

Estudio de diagnóstico del puente atirantado “Puente Yelcho” para la evaluación de su capacidad estructural actual*.

Diagnostic study of cable-stayed bridge “Puente Yelcho” to assess its current load capacity.
**

Javier Sánchez Haro^{*, a}, Óscar Ramón Ramos Gutiérrez^b, Ricardo Pereira Da Sousa^c, Ivan Campo Rumoroso^c y Frank Schanack^d

^a Dr. Ingeniero de Caminos Canales y Puertos.

^b Dr. Ingeniero de Caminos Canales y Puertos. Universidad de Cantabria

^c Ingeniero de Caminos Canales y Puertos. WSP Spain. Bridge Department.

^d Dr. Ingeniero. Universidad Austral de Chile. Director del Instituto de Obras Civiles.

RESUMEN

Puente Yelcho es un puente de hormigón atirantado que fue construido en Chile en 1990. El puente presenta la particularidad de que los 112 tirantes que lo componen son en realidad barras unidas mediante acopladores para conseguir la longitud necesaria del tirante en cada caso. El difícil entorno ambiental en el que está ubicado el puente puede comprometer la durabilidad esperada de la estructura. En el trabajo que se expone a continuación se muestra cómo se inspeccionó y se evaluó el estado actual del puente para determinar su capacidad estructural, tanto según la normativa con la que fue proyectado como con la normativa vigente hoy en día.

ABSTRACT

Puente Yelcho is a concrete cable stayed bridge built in Chile in 1990. This bridge presents the particular feature of being formed by 112 stayed cables, which are actually bars joined with couplers to reach the necessary length in each case. The difficult environment where it is located makes possible future durability problems that need to be analysed. The following study shows the way the current state of the bridge was analysed in order to obtain its structural capacity. This study was made both according to the applicable regulation at the design date, and the current applicable regulation.

PALABRAS CLAVE: Puente atirantado, Evaluación, Conservación, Modelización de puente existente

KEYWORDS: Cable-stayed bridge, Assessment, Conservation, Existing Bridge modeling.

1. Introducción

El trabajo que se expone en este documento ha consistido en la evaluación estructural de Puente Yelcho, en Chile. El puente fue construido hace 30 años aproximadamente, y durante los últimos 10 ha sido objeto de diversas inspecciones visuales para tener un control cualitativo de su

estado, el cual ha ido sufriendo progresivamente un deterioro con el tiempo. El trabajo consistió básicamente de tres fases: Una primera de investigación para recoger la máxima información posible sobre el puente, una segunda con ensayos de campo y, por último, se

realizó un modelo de cálculo basado en las dos fases anteriores y un análisis estructural derivado de él para evaluar la actual capacidad del puente.

Los trabajos fueron desarrollados por WSP Chile, WSP Spain y Freyssinet Chile.

2. Descripción del puente

Puente Yelcho es un puente atirantado de hormigón de tres vanos (50 m-150 m-50 m).



Figura 1. Puente Yelcho. Vista General.

La sección transversal del tablero es una losa de hormigón armado con nervios laterales, lugar en donde se anclan los tirantes. El ancho del tablero es de 6.7 metros, con único carril útil de circulación de 5.0 m de ancho. El tablero descansa sobre neoprenos verticales en estribos y pilas, donde se han dispuesto topes longitudinales. Adicionalmente se han dispuesto topes trasversales únicamente en las pilas.

El puente cuenta con dos torres de hormigón, las cuales tienen una altura próxima a los 34 metros, medida sobre el tablero, con sección en C de dimensiones 1.00 m x 1.20 m. La altura total de las torres es de 42 m, siendo la sección bajo el tablero de las mismas dimensiones, pero maciza, y estando arriostradas mediante unas vigas de hormigón armado en forma de cruz a media altura (17 metros sobre el tablero).

Elemento	Resistencia Cilíndrica (28 días) [kg/cm ²]
Pilotes	240
Fundaciones y Estribos	300
Torres	320
Superestructura	320

Figura 2. Resistencia de proyecto del hormigón.



