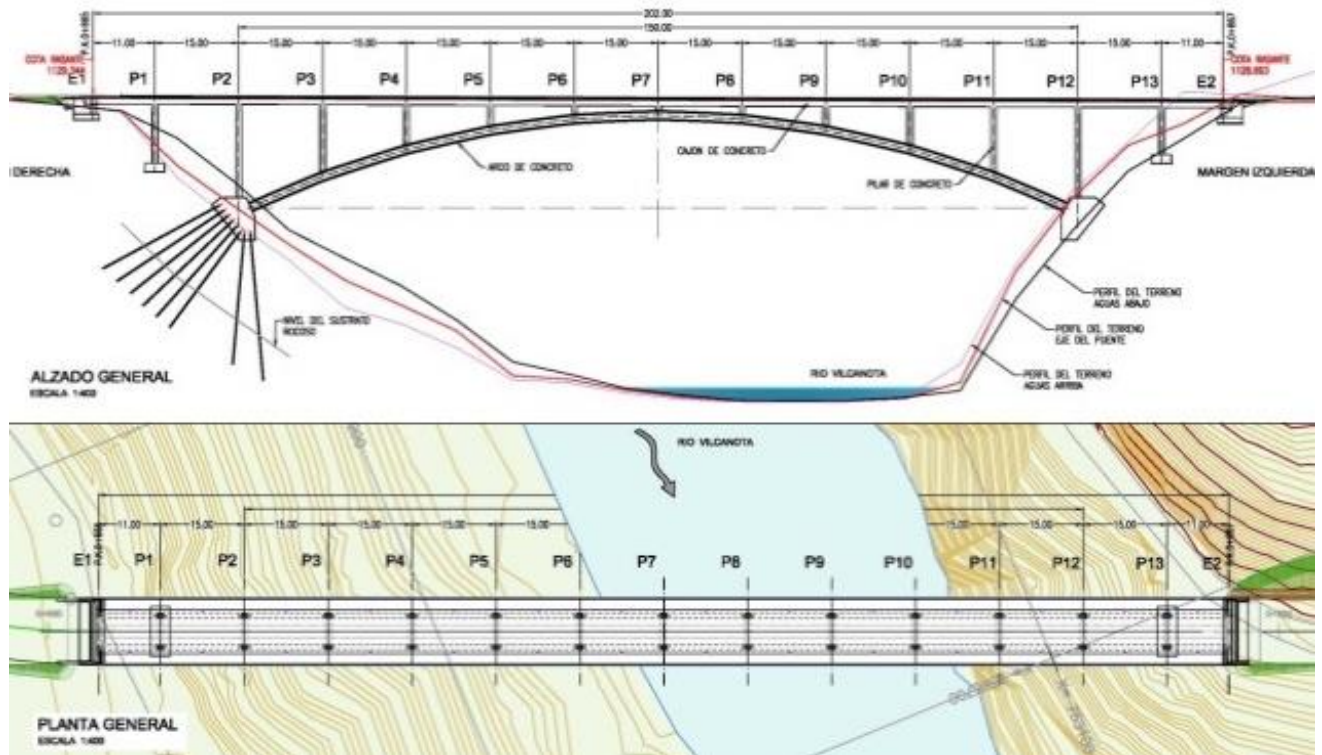


Figura 2 Alzado y Planta de la solución arco



Figura 3 Imagen virtual en vista frontal

La sección debe alojar dos carriles de tráfico de 3.30 m, arcenes de 0.65 m y veredas peatonales laterales de 1.90 m, lo que proporciona una anchura total de 11.70 m. Dicha sección se mantiene en los accesos previstos al puente.

La zona peatonal se protege lateralmente con barreras de protección metálicas ligeramente curvas que sirven a la vez de barandillas metálicas. Las zonas peatonales se separan de los carriles de tráfico por medio

de defensas rígidas de concreto tipo “New Jersey”.

