

Instrumentación y Prueba de Carga del Puente Colgante Exploradores. Instrumentation and Load Test of the Exploradores Suspension Bridge.

Frank Schanack ^{1,*}, Cristian Salcedo ², José Pablo Gacitua ³, Mauricio Cárdenas ⁴, Ítalo Rivera ⁴.

¹Universidad Austral de Chile, Laboratorio de Ingeniería de Puentes y Estructuras, Valdivia, Chile.

²Dirección de Vialidad Región de Aysén, Departamento de Proyectos, Coyhaique, Chile.

³PONTINEL Spa, Valdivia, Chile.

⁴STRADALE Ingeniería de Proyectos & Asesorías Ltda, Santiago, Chile.

INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

Historial del

artículo:

Recibido

14-11-2023

Aceptado

16-04-2024

Publicado

25-08-2024

Palabras Clave:

Instrumentación

Prueba de carga

Puente colgante

Banda

extensométrica

Article history:

Received

14-11-2023

Accepted

16-04-2024

Available

25-08-2024

Keywords:

Instrumentation

Load test

Suspension bridge

Strain gauge

Resumen

En mayo 2021 el Laboratorio de Ingeniería de Puentes de la UACH realizó la instrumentación y prueba de carga de la "Pasarela Exploradores", un puente colgante vehicular de 132,0 m de luz ubicado en la Región de Aysén. Las mediciones fueron comparadas con el modelo de elementos finitos. El objetivo del estudio fue verificar el correcto comportamiento de la estructura recién construida de tipología y envergadura singular. La instrumentación consistió de 16 strain gauge para medir la variación de la fuerza en los cables principales, 4 inclinómetros para registrar inclinaciones longitudinales y transversales de las torres, 3 acelerómetros para registrar vibraciones verticales del tablero y una estación topográfica para medir las deflexiones del tablero en 6 puntos diferentes. Además, se usó un acelerómetro para determinar la fuerza permanente de los cables principales mediante el método de cuerda vibrante. La prueba de carga se realizó con un camión ligero con carga (4 t) y sin carga (2,1 t). Se realizaron 2 pruebas estáticas y 3 pruebas dinámicas. En general, la prueba de carga confirma el correcto funcionamiento de la pasarela. Tanto las fuerzas como las deformaciones y vibraciones están muy cercanas a los valores teóricos y dentro de los rangos de seguridad. No obstante, para la adecuada interpretación de posibles futuros daños y defectos, se deben tener en cuenta algunas conclusiones específicas sobre el comportamiento estructural real del puente. Con respecto a los resultados sobre el coeficiente de impacto, se recomienda complementar el trabajo con otros estudios similares.

Abstract

In May 2021, the UACH Bridge Engineering Laboratory conducted the instrumentation and load testing of the "Exploradores Footbridge," a vehicular suspension bridge with a 132.0-meter span located in the Región de Aysén. The measurements were compared with a finite element model. The aim of the study was to verify the proper performance of the newly constructed structure, which features a unique typology and size. The instrumentation included 16 strain gauges to measure the variation in force in the main cables, 4 inclinometers to record longitudinal and transverse inclinations of the towers, 3 accelerometers to measure vertical vibrations of the deck, and a topographic station to measure deck deflections at 6 different points. Additionally, an accelerometer was used to determine the permanent force of the main cables through the vibrating string method. The load test was performed with a light truck both loaded (4 t) and unloaded (2.1 t). Two static and three dynamic tests were conducted. Overall, the load test confirmed the proper functioning of the footbridge. Both the forces and the deformations and vibrations were very close to the theoretical values and within safety ranges. However, some specific conclusions regarding the actual structural behavior of the bridge should be considered for the proper interpretation of potential future damage and defects. Regarding the results on the impact factor, it is recommended to complement the work with similar studies.