Figura 3. Torre de atirantamiento.

En los estribos el tablero está anclado verticalmente con barras para compensar la diferencia de longitud del vano de retenida con respecto al tramo central. Por tanto, el tablero se encuentra fijado verticalmente en los estribos y se consigue mediante 6 barras de alta resistencia de diámetro 36 mm en cada estribo.

Puente Yelcho se cimenta en pilotes in situ. Cada estribo tiene 4 pilotes de 1.0 m de diámetro y 40 m de longitud, mientras que en cada pila el número de pilotes es de 10, igualmente de 1.0 m de diámetro, pero con 16 m de longitud.

Los tirantes esta formados por barras de acero de alta resistencia, de diámetro 36 mm, unidas entre sí mediante acopladores. La resistencia última del acero de los tirantes es $F_u = 10500 \text{ kp/cm}^2$, siendo su límite elástico $F_y = 8500 \text{ kp/cm}^2$. Cada torre dispone de 2 planos de atirantamiento, constando cada plano de 14 tirantes delanteros y 14 tirantes traseros, o de retenida. Por tanto, el número total de tirantes en el puente es de 112.

3. Fase de documentación

Se ha analizado la documentación existente y se ha buscado información adicional que pudiera complementarla. Para la elaboración del presente

informe se han analizado los siguientes documentos:

- Proyecto original.1989.
- Proyecto de construcción 1990.
- Inspección visual de 2010.
- Inspección visual de 2015.
- Sondeos del terreno 2017.
- Artículos técnicos sobre Puente Yelcho.



Figura 4. Proceso constructivo de Puente Yelcho.

A partir de la información analizada se obtuvo la definición geométrica del puente, la definición parcial del proceso constructivo, la definición de armados de elementos secundarios, como las riostras en las torres o principales como los estribos, la definición del anclaje en estribos etc.

Sin embargo, a pesar de la mucha documentación analizada no se consiguió disponer de toda la información básica sobre el puente. De esta forma para el análisis estructural no se contó con el pretensado longitudinal, si lo hubiere, ni con el armado del tablero y torres, así como tampoco con todos los datos del proceso constructivo.

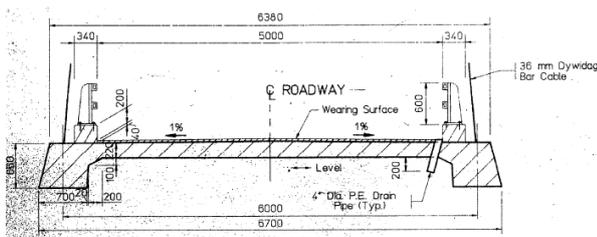


Figura 5. Sección transversal de Puente Yelcho.

3.1 Criterios de diseño de proyecto

Puente Yelcho fue diseñado según la norma AASHTO 1983, a partir del camión HS20-44 y el resto de combinaciones de carga, coeficientes de seguridad y procedimientos de cálculo reflejados en dicha norma.

El cálculo del puente se realizó originalmente mediante un análisis elástico lineal incorporando en los cálculos el proceso constructivo de avance en voladizo definido para este puente, según la información disponible. Adicionalmente, según las notas descritas originariamente para el proceso constructivo, durante todas las etapas constructivas en obra se controló la elongación de los tirantes para verificar que la carga de diseño de los mismos era la correcta.

3.2 Inspecciones visuales previas

Las principales deficiencias que se detectaron durante las inspecciones visuales, desde el punto de vista de la seguridad estructural, se pueden resumir en los siguientes puntos:

- Corrosión en anclajes.
- Corrosión en tirantes.
- Corrosión en acopladores.
- Sellado defectuoso de las zonas estancas en tirantes.

Por otro lado, también se detectaron observaciones de carácter funcional, las principales fueron las siguientes:

- Pavimento defectuoso.
- Baranda defectuosa.
- Obstrucción de zona de evacuación de aguas.

