# Procedimiento de refuerzo de puentes tradicionales chilenos: socavación y sismo

Chilean traditional strengthening bridge: scour and seismic

Marcelo Márquez Matías Valenzuela Pablo Milla Pablo Vidal

# Resumen

En el presente documento se investigarán las principales técnicas de reparación y refuerzo aplicadas en el puente Camarones, ubicado en el sector de Cuya, XV región de Chile, como solución a patologías del tipo sismo-socavación, ocasionadas por una crecida extraordinaria del río Camarones, registrada a principios del siglo XXI, y el terremoto ocurrido en 2014 en el norte del país. Adicionalmente, se presentará el análisis del estado del puente, post ocurrencia de ambos eventos extraordinarios. Además, resulta esencial generalizar el método constructivo de las técnicas aplicadas, utilizando como referencia los trabajos de rehabilitación empleados en el puente San Luis, ubicado en la localidad de Chimbarongo, VI región de Chile, afectado por las mismas patologías detectadas en el puente Camarones.

# **Abstract**

This paper presents the main pathologies and techniques related on the repair and strengthening method applied to the Camarones Bridge, located in Cuya, XV Region of Chile. The bridge has an earthquake-scouring conditions, caused by an extraordinary flood of the Camarones river, registered at the beginning of the 21st century, and the earthquake occurred in 2014 in the north of the country. Finally, the paper presents a general overview of the chilean analysis and strengthening method on bridge considering earthquake and scour hazards, using as reference the rehabilitation works on the San Luis Bridge, located in Chimbarongo town, VI region of Chile, affected by the same pathologies detected in the Camarones bridge.

Palavras clave: Rehabilitación / Puente / Patología / Socavación / Sismo

Keywords:

Strengthening / Bridge / Pathology / Scouring / Earthquake

# Marcelo Márquez

Máster

Dirección de Vialidad del Ministerio de Obras Públicas y Pontificia Universidad Católica de Chile Santiago, Chile marcelo.marquez@mop.gov.cl

#### Matías Valenzuela

Doctor Pontificia Universidad Católica de Valparaíso Valparaíso, Chile matias.valenzuela@pucv.cl

#### Pablo Milla

Ingeniero Civil Universidad de Santiago de Chile Santiago, Chile pablo.milla@usach.cl

#### Pablo Vidal

Ingeniero Civil Universidad de Santiago de Chile Santiago, Chile vidaltapia.pablo@gmail.com

#### Aviso legal

As opiniões manifestadas na Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas são da exclusiva responsabilidade dos seus autores.

# Legal notice

The views expressed in the Portuguese Journal of Structural Engineering are the sole responsibility of the authors.

MÁRQUEZ, M. [et al.] – Procedimiento de refuerzo de puentes tradicionales chilenos: socavación y sismo. **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas**. Ed. LNEC. Série III. n.º 4. ISSN 2183-8488. (julho 2017) 91-104.

#### 1 Introducción

El diseño chileno de puentes tradicionales se basa en la mayoría de los casos en una superestructura de vigas y losa colaborante y una infraestructura compuesta de estribos y cepas fundadas en forma directa o sobre pilotes. Las condiciones sísmicas del país y de socavación en ríos chilenos han obligado a que el diseño y construcción de los puentes contemple medidas resistentes para la acción conjunta de estos fenómenos y a que algunos de los puentes existentes deban ser reforzados para evitar colapsos producto de los mismos fenómenos.

El Manual de Carreteras de la Dirección de Vialidad del Ministerio de Obras Públicas, el cual es el documento de referencia para el diseño, construcción y Mantenimiento de Puentes en Chile, hace referencia en el Volumen N° 3 "Instrucciones y Criterios de Diseño" al fenómeno de la socavación, como estimarlo y como considerarlo al momento de diseñar un Puente. Además en este documento se define el Peligro de Socavación Sísmica (PSS) donde se establece un criterio con el que es posible determinar la profundidad de socavación a considerar en el diseño de la estructura. En la actualidad, este documento señala distintos métodos para calcular la socavación máxima en pilas de puentes y define el PSS con el cual se obtiene que porcentaje de la máxima profundidad de socavación calculada debe ser considerado para el diseño sísmico de la estructura. El PPS considera una profundidad de socavación de diseño la cual viene dada en función de la socavación máxima total para un periodo de retorno de 25 años y de la socavación máxima total para el periodo de diseño. Las socavaciones máximas totales pueden ser calculadas a través de distintos métodos, considerando distintas geometrías, tipos de suelos, granulometrías, entre otros, por lo que en ese aspecto el Manual de Carreteras es un documento aplicable a distintos casos, considerando variaciones en cada una de las variables que definen la socavación. Por otra parte, una vez obtenida la socavación de diseño el Manual de Carreteras indica que método de análisis sísmico utilizar en función de la geometría del puente en estudio, ocupando principalmente el Método del Coeficiente Sísmico, el Método del Coeficiente Sísmico Modificado por la Respuesta Estructural y el Método Modal Espectral. Para puentes considerados como estructuras críticas, se considera el Método Modal Espectral con Estudio de Riesgo Sísmico y el Método de Análisis Lineal o No Lineal en el Tiempo.