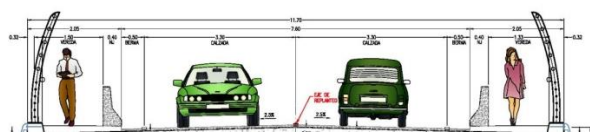


Figura 4 Sección tipo de la plataforma

El tablero se resuelve con un dintel continuo de estribo a estribo realizado con una sección transversal tipo “ π ” o “viga-placa” de concreto reforzado. Las dos vigas están separadas entre sí 5.70m, tienen sección trapecial con anchura inferior de 0.75 cm. Sobre ellas descansa la losa, que presenta pues vuelos laterales de 2.50 m, realizada con espesor variable en los vuelos laterales de 2.50 m y acartelada entre las vigas.

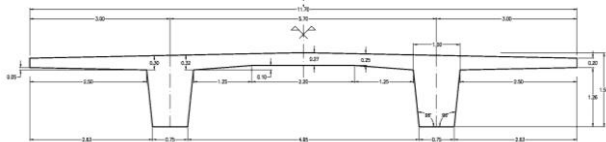


Figura 5 Sección tipo del tablero en “ π ”

Se trata de una sección muy sencilla de ejecutar que necesita sólo moldes exteriores fácilmente manipulables y reutilizables.

Las luces del tablero, de 15 m, se han establecido en estrecha relación con el tipo de sección seleccionado. Se evaluaron igualmente otras opciones con luces superiores, pero con el fin de que los esfuerzos en el dintel puedan ser resistidos sólo de forma pasiva con refuerzo sin necesidad de recurrir al pretensado, se optó por la configuración descrita con 15 m y tablero de concreto reforzado.



Figura 6 Imagen virtual desde el fondo del valle

De esta forma se consigue una solución muy económica en materiales y muy fácil de

construir al requerir medios auxiliares muy ligeros, uno de los objetivos buscados a la hora de plantear la solución. El resolver el cruce de 150 m de luz con un tablero con vanos de 15 m es sin duda una forma muy económica. El resultado formal es además muy correcto y limpio.

El tablero se apoya en pilares rectangulares colocados bajo las vigas por medio de apoyos de neopreno. Estos elementos sirven igualmente para configurar una vinculación tablero-infraestructura de cara a la acción sísmica dado que aunque la obra se encuentra en una zona interior del país donde la acción sísmica no es tan elevada como en zonas costeras, sigue presentando valores considerables (aceleración básica 0.32 g). La solución prevista para la configuración sísmica de esta obra es la de aislamiento por medio de apoyos de neopreno, que se disponen en todas las secciones de apoyo incluidos estribos. El aislamiento se produce tanto en sentido longitudinal como transversal proporcionando una notable reducción de las acciones tanto en los pilares como en el arco con respecto a la vinculación monolítica.

Transversalmente los pilares se arriostran en cabeza con un travesaño en el que se disponen elementos de bloqueo auxiliares para evitar el descabalgamiento de la estructura en el caso de que se produzca un evento sísmico superior al de diseño.

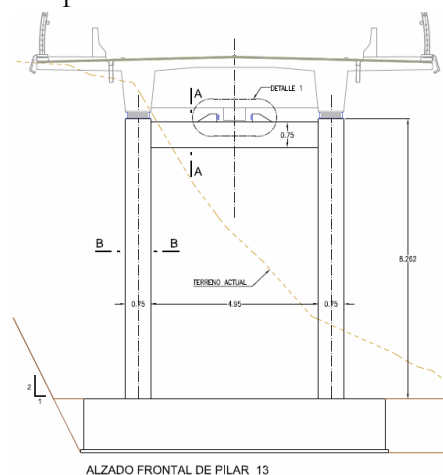


Figura 7 Alzado tipo de pila

Los pilares contiguos a los estribos se cimentan directamente en el terreno por medio de zapatas superficiales. El resto de pilares se empotra en el arco de 150 m que sirve para salvar el cruce sobre el río.

Los arcos siguen un trazado poligonal con tramos rectos entre los arranques de las pilas, en cuya sección se circunscribe a una parábola de segundo grado que pasa por arranques y por la clave. Como se ha referido el arco es doble, con sendos consta de doble línea. Se trata de un arco doble, de manera que se dispone un elemento en arco debajo de cada una de las vigas del tablero. La sección de cada uno de ellos es un cajón octogonal.