4. Fase de trabajos de campo

Dentro de los trabajos de campo se realizaron una inspección preliminar y una inspección general del puente. Con estos trabajos básicamente se confirmaron los hallazgos de las inspecciones llevadas a cabo en los años

precedentes, comprobando el grado de evolución de cada una de ellas.



Figura 6. Trabajos de inspección en Puente Yelcho.

Adicionalmente a los trabajos de campo se realizaron un levantamiento topográfico, un pesaje de los tirantes y una campaña de ensayos complementarios.

4.1 Levantamiento topográfico

El levantamiento topográfico consistió en un levantamiento de los accesos del puente a una escala 1:500 y un levantamiento 3D mediante Escáner Láser del puente, junto con su post procesamiento y modelado 3D.

El equipo escáner-láser que se utilizó para el levantamiento es el Trimble TX8. Las mediciones de escáner láser cuentan con una precisión nominal de 1-2 mm hasta los 120 metros, midiendo 1 millón de puntos por segundo en un tiempo estándar de 2 minutos.



Figura 7. Puntos escaneados en Puente Yelcho.

El equipo Trimble TX8 entrega nubes de puntos en alta densidad, con un campo de visión de $360^\circ \times 317^\circ$ y una velocidad de captura de un millón de pesos por segundo con distintos tipos de tiempo de escaneo.

A partir de esa cantidad de puntos, previo filtrado y limpieza, se generó el modelo geométrico del puente.



Figura 8. Modelo geométrico de Puente Yelcho.

A partir del modelo geométrico se observó que la sección transversal del tablero tenía un espesor ligeramente superior al teórico.

4.2 Pesaje de tirantes

Se realizó un pesaje hidráulico en los 112 tirantes del puente. El equipo hidráulico empleado fue RRH1001.

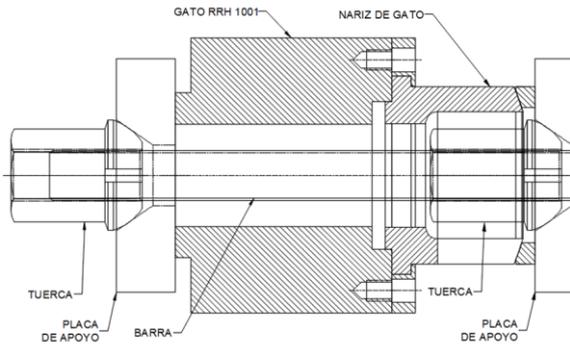


Figura 9. Conjunto para pesaje con gato hidráulico.

Los resultados del pesaje de los 112 tirantes, de los valores de proyecto y de los valores de construcción, se muestran a continuación:

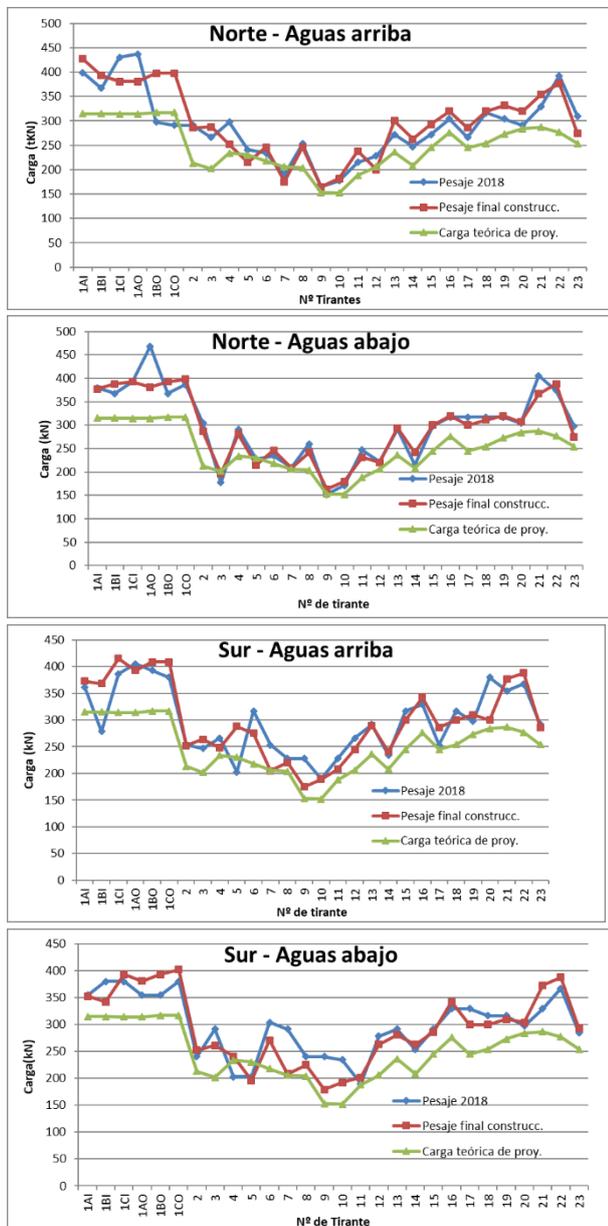


Figura 10. Resultado de pesaje de 2018 en tirantes.

Como se puede observar de los gráficos anteriores, la carga de construcción y la propia del pesaje están consistentemente por encima de la carga de proyecto.

Por otra parte, la diferencia entre la carga total de los tirantes en construcción y durante el pesaje realizado en 2018 es bastante pequeña, únicamente presenta alguna zona de redistribución de esfuerzos entre tirantes.

4.3 Ensayos complementarios

Durante la fase de trabajos de campo, y en colaboración con el Inspector de Vialidad, y mediante una empresa local, se realizaron los siguientes ensayos de campo en varios puntos a lo largo de la estructura para completar la toma de datos del puente:

- Permeabilidad al aire del hormigón.
- Carbonatación del hormigón.
- Potencial corrosión del hormigón.
- Índice Esclerómetro del hormigón (martillo Schmidt).
- Resistencia a la penetración (Pistola Windsor)
- Resistividad eléctrica del hormigón.

De los ensayos realizados se obtuvieron dos conclusiones principales:

- El hormigón se encuentra en términos generales en buen estado, y no se ha encontrado riesgo de corrosión en las armaduras inspeccionadas.
- Todos los ensayos presentan una tendencia de índices más bajos en la zona de la estructura orientada al Este, zona predominante de los agentes climáticos.

5. Modelización del puente

Se ha realizado un modelo de elementos finitos que combina elementos lámina, elementos viga y elementos cable para obtener una precisión suficiente al nivel del detalle buscado.

El tablero se ha modelado mediante un emparrillado para poder analizar con mayor rigor y de manera independiente los nervios del tablero de la losa central.

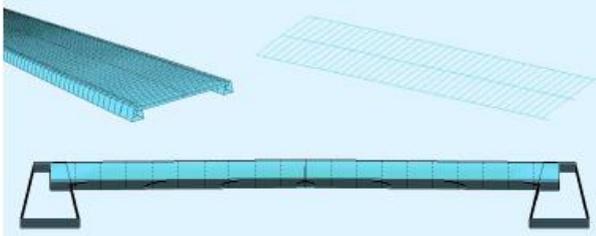


Figura 11. Modelado del tablero mediante emparrillado.

A partir de la documentación analizada, se ha modelado el proceso constructivo para obtener el estado tensional del puente.

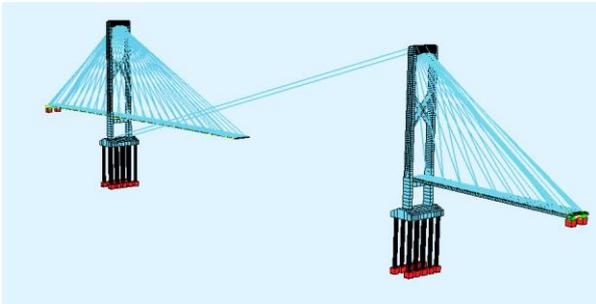


Figura 12. Modelado del proceso constructivo.