Un ejemplo de estas amenazas a puentes tradicionales ocurrió durante el mes de febrero de 2001, en la cual se produjo una concentración de precipitaciones en las regiones del Norte Grande del país, que afectan en mayor medida a las cuencas de la actual Región de Arica y Parinacota, entre las que se encuentra la Cuenca de Camarones (Figura 1).

La cuenca del río Camarones comprende una superficie de 4760 [km²] y una extensión de 135 [km], donde el río Camarones nace de la confluencia de los ríos Ajatama y Caritaya. A partir de este punto se desarrolla su curso en dirección suroeste, hasta desembocar en el mar (OCRAP, 2012).

Según la DGA, se alcanzaron valores extraordinarios en los caudales de los ríos que se encuentran en esta zona, producto de las precipitaciones anteriormente mencionadas, sobrepasando en algunos sectores el cauce de crecidas normales.

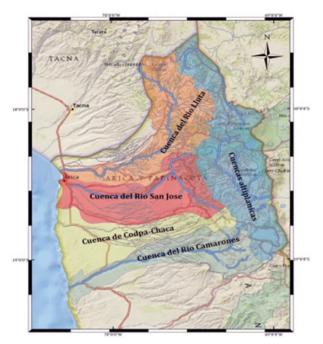


Figura 1 Cuencas de la Región de Arica y Parinacota (OCRAP, 2012)

En años posteriores, específicamente el 1 de abril de 2014, ocurrió un sismo de magnitud Mw=8,2 que afectó la zona norte del país. Su epicentro fue 89 [km] al suroeste de la localidad de Cuya y su profundidad hipocentral de 38,9 [km] (Figura 2). (CSN, 2014).

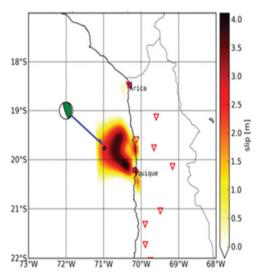


Figura 2 Epicentro sismo del 1 de abril de 2014 (CSN, 2014)

Estas amenazas son normales dentro del territorio chileno, destacándose durante el año 2015 los casos de terremotos, aludes, crecidas extraordinarias de caudales, entre otros (Galilea, 2016), para lo cual se ha comenzado con el desarrollo de métodos de gestión de desastres y desarrollo técnico de puentes (Valenzuela & Valenzuela, 2016).

En este contexto, se ha desarrollado un estudio sobre las técnicas de rehabilitación implementadas para solucionar patologías del tipo sismo-socavación, de tal manera que permita entregar los procedimientos generales de refuerzo efectuados en puentes tradicionales chilenos, como práctica habitual. Para ello se analizan los casos de estudios del Puente Camarones (ubicado en la zona norte de Chile) y San Luis (ubicado en la zona central del país), identificando tanto las patologías que afectaban a las estructuras como las técnicas de reparación y refuerzo implementadas. Se presentan refuerzos de estructuras debido a la vulnerabilidad asociada a ambas amenazas y con el objeto de mejorar su capacidad a partir de las nuevas recomendaciones que entrega el Manual de Carreteras en cuanto a capacidad estructural de los elementos y a la profundidad de socavación.

# 2 Casos de estudio

Se presentan los casos de estudio de los Puentes Camarones y San Luis para la identificación de los métodos de reparación y refuerzo frente a eventos de socavación y sismo.

#### 2.1 Puente Camarones

El puente Camarones fue construido durante los años 60 y se encuentra ubicado en el sector de Cuya, en el kilómetro 1969 de la actual ruta 5 norte, provincia de Arica, en la XV Región de Arica y Parinacota, Chile.

El puente original, construido durante los años 60 (Figura 3), cuanta con 8 tramos de 31 [m] cada uno, los que en su totalidad conforman una longitud de 248 [m]. Su ancho total es de 9,8 [m] y está constituido por 2 pasillos de 0,90 [m], sumado a una calzada de 8 [m].