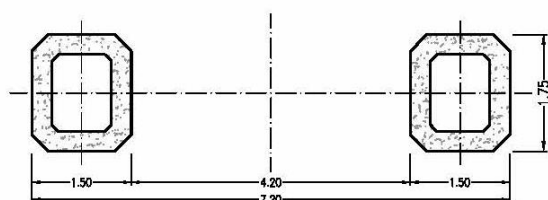


Figura 8 Sección arco concreto

Los dos arcos se arriostran transversalmente entre ellos cada 15 m en las secciones de apoyo de los pilares por medio de vigas rectangulares.

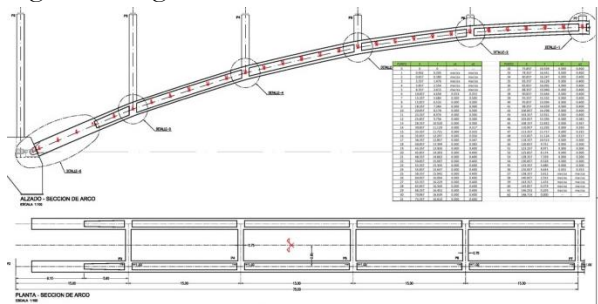


Figura 9 Alzado y planta de semiarco

Los estribos son obras normales de hormigón formados por muros de frente y de vuelta para retener las tierras de los accesos. Se emplean como elementos auxiliares para el anclaje de los tiros de los cables de retenida durante la maniobra de abatimiento, por lo cual se encuentran reforzados con diafragmas para referir los tiros de los cables a las cimentaciones, que a su vez se refuerzan con anclajes y micropilotes.

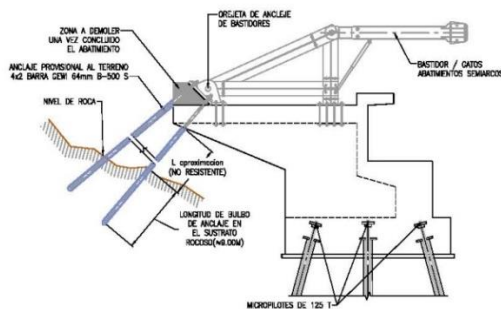


Figura 10 Estribo para abatimiento

3. Proceso de Construcción. Solución de proyecto

Como es bien sabido el problema de las soluciones arco de gran luz es su construcción. Existen diversas alternativas constructivas, desde las más convencionales por medio de cimbras auxiliares –ya sea apeada directamente en el terreno o sobre cimbra autoportante auxiliar- hasta las de tipo evolutivo utilizado en las obras más importantes –como los voladizos sucesivos con atirantamiento provisional o el abatimiento de semiarcos -.

Durante el proyecto se desarrolló el procedimiento que aparecía como más adecuado, el abatimiento de los semiarcos montados verticalmente y descendidos de forma controlada hasta su posición definitiva por medio de cables auxiliares.

Este sistema requiere pues construir previamente las dos mitades del arco sobre sus apoyos en vertical y llevarlos a su posición definitiva haciéndolos girar con respecto a sus arranques sobre rótulas provisionales de forma controlada por medio de cables auxiliares que les retienen.

Es un procedimiento que se adapta muy bien a orografías con quebradas abruptas, como la que tenemos, donde es difícil implantar en las laderas zonas de apoyos para pilares verticales pues implican enormes desmontes y además el efecto de la carga vertical en la ladera es un factor que normalmente vuelve más críticas las condiciones de estabilidad de las mismas.

Este procedimiento se ha empleado frecuentemente en los últimos años, en particular en España se ha empleado en viaductos del ffcc de alta velocidad para salvar las zonas más complejas del cruce.



Figura 2 Abatimientos de los puentes de Endarlatsa (2008) y del viaducto del TAV sobre el río Tera. (2013) Proyecto CFC

Igualmente es un procedimiento muy adecuado para orografías con quebradas abruptas donde es difícil implantar apoyos en las laderas. Por ello es un procedimiento con un alto potencial de aplicación en las condiciones orográficas del continente sudamericano, especialmente en la zona andina. Según nuestro conocimiento sería la primera vez que se aplicará en el continente pues la construcción de un proyecto anterior de CFC -el viaducto de la Cultura sobre el río Chili en Arequipa de 175 m de luz- está por el momento aplazada