Con el modelo previamente descrito se han realizado tres análisis de manera independiente:

- Análisis lineal evolutivo, que incluye el proceso constructivo en la obtención de esfuerzos y desplazamientos del puente, y, además, han sido tenidas en cuenta el resto de cargas del puente una vez “abierto a tráfico”.
- Análisis “Push-Over” y análisis espectral-modal para el estudio de sismo.
- Análisis modal, para la obtención de los modos propios de vibración de la estructura.

Para el análisis lineal evolutivo no se consideró la existencia de topes estructurales, dado que se ha asumido que los movimientos son pequeños y, por tanto, no hay interacción entre topes y estructura.



Figura 13. Modelo completo de Puente Yelcho.

Los estribos se analizaron con un modelo independiente.

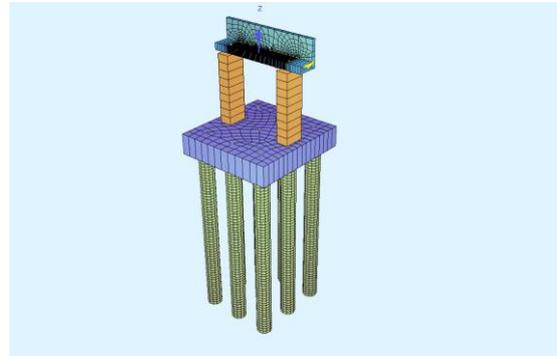


Figura 14. Modelo independiente para estribo.

6. Análisis de la capacidad de carga

Para el estudio del puente se analizó la normativa AASHTO 1983 y la AASTHO 2002 principalmente, según indicaciones del Ministerio de Vialidad. La idea subyacente era analizar el puente bajo las condiciones en las que fue construido, y bajo las condiciones actuales.

A partir de las combinaciones indicadas en ambas normativas se obtuvieron las combinaciones de diseño correspondientes, y se siguieron sus criterios de diseño.



Figura 15. Envoltura de compresiones en losa.

En aquellos elementos de los que se disponía detalles de armado, se hizo un análisis seccional y se comprobó el margen que disponía cada una de las secciones.

En aquellos elementos de los que no se disponía detalles armado, se analizó la cuantía necesaria para resistir los esfuerzos de diseño. Y se estudió la viabilidad de esta cuantía en cada sección.

Se analizaron con especial cuidado las cargas en los pilotes, tanto desde el punto de vista estructural como geotécnico.

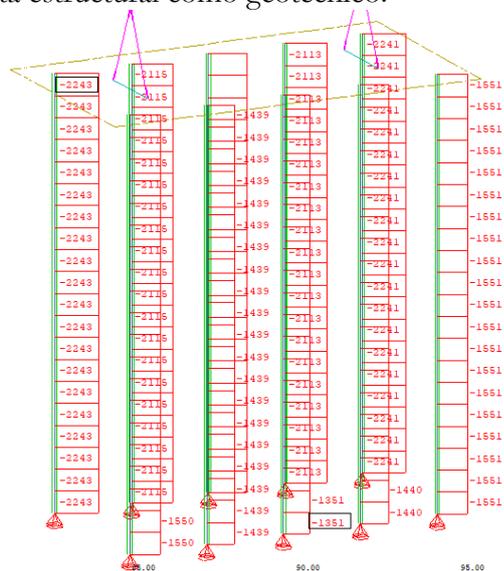


Figura 16. Axiles en pilotes bajo la combinación permanente.

A partir del modelo se analizó la carga en los tirantes y su evolución teórica con el tiempo.