Figura 3 Vista general del puente Camarones

La superestructura está compuesta por 4 vigas metálicas de sección IN 1400 x 350 [mm] por tramo, las cuales se apoyan en placas de neopreno de 400 x 400 x 40 [mm]. En cepas y estribos las vigas se encuentran arriostradas por travesaños de hormigón armado, mientras que a lo largo de sus tramos los arriostramientos se materializan por perfiles rectangulares metálicos. Cabe mencionar

que los travesaños se encuentran unidos a los estribos, a través de barras de anclaje sísmico. Además, el puente cuenta con un tablero de hormigón armado cuya losa es de hormigón armado de 20 [cm] de espesor con pasillos a ambos lados, barandas metálicas livianas y barbacanas de 4".

La infraestructura está compuesta por:

- 2 estribos con elevaciones constituidas por un muro lleno con alas, ambos de hormigón armado, con fundación directa.
- 7 cepas con elevaciones constituidas por muro lleno de 6 [m] de altura, fundadas directamente.

# 2.1.1 Daños por socavación

Posterior a la crecida del río Camarones en febrero de 2001, la principal patología detectada es la socavación en las fundaciones de las cepas del puente, aproximadamente del orden de 2,3 [m]. Debido a esto, se han generado asentamientos e inclinación de las cepas (Figura 4), ocasionando descensos y desalineamientos del tablero del puente (Figura 5).



Figura 4 Socavación, asentamiento e inclinación



Figura 5 Descenso y desalineamiento del puente

I. Consideraciones para la reparación Los trabajos realizados para la reparación del puente son:

a) Reparación de la carpeta asfáltica

- b) Reposición de juntas de dilatación
- c) Limpieza y pintura de vigas metálicas existentes
- d) Reparación, limpieza y pintura de barandas existentes

II. Proyecto de refuerzo

El proyecto de refuerzo del puente considera el cambio en la tipología de las 7 cepas del puente, utilizando un sistema de fundaciones del tipo profundas, con el objeto de mantener en servicio la estructura. El proyecto del año 2001 considera una altura de socavación máxima de 3,64 m, una carga de diseño de camión AASHTO HS 20-44 más el 20% y se encuentra ubicado en la Zona Sísmica 3.

El proyecto de refuerzo consiste en el reemplazo de cada una de las cepas existentes por un sistema estructurado en base a 2 filas de 2 columnas tubulares hincadas, cada una de un diámetro de 1 [m] y un largo estimado de 23,4 [m], cuyos ejes se encuentran equidistantes del eje de la cepa existente con una separación de 2,5 [m]. Este sistema, en su extremo superior, considera una mesa de apoyo constituida por 2 vigas principales y 2 secundarias, las cuales tienen una longitud total de 8 [m] y 4,3 [m] respectivamente, ambas son del tipo cajón de 700 x 700 [mm]. Además, se proyecta el reemplazo del sistema de apoyo por placas de neopreno de 500 x 350 x 36 [mm] y el refuerzo de las vigas de la superestructura.

Para materializar el reemplazo de cada una de las cepas, se realizaron en primera instancia 4 perforaciones circulares sobre el tablero en la posición definitiva de las columnas (Figura 6), seguido de la hinca de estas últimas, utilizando una grúa desde la cual se suspende el martinete (Figura 7).

Posteriormente, las vigas de la superestructura fueron levantadas utilizando gatas hidráulicas apoyadas en las cepas existentes (Figura 8), para así continuar con el posicionamiento de las placas de neopreno, en conjunto con las vigas principales tipo cajón que conforman la mesa de apoyo (Figura 9).

Luego, se procede con las labores de refuerzo de las vigas de la superestructura, para esto se instalan atiesadores de carga y se refuerzan los atiesadores de rigidez que se encuentran ubicados sobre el apoyo de las vigas (Figura 10). Además, se instalan arriostramientos metálicos en la misma zona, junto con topes sujeciones metálicas (Figura 11).

Una vez terminado el refuerzo de vigas, las cepas nuevas se encuentran en condiciones de soportar la superestructura, por lo que se procede con la demolición de las cepas existentes (Figura 12). En paralelo a esto, se inician las faenas de mantenimiento del puente, que constan de la limpieza y aplicación de pintura en las vigas (Figura 13).

Al ser demolida la cepa existente, ya se cuenta con el espacio necesario para posicionar las vigas secundarias tipo cajón (Figura 14) y así dar fin a la construcción del nuevo sistema de cepas con fundaciones profundas.