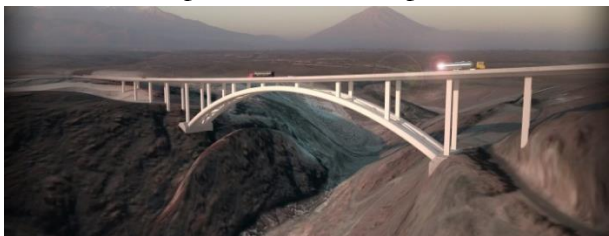


Figura 3 Viaducto de la Cultura. Arequipa. CFC 2013

Dado que los arcos son de hormigón, se ha considerado que la solución constructiva más sencilla para erigirlos es la fabricación in-

situ mediante encofrados trepante colados in situ en vertical por medio de bombeo o grúas. Los semiarcos se estabilizan sujetándolos contra el tablero de los primeros vanos, que se ancla a su vez en el estribo de forma provisional.

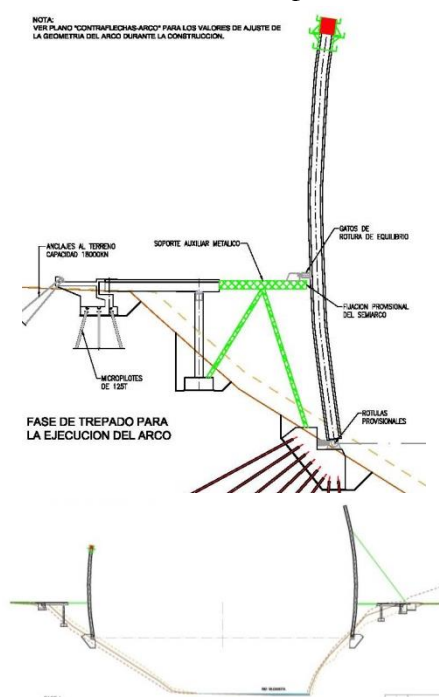


Figura 4 Posición inicial de abatimiento

Una vez concluidos, se instalarán los cables auxiliares que los retendrán durante la operación de descenso. Los medios auxiliares para llevar a cabo la operación (gatos de retenida, gatos de rotura de equilibrio, cables de atirantamiento, estructuras auxiliares....etc.) son equipos disponibles en el mercado peruano por medio de varias casas internacionales de heavy-lifting que operan en el país desde hace tiempo.

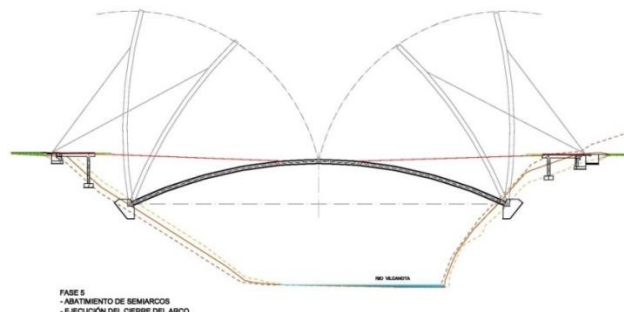


Figura 5 Abatimiento

La ejecución posterior del tablero se realiza vano sobre cimbra apoyada en el arco o con una sencilla autocimbras para apoyar el

encofrado. Los avances serán simétricos desde ambos arranques para evitar cargas asimétricas sobre el arco.

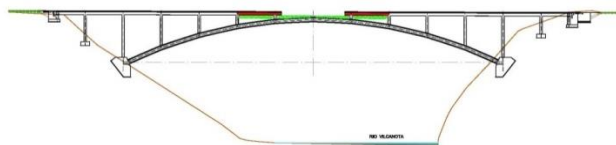


Figura 6 Ejecución del tablero

4. Proceso de Construcción. Solución alternativa de obra

Sin embargo, durante la construcción del puente surgió un nuevo condicionante: la constructora estaba haciendo otro puente arco en Perú, Chacanto, cuya construcción se realizaba mediante cimbra, de manera que se planteó la idea de aprovechar la cimbra del este arco para el nuestro de Maranura. El sistema se describe en detalle en [6]. Las luces del arco de Chacanto eran sólo 100m, así que había que adaptarlo ampliándolo hasta 150m.