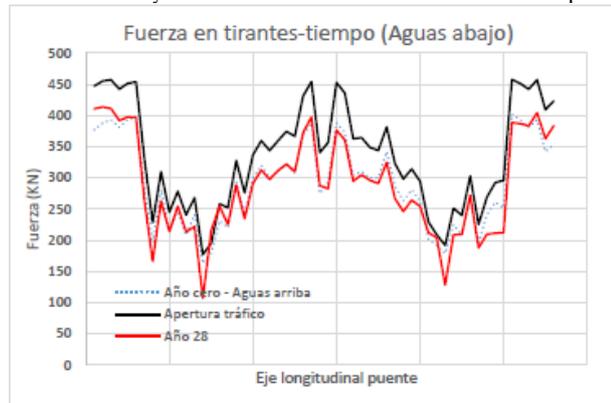


Figura 17. Axiles en tirantes en la apertura al tráfico y 28 años después según el modelo de cálculo.

Para chequear los tirantes también se analizó el porcentaje de utilización bajo carga permanente (en torno al 35%) y bajo carga viva (en torno al 15%).

7. Conclusiones del estudio

En base a todos los trabajos descritos anteriormente, se llegó a las siguientes conclusiones.

7.1 Estado general del puente

Los resultados del pesaje de los tirantes realizado en el marco del presente estudio mostraron que la fuerza en ellos es sensiblemente similar a la dispuesta al final del proceso constructivo del puente. Este hecho en sí mismo demuestra de forma indirecta un primer comportamiento general del puente satisfactorio, dado que excluye algunas patologías como movimientos relativos importantes entre tablero y pila, cambios importantes en la rigidez, redistribución de esfuerzos, etc.

7.2 Comparación de normativas AASHTO

Las principales normativas de referencia, AASHTO Standard 1983 y AASHTO Standard 2002, presentan prácticamente las mismas cargas de diseño, a excepción del sismo. El análisis sísmico de esta segunda es considerablemente más exigente desde el punto de vista estructural; sin embargo, debido a que Puente Yelcho está ubicado en una zona de sismicidad baja (zona 1), el sismo en términos generales no resulta predominante con respecto a las otras cargas, y esto hace que las conclusiones según ambas normativas en términos de esfuerzos, cuantías máximas requeridas etc. sean similares.

7.3 Tablero

En base a las fuerzas reales en los tirantes obtenidas durante el pesaje, a los esfuerzos derivados de ellas en el tablero y a la capacidad seccional del propio tablero, se ha verificado que el equilibrio general del puente no es compatible con el peso teórico deducido de la geometría de los planos de que se dispone.

Puesto que la inspección visual del puente indica que el tablero no presenta signos de agotamiento en ningún punto, y que las condiciones de apoyo estático se conservan (cargas de compresión en los apoyos), nos inclinamos a pensar que el peso real del tablero debe ser apreciablemente mayor que el teóricamente deducido de los planos de proyecto que se conservan. Este hecho también parece refrendarse a partir de los datos del levantamiento topográfico, que identificó un ligero aumento en los espesores del tablero. Dada la esbeltez de la sección transversal del tablero, una variación centimétrica en los espesores de hormigón realmente conduce a una variación apreciable en el peso propio total de la sección.

Durante la construcción del puente entendemos que debieron modificarse al alza las cargas de tesado inicialmente previstas hasta poder alcanzar la rasante teórica. Con la constatación de las cargas reales a través de las mediciones realizadas en el marco de este estudio se ha estimado como incremento necesario un 15% del peso teórico del tablero, aproximadamente. Se ha comprobado que este incremento se puede obtener aumentando espesores de la capa asfáltica y/o de la losa en valores razonables. En cualquier caso, este aumento de peso de tablero podría explicar la diferencia entre el tesado de proyecto y el que finalmente se realizó en la finalización del proceso constructivo de Puente Yelcho (en torno a un 15% mayor).