Por último, se repararon las secciones del tablero que fueron afectadas por los trabajos de refuerzo, para lo cual se dispone el moldaje y enfierradura para las losas, seguido del hormigonado y posterior colocación de una carpeta asfáltica (Figuras 15, 16 y 17). En paralelo a esto, se termina de demoler las fundaciones directas de las cepas existentes.



Figura 6 Perforaciones en tablero



Figura 8 Levantamiento de la superestructura



Figura 10 Refuerzo de atiesadores de rigidez



Figura 7 Hinca de pilotes metálicos



Figura 9 Posicionamiento de vigas principales

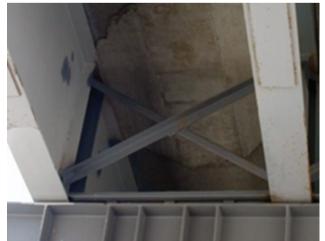


Figura 11 Instalación de arriostramientos metálicos



Figura 12 Demolición de cepas existentes



Figura 14 Posicionamiento de vigas secundarias



Figura 16 Hormigonado de losa perforada



Figura 13 Limpieza y pintura de vigas



Figura 15 Moldaje y enfierradura de losa perforada



Figura 17 Capa asfáltica de losa perforada

# 2.1.2 Daños por terremoto

Según la inspección realizada post terremoto de abril de 2014, la principal patología detectada como consecuencia del evento sísmico corresponde a un problema de desplazamiento lateral de la superestructura. Producto de esto, elementos como vigas, placas de apoyo, topes sísmicos y elementos de sujeción resultaron con daños que requieren de trabajos de reparación (MOP, 2014).

La inspección mencionada se realiza a los dos días de ocurrido el evento sísmico, con la finalidad de implementar un proyecto de rehabilitación, que recupere las condiciones de servicio y seguridad para los usuarios en el menor tiempo posible. A continuación se detalla el estado del puente post terremoto.

#### a) Desplazamiento de tablero

El puente presenta desplazamientos laterales de mediana consideración, de acuerdo a lo siguiente:

- Entre los tramos 1 y 2 se aprecia un desplazamiento lateral de 10 [cm] a 15 [cm], específicamente sobre la cepa 1 (Figuras 18 y 19).
- Entre los tramos 3, 4, 5, 6, 7 y 8 el desplazamiento lateral es prácticamente imperceptible, siendo del orden de 1 [cm] aproximadamente.

# b) Desplazamiento longitudinal (Figura 20)

En general no se aprecian desplazamientos importantes en el sentido longitudinal. No existen barras o topes sísmicos que restrinjan el desplazamiento longitudinal sobre las cepas.

#### c) Placas de apoyo

Se aprecia el desplazamiento de las vigas sobre las placas de apoyo del orden de los 2 [cm] a 7 [cm]. Por su parte, el tramo 1 sobre el estribo sur en la entrada del puente, presenta un desplazamiento del orden de 1 [cm] (Figura 21).

Además, se aprecian fragmentos de hormigón depositados entre la



Figura 18 y Figura 19 Desplazamiento lateral entre tramo 1 y 2

viga y la placa de apoyo, los cuales no permiten que la viga se apoye de forma correcta en la placa de apoyo (Figura 22). Por último, se aprecia que las placas de apoyo se dañaron por efectos del sismo.

#### d) Sujeciones en las cepas

El desplazamiento sobre la cepa 1 generó que las sujeciones se doblaran en sentido vertical y lateral (Figura 23).

Además, se aprecia que algunas sujeciones fallaron al corte al recibir el golpe de la viga con la platabanda inferior de ésta (Figura 24).

# e) Barras de anclaje

Se aprecia que las barras de anclaje en los estribos presentan inclinación debido al desplazamiento lateral del tablero, esta inclinación es del orden de 1 [cm] a 3 [cm] con respecto al plano vertical (Figura 25).

#### f) Vigas

En las cepas, las vigas presentan impactos debido a los golpes con las sujeciones, ocasionados por los movimientos transversales y verticales. Además, se aprecia una sección de viga en voladizo, aproximadamente de 2,3 [m], ya que en el año 2001 se realiza un refuerzo del puente, a través del cambio de tipología de la cepa (Figura 26).

# g) Topes laterales en estribos

En los estribos se aprecian topes laterales solo en un lado del conjunto de vigas (Figura 27).