La longitud total de la cimbra es de 143.68 m y un canto de 1.8 m., con una sección cerrada en cajón. La separación entre estos cajones es 5.70m que corresponde a la separación de los arcos, y están arriostrados en la parte superior

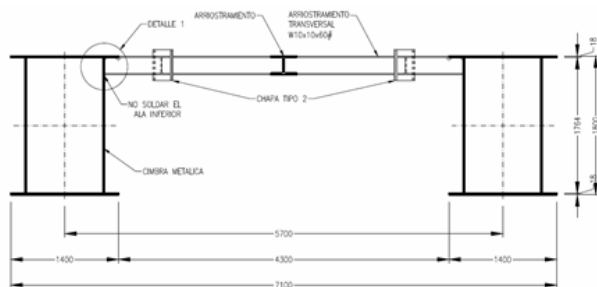


Figura 7 Sección de la cimbra

La cimbra se construye por avance en voladizo con atirantamiento. 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.

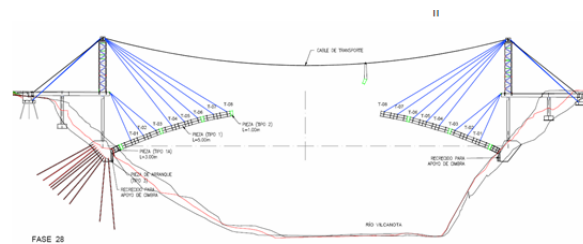


Figura 8 Montaje de la cimbra por voladizos

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



Figura 9. Arco en fase intermedia de hormigonado

5. Dimensionamiento de la Obra

La normativa de referencia ha sido la norma ASSHTO LRFD Edición 2010.

Desde el punto de vista resistente el tablero se trata de una obra convencional, de hormigón armado continuo de estribo a estribo.

El arco de ha definido un proceso iterativo a partir de una directriz de partida con una parábola de 2º grado hasta llegar al antifunicular de las cargas permanentes para minimizar las flexiones en esta situación.

Como es sabido el diseño de los arcos en sentido longitudinal está condicionado por las flexiones de provocadas por la acción asimétrica y eventualmente en zonas sísmica por el sismo longitudinal y vertical. El dimensionamiento en sentido transversal a su vez suele estar gobernando por el viento y en zonas sísmicas por el sismo transversal.

En el arco de Maranura está última situación fue la más condicionante para definir espesores y armadura de las secciones críticas - como los arranques que fueron macizados en

una cierta distancia-. Los esfuerzos de dimensionamiento se obtuvieron de un modelo espacial que reproducía todos los elementos estructurales, incluyendo la interacción suelo-estructura por medio de muelles. Se emplearon elementos lineales en arco, pilares y nervio longitudinal del tablero. La losa superior fue reproducida por un elemento lámina.



Figura 10 Vista general del modelo de cálculo

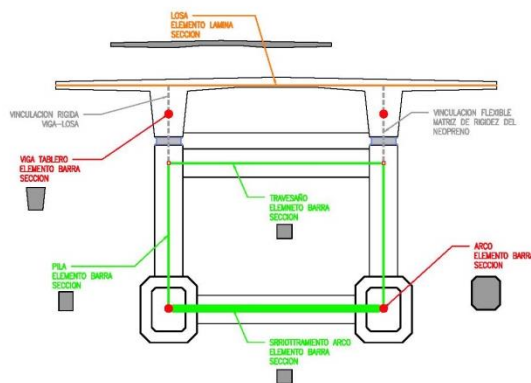


Figura 20 Representación esquemática de la modelización

Además de las comprobaciones seccionales habituales a partir de los esfuerzos máximos se llevó a cabo la comprobación de la capacidad última por medio de un análisis push-over (que englobaba entonces las comprobaciones de inestabilidad ante efectos de 2º orden).

En este sentido se realizaron dos comprobaciones:

- Un análisis del arco bajo cargas de servicio (tráfico, viento, peso propio etc.) asumiendo también una imperfección inicial homotética a los modos de pandeo laterales y verticales crítico. Por medio de un análisis incremental se lleva a rotura con un cálculo que incluye la no linealidad geométrica y la no linealidad de los materiales a través de sus curvas constitutivas.