7.4 Cuantías de armado.

Debido a la falta de información sobre la armadura realmente dispuesta en algunos elementos importantes del puente, se ha realizado un estudio paramétrico de la armadura necesaria. En términos generales las cuantías máximas de armado obtenidas para los grupos elementos, sin contar con refuerzos locales y bajo la hipótesis de un 15% adicional de peso de tablero, se consideraron razonables para un puente de esta tipología.

7.5 Barras de anclaje

Los anclajes del tablero al estribo tienen margen suficiente según los esfuerzos obtenidos en los cálculos y las normativas de referencia utilizadas.

7.5 Tirantes

Los tirantes presentan una carga máxima en servicio del orden del 50% de la carga de rotura. Si bien es un valor razonable para puentes de esta tipología, hay otros fenómenos observados como desalineaciones y oscilaciones laterales que necesitan de un mayor análisis para poder determinar su influencia en la vida útil por fatiga de estos elementos.

7.6 Subestructura

En lo referente al análisis del estribo se considera que el armado, que sí estaba correctamente identificado en los planos, es adecuado para resistir el sismo de diseño.

Las pilas y la cimentación presentaron un comportamiento adecuado para cuantías de armado razonables, por lo que se consideró que no presentaban problemas especiales.

7.7 Resumen

En base a todo lo expuesto, en términos generales, Puente Yelcho se comporta de manera adecuada con respecto a los esfuerzos de diseño considerados en las normativas de referencia especificadas en las bases de diseño del proyecto.

Los resultados del pesaje de los tirantes y ensayos complementarios apuntaron también a un adecuado estado actual del puente.

La actuación más urgente a considerar fue la sustitución de algunos tirantes y anclajes, así como establecer un adecuado plan de mantenimiento.

Todos los resultados obtenidos en este estudio han de considerarse como orientativos y con precauciones. La falta de información relativa al proceso constructivo, la ausencia de definición de armados en los elementos más

importantes del puente o incluso la incógnita del pretensado longitudinal del tablero, han provocado la asunción de hipótesis que, en la medida que estas se acerquen a la realidad, validarán los resultados obtenidos.

Para intentar comprobar alguna de esas hipótesis, incluida la del incremento del peso del tablero, está planificado un conjunto de actuaciones adicionales que permitirán aumentar el grado de certeza de las conclusiones aquí expuestas, y poder determinar así de manera definitiva la capacidad actual de carga de Puente Yelcho.

Agradecimientos

Sirvan estas líneas para agradecer el trabajo y la dedicación al equipo del Ministerio de Obras Públicas de Chile (MOP), al equipo técnico de Freyssinet y al equipo de la Universidad Austral de Chile. El trabajo se ha desarrollado de manera conjunta, con gran implicación por todas las partes y fruto de esa colaboración se ha podido desarrollar un gran trabajo tanto desde el punto de vista técnico como organizativo.

Referencias

- [1] AASHTO Standard Specifications for Highway Bridges, 13th Edition 1983
- [2] AASHTO Standard Specifications for Highway Bridges, 16th Edition 1996
- [3] AASHTO Standard Specifications for

Highway Bridges, 17th Edition 2002

- [4] Manual de Carreteras de la Dirección de Vialidad MOP vigente a la fecha de la licitación, Volúmenes 1-9 y sus respectivos complementos.
- [5] AASHTO – Guide Manual for Bridge Element Inspection, First Edition, 2011.
- [6] ASHTO – Manual for Bridge Evaluation, 2nd Edition, 2011.
- [7] AAASHTO – LRFD Bridge Construction Specification, Third Edition 2010.
- [8] Norma AASHTO LRFD BRIDGE DESIGN SPECIFICATIONS 6th Edition, 2012.
- [9] AASHTO – Guide Specifications for LRFD Seismic Bridge Design, Second Edition, 2011.
- [10] Nuevos criterios sísmicos para el diseño de Puentes en Chile, dirección de Vialidad, Julio 2010.
- [11] AASHTO – Guide Specifications for Seismic Isolation Design, Third Edition, 2010.
- [12] Criterios sísmicos para el diseño de puentes. en Chile (2017).