# h) Juntas de dilatación

Las juntas de dilatación se encontraban en proceso de conservación, debido a lo anterior no es posible precisar algún tipo de deterioro producto del sismo. Sin embargo, debido al cambio de tipología de las cepas, existe una sección de las vigas en voladizo, provocando que la junta deba ser capaz de soportar movimientos verticales, laterales y longitudinales (Figura 28).





Figura 20 Desplazamientos longitudinales del tablero



Figura 21 Desplazamiento vigas



Figura 22 Fragmentos de hormigón entre vigas



Figura 23 Sujeciones deformadas



Figura 24 Corte de sujeciones



Figura 25 Inclinación de las barras de anclaje de estribos



Figura 26 Desgaste de las vigas metálicas



Figura 28 Junta de dilatación en etapa de conservación

El principal problema que presenta la estructura es el desplazamiento lateral del tablero, esto se debe principalmente a la inexistencia de barras de anclaje en las cepas y a la poca rigidez que aportan las sujeciones, que no fueron capaces de resistir los movimientos verticales y transversales. El desplazamiento longitudinal, aunque es mínimo, se debe a la no existencia de barras de anclaje en las cepas del puente. Cabe mencionar que fue durante la reparación del año 2001, cuando se cambia la tipología de las cepas, donde también se eliminan las barras de anclaje.

Por otra parte, el cambio de tipología en las cepas generó una consideración adicional, ya que una sección de la viga queda en voladizo, aproximadamente 2,3 [m], que entre los dos tramos suman 4,6 [m]. En este contexto, se debe tener en cuenta el tipo de junta a utilizar, las cuales deben permitir resistir los movimientos verticales del tablero en estos puntos.

Conocido el estado de la estructura, se especifican a continuación los trabajos o acciones correctivas a realizar para la reparación del



Figura 27 Topes laterales de estribos

#### puente:

- a) Corrección del desplazamiento lateral.
- Cambio de la solución de los topes sísmicos en las cepas, para movimientos laterales, longitudinales y verticales.
- c) Incorporación de topes laterales en los estribos.
- d) Restitución de placas de apoyo.
- e) Reparación de las juntas de dilatación.
- f) Corrección del deterioro de vigas.

El proyecto de reparación se inicia con el reposicionamiento de los tramos de tablero que sufrieron desplazamientos laterales excesivos, y en los que el sistema de sujeción no fue capaz de resistir las solicitaciones sísmicas.

En primer lugar, se realiza el levantamiento de la superestructura mediante un sistema hidráulico y soltando levemente los anclajes de los estribos.

Posterior al izaje del tablero, se desplaza el sistema de vigas y losa a eje del puente, mediante la utilización de una placa de acero engrasada.

Al finalizar la faena de desplazamiento lateral, se posiciona la superestructura sobre las nuevas placas de apoyo y se realiza el apriete de las barras de anclaje.

Luego de haber alineado las vigas, se reemplazan las sujeciones existentes en las cepas, por un nuevo sistema en base a un perfil "Z", reforzado con placas rigidizadoras (Figura 29).

En el caso de los apoyos en que fue necesario el reemplazo de las placas de neopreno, se refuerza el perfil Z en un mayor grado con planchas que aumentan su inercia. Además, con el objetivo de corregir y evitar futuros daños en las vigas debido al contacto con los topes, se incorpora una placa de repartición soldada a la platabanda inferior, la cual funciona como elemento de sacrificio al recibir el contacto directo con el nuevo sistema de topes (Figura 30).

En el caso de los estribos, se reemplazaron lo topes laterales existentes por un sistema de hormigón armado adosado a los travesaños, que genera un contacto directamente con la mesa de

apoyo de las vigas en el estribo. Para que este contacto no produzca daños en los elementos, se instalaron placas de neopreno, unidas a los estribos utilizando barras de acero inyectadas. Cabe destacar que los nuevos topes se encuentran ubicados entre las vigas.

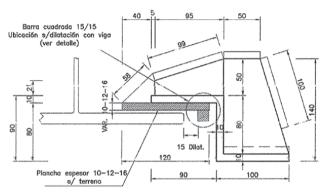


Figura 29 Detalle perfil Z, se observa refuerzo mediante placa rigidizadora

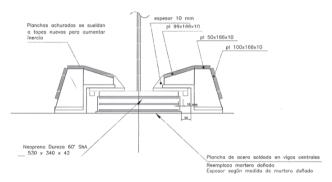


Figura 30 Detalle refuerzo de sujeciones en sector de apoyos

# 2.2 Descripción del puente San Luis

El puente San Luis se encuentra ubicado en el sector Chimbarongo – Auquinco – Chépica, provincia de Colchagua, en la VI Región del Libertador Bernardo O'Higgins, Chile. Corresponde a un puente carretero construido en el año 1930 sobre el estero Chimbarongo. (Valenzuela, 2010)