- Un análisis no lineal pushover sísmico, que evalúa la capacidad del puente bajo demanda sísmica. Se trata de un complemento al análisis modal clásico ya que tiene en cuenta las no linealidades asociadas a los materiales y a la aparición de plastificaciones.

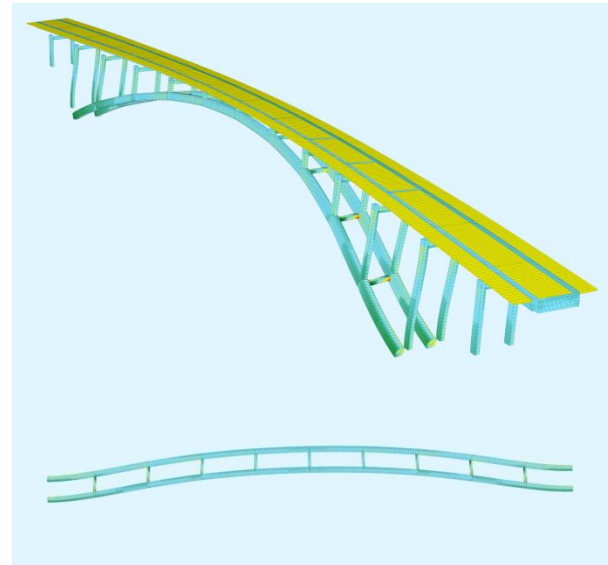


Figura 11 Deformación de la estructura en la comprobación push-over frente al sismo transversal

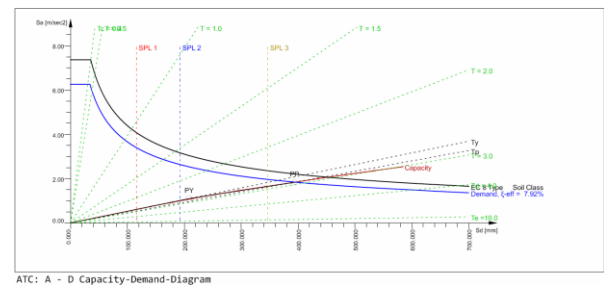


Figura 12: Curvas de equilibrio en el análisis push-over según el procedimiento ATC-40

El apoyo del arco en el terreno se realiza de forma directa en la margen derecha donde la roca aflora superficialmente. En la otra margen sin embargo las capas superficiales son rellenos poco competentes y por ello la transmisión de reacciones a la roca subyacente se realiza por medio de micropilotes metálicos de 125 t de capacidad.



Figura 13 Imagen virtual del puente acabado

6. Cuantías

Hormigón tablero	1158m ³	0.51m ³ /m ²
Acero tablero	424777kg	188kg/m ²
Hormigón arco	573m ³	0.34m ³ /m ²
Acero arco	199123kg	348kg/m ³

7. Ficha técnica

- Propiedad:
Provias Nacional. M° de Transportes y Comunicaciones del Gobierno del Perú.
Alejandro Sánchez.
- 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 construcción. *CFC Sucursal Perú*: Donata Trost, Sergio de la Lastra

Referencias

- [1] 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.
- [2] Manterola J., Muñoz-Rojas J. et al. *Construcción de puentes arcos de grandes luces. Parte II. Abatimiento de semiarcos*. 1ª Conferencia internacional de puentes. 2014. Santiago de Chile. Chile.
- [3] Manterola J., Muñoz-Rojas J., Fernández S, Martínez A. *Viaducto sobre el río Tera en la LAV Madrid-Galicia*. V Congreso de ACHE de Puentes y Estructuras. Madrid 2014.
- [4] Manterola J., Muñoz-Rojas J., Fernández S. Martínez A *Viaduct over the River Tera on the HSR Madrid-Galicia*. 37 Congreso IABSE. Madrid. 2014.
- [5] Manterola J., Muñoz-Rojas J *Nuevo Puente sobre el río Bidasoa en Endarlatsa*. IV Congreso de ACHE de Puentes y Estructuras. Valencia. 2008.
- [6] Muñoz-Rojas J, Gil MA, Valero M. et al *Construcción en Perú de tres puentes arco de hormigón sobre cimbras metálicas autoportantes modulares instaladas por voladizos sucesivos con atirantamiento provisional*. VIII Congreso de ACHE de Puentes y Estructuras. Santander. 2020.