Figura 31 Vista general, puente San Luis

El puente tiene una longitud aproximada de 60 metros, compuesto por cuatro vanos, dos de 16,50 [m] y dos de 13,50 [m.] Su calzada es de 6 [m] más dos pasillos de 0,70 [m] cada uno (Figura 31). La superestructura está compuesta de tres vigas continuas de hormigón armado, una losa superior, pasillos y barandas de hormigón. La infraestructura consiste en 2 estribos de muro frontal y laterales llenos, de hormigón armado; además de 3 cepas tipo muro de hormigón armado con fundación de pilotes de acero de tipo doble riel.

# 2.2.1 Daños por socavación

La principal patología observada, y por la cual se realizan los trabajos de refuerzo, corresponde a un problema de socavación en las 3 cepas piloteadas del puente, llegando a un orden de 2 [m] (Figura 32). Producto de esto, las fundaciones sobre pilotes doble riel ferroviario presentan un alto grado de desgaste y oxidación. La socavación ha ido en aumento, por lo que se ha realizado el proyecto de refuerzo de las cepas mediante un sistema de pilotaje, con el objeto que el puente continúe en servicio.

En términos de socavación, no existían estudios de socavación de diseño, pero las condiciones de modificación del eje hidráulico por la construcción de un embalse aguas arriba, modifica la tasa de depósitos al presentarse aguas claras, lo cual incrementa los procesos de socavación y erosión.



Figura 32 Socavación y erosión en cepas, puente San Luis

A pesar de esto, el puente hasta la inspección del año 2003 no presenta descensos ni desalineamientos que indiquen falla. Aunque sí ha presentado problemas en los apoyos, especialmente en el sector de estribos, como también problemas con el sistema de barandas.

Adicionalmente, el puente presenta apoyos metálicos tipo rodillos en malas condiciones, con presencia de óxido y suciedad.

# I. Consideraciones para la reparación

El puente no presenta deformaciones que indiquen su colapso, pero sí es necesario realizar reparaciones para restituir su puesta en servicio y asegurar durabilidad, ya que frente a una acción sísmica es muy probable que pueda colapsar la estructura.

Por la antigüedad del puente no se cuenta con planos de proyecto, lo que obliga a un estudio de la geometría en terreno. Conocido el estado de la estructura, se especifican a continuación los trabajos a realizar para la reparación del puente:

- a) Refuerzo de pilas con pilotes hincados metálicos.
- b) Cambio de carpeta de rodado por concreto asfáltico para puentes.
- c) Reparación y limpieza de sistemas de apoyo.
- d) Reemplazo de desagües y barbacanas.
- Reposición de juntas de dilatación (elastoméricas en acceso al puente).
- Reparación de hormigones dañados en todos los elementos estructurales (losa, vigas y pilas).
- g) Reparación de losa de calzada y pasillos (sellado de fisuras y grietas).
- h) Reparación, limpieza y pinturas de barandas existentes.
- i) Instalación de losas de acceso de 6 x 3 [m] en ambos extremos.
- j) Señalización. También se considera la mantención y desarme de un desvío provisorio, reparación e inyección de grietas, obras de acceso, mejoramiento de la señalización y seguridad vial, y obras de protección de cauce.

#### II. Proyecto de refuerzo

El proyecto incluye tanto refuerzo como reparación del puente y recoge su financiamiento a partir de fondos sectoriales realizados por empresas contratistas privadas.

En su diseño no rige el Manual de Carreteras, por lo que el camión de diseño es menor a un HS 20-44 más el 20%, aunque a la fecha del refuerzo se constataba el paso de vehículos mayores.

El trabajo principal del proyecto corresponde a un refuerzo de las tres cepas del puente mediante hincado de pilotes.

La metodología de instalación de pilotes que se utiliza es a través pilotera, emplazada en un terraplén adyacente al desvío sobre el cauce para evitar sobrecargar la estructura.



Figura 33 Trabajos de perforación de losa para hincado de pilotes

Se utilizan pilotes de tubos Yoder de 30 [cm] de diámetro y 12 [m] de longitud, que se hincan a través de perforaciones en la losa del tablero (Figura 33) hasta una profundidad tentativa, no superior a los 15 [m]. Estos pilotes se afianzan a la estructura de la pila mediante un encepado de hormigón armado (recrecido de hormigón) que abrazan las fundaciones antiguas. Producto que los pilotes doble riel y el hormigón del encepado de las fundaciones con que cuentan las cepas muestran un deterioro más avanzado que el esperado, se efectúa un alzaprimado a modo de prevenir cualquier tipo de descenso diferencial, en una o todas las pilas existentes, mientras se ejecuta el hincado de pilotes tipo Yoder (Figura 34).



Figura 34 Hincado de pilotes

Con esta técnica de refuerzo es probable comprometer toda la estructura, si el proceso de hincado tuviese algún error al golpear. Por esta razón el alzaprimado se utiliza como un sistema de refuerzo, compuesto por marcos metálicos cimentados en bloques de hormigón sobre terreno debidamente compactado. Referente a este alzaprimado, se pretende sustentar la superestructura del puente mediante pilares metálicos o tubos, fijados a las vigas laterales, cuatro por cepa, empotrados en bloques de hormigón. Estos elementos son indispensables para impedir descensos diferenciales que dañarían las vigas continuas y la estructura general del puente.

La instalación de pilotaje se efectúa mediante la desviación del cauce del estero a través de un pretil, a fin de abordar su instalación en forma separada. También es posible realizarla (en algunos momentos de la obra) en seco o con un caudal mínimo, ya que la Dirección de Obras Hidráulicas de Chile autoriza el corte de agua por el estero para embalsarla para el verano. El trabajo se realiza con el caudal al mínimo, evitando superar los 60 [m³/s], para que de esta forma no afecte la estabilidad del desvío provisorio antes de su desarme. Respecto al cauce del Estero Chimbarongo, en el sector del puente, el desvío provisorio cuenta con ocho alcantarillas de tubo corrugado de 2 [m] de diámetro cada una. La protección del cauce en el área de proyección del puente se realiza mediante un zampeado (acorazado), para evitar erosiones en la fundación de estribos y pilas, además de enrocados en ambas riberas del cauce. Su ejecución se hace simultáneamente con los trabajos en las cepas.

101

# 3 Soluciones de refuerzo por socavación y sismo

Dado los antecedentes desarrollados en este documento, es posible observar semejanzas y diferencias en los proyectos de rehabilitación de los puentes Camarones y San Luis en la solución de patologías del tipo sismo-socavación, que permiten generalizar el método constructivo y plantear las posibles variantes o particularidades que puede presentar un proyecto respecto de otro.

Por un lado, ambas estructuras se ven afectadas por el mismo tipo de patología, socavación en sus fundaciones y daños en sus elementos antisísmicos. Además, en ambas soluciones se proyectan técnicas de reparación relativamente similares, que involucran la incorporación de pilotes metálicos hincados desde la parte superior del tablero, para resolver los problemas de socavación, y la reparación de elementos antisísmicos, que resultaron dañados producto de los movimientos laterales, longitudinales y verticales. De la misma forma, se puede agregar que la estructuración de uno y otro permite clasificarlos dentro de la categoría de "puentes tradicionales chilenos".

En cuanto a sus diferencias, se destaca principalmente la longitud total y el número de tramos de los mismos. El puente Camarones cuenta con 8 tramos para una longitud de 248 [m], a diferencia del San Luis que cuenta con una longitud menor, del orden de los 60 [m] distribuidos en 4 tramos. Estos tramos se encuentran apoyados sobre cepas con fundaciones directas y cepas con fundaciones profundas con pilotes de acero del tipo doble riel, para el Camarones y San Luis respectivamente. Lo anterior permitió que la socavación afectara de manera distinta en ambas estructuras, ya que el puente Camarones presentaba asentamientos e inclinaciones, no detectadas en el puente San Luis. Por lo tanto, en el proyecto de rehabilitación de este último los pilotes metálicos cumplen la función de refuerzo, manteniendo en su lugar las cepas existentes, en cambio en el puente Camarones, luego de la incorporación de los pilotes metálicos, se eliminan las cepas existentes.

De esta forma es posible generalizar el método constructivo para la reparación de patologías del tipo sismo-socavación y mencionar las particularidades que se pueden presentar. En este contexto, la técnica recomendada para resolver problemas de socavación de los puentes en Chile corresponde a la incorporación de pilotes metálicos hincados, ya sea para el refuerzo o reemplazo de las cepas existentes. En el caso de daños producidos por la acción sísmica, se recomienda el reposicionamiento a eje de la estructura y la reparación de barras de anclaje sísmico que fijan la superestructura a la infraestructura y restringen los movimientos laterales, longitudinales y verticales que se puedan producir en un próximo evento sísmico.

Una tercera técnica para las mismas amenazas desarrollado en Chile corresponde al Método del Arco Atirantado (Valenzuela & Casas, 2010). El estudio permite realizar un refuerzo mediante el cambio del esquema estático de puentes de largo medio de vigas continuas de hormigón armado, utilizando para ello un arco atirantado con péndolas network en colaboración con péndolas verticales, entregando una nueva alternativa de refuerzo para puentes que

presenten graves problemas de socavación o daño importante en sus cepas, gracias a la posibilidad de eliminación de ellas (Figura 35).

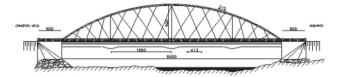


Figura 35 Esquema final, método del arco atirantado

Finalmente, se puede definir las metodologías de refuerzo chilenas en el siguiente esquema (Figura 36).



**Figura 36** Técnicas de reparación y refuerzo utilizadas para solucionar patologías del tipo sismo-socavación

# 4 Conclusiones

Las principales patologías de los puentes tradicionales en Chile, considerando amenazas externas, corresponden a los efectos de los eventos sísmicos y la socavación producto de los regímenes de torrente de los ríos.

Casos de estudio como los Puentes Camarones y San Luis son habituales en los proyectos de reparación y refuerzo frente a estas patologías.

El caso del Puente Camarones posterior a la crecida del 2001 y terremoto 2014 presento patologías de: socavación que afecta a la mayoría de las cepas y desplazamientos laterales de la superestructura, respectivamente.

El caso del San Luis posterior a crecidas del año 2003 presentaba un alto grado de socavación, sin presencia de descensos ni desalineamientos de la estructura.

Se presentaron tres técnicas de refuerzo frente a socavación-sismo aplicados a los casos de estudio: refuerzo de cepas mediante pilotes, reemplazo de cepas y utilización del método del arco atirantado.

Finalmente, la aplicación del método del arco atirantado, si bien es factible para el puente San Luis, para el puente Camarones, requiere de un análisis técnico-económico más detallado, tomando en consideración estructuras que cuentan con una mayor longitud total. Por lo tanto, se dejan abiertas nuevas líneas de investigación, respecto a la factibilidad de la aplicación de esta alternativa.

# Referencias

- [1] CSN, Universidad de Chile. 2014. Centro Sismológico Nacional. [En línea] Abril de 2014 [Citado el: 9 de Julio de 2016.] http://www.sismologia.cl/pdf/informes/terremoto\_iquique\_2014.pdf.
- [2] MOP, Departamento de Puentes, Dirección de Vialidad, Ministerio de Obras Públicas. Informe de puentes: región de Arica y Parinacota y región de Tarapacá, 2014.
- [3] DGA. División de Estudios y Planificación. Dirección General de Aguas. Ministerio de Obras Públicas [En línea] Octubre de 2010. [Citado el: 5 de Julio de 2016.] http://documentos.dga.cl/REH5221.pdf.
- [4] OCRAP Observatorio de Cuencas Región de Arica y Parinacota. [En línea] Newtenberg Publicaciones Digitales, 2012. [Citado el: 5 de Julio de 2016.] http://www.newtenberg.com/cuencas/591/w3-channel.html.
- [5] Galilea, S. "Presentación sobre la experiencia del Ministerio de Obras Públicas de Chile en las Catástrofes del 2015", Anexo 13, Reunión GTE sobre Gestión de Riesgos de Desastres, Cosiplan Foro IIRSA, Lima, Perú, 2016.
- [6] Valenzuela, M. Refuerzo de Puentes Existentes por Cambio de Esquema Estático. Aplicación al Puente San Luis en Chile, Tesis de Máster, BarcelonaTECH, Barcelona, España, 2010.
- [7] Valenzuela, M.; Casas, J. R. "Bridge strengthening by structural change: from continuous beam to network arch, Bridge Maintenance, Safety, Management and Life-Cycle Optimization". Proceedings of the Fifth International IABMAS Conference, Filadelfia, EEUU, 2010.
- [8] Valenzuela, N.; Valenzuela, M. "Presentación sobre Metodología DFS, innovación en análisis avanzado de riesgo", Taller Binacional (Chile-Perú) sobre Gestión de Riesgo de Desastres Cosiplan Foro IIRSA, Arica, Chile, 2016.

Procedimiento de refuerzo de puentes tradicionales chilenos: socavación y sismo Marcelo Márquez, Matías Valenzuela, Pablo Milla, Pablo Vidal