* Corresponding author at: Frank Schanack, Universidad Austral de Chile, Laboratorio de Ingeniería de Puentes y Estructuras, General Lagos 2086, Valdivia, Chile. E-mail address: Frank.schanack@uach.cl

RIOC

journal homepage: <https://revistas.ufro.cl/ojs/index.php/rioc/index>

Vol. 12, no. 01, pp. 1–10, Abril 2024

1. Introducción.

El puente colgante “Pasarela Exploradores” se ubica en la Ruta X-728, Provincia de General Carrera, Región de Aysén. Fue diseñado por el ingeniero civil Esteban Echaveguren y tiene una luz principal de 132 m. Está concebido para soportar el tránsito de vehículos livianos hasta un peso de 5 toneladas. La figura 1 muestra fotografías del puente.

En Chile, los puentes colgantes son considerados puentes con tipologías especiales, como se define en el acápite 3.1001.302(2) a) del Manual de Carreteras (MOP, 2022). Las luces habituales para pasarelas colgantes vehiculares no exceden los 100 m y los 130 m en pasarelas peatonales (Echaveguren, 2003). En consecuencia, el puente colgante Exploradores tiene carácter de puente singular tanto en tipología como en envergadura. Con el objetivo de verificar el correcto comportamiento de esta estructura singular, la Dirección de Vialidad Región de Aysén solicitó una prueba de carga.

Para esto, en mayo 2021, el Laboratorio de Ingeniería de Puentes de la UACH realizó la instrumentación necesaria para monitorear las fuerzas en los cables principales, la inclinación de las torres y las aceleraciones verticales del tablero. Luego, los resultados fueron analizados por la empresa PONTINEL SpA en comparación con los resultados teóricos del modelo de elementos finitos (FEM).



Figura 1. Fotografías del puente colgante “Pasarela Exploradores”.

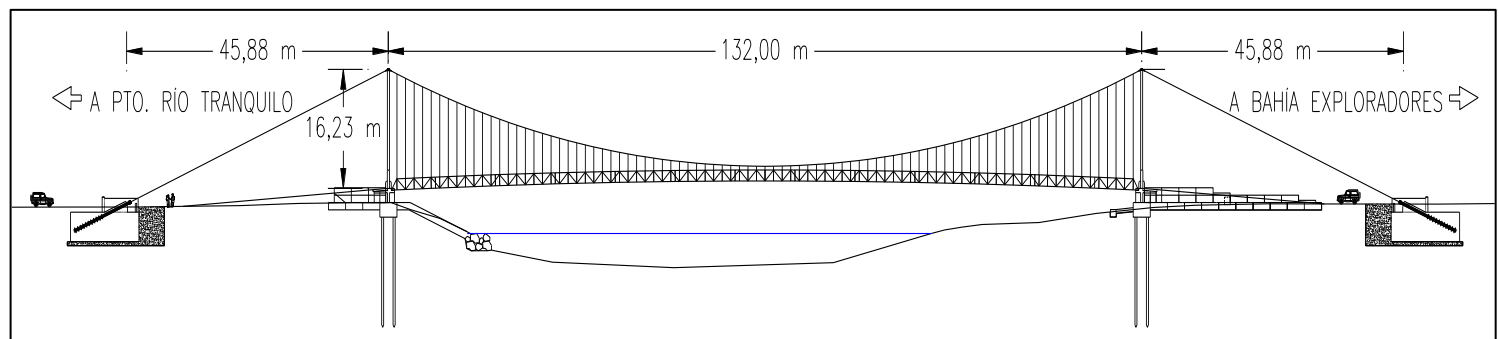


Figura 3. Puente colgante “Pasarela Exploradores”, corte longitudinal (Echaveguren, 2011).

1.1. Breve descripción del puente.

La ruta X-728 conecta las localidades Puerto Río Tranquilo y Bahía Exploradores en la Región de Aysén (Figura 2). Provee una conexión terrestre hacia los fiordos del Aysén occidental que es usado principalmente por habitantes de la zona y transporte de pasajeros en el marco del acceso turístico a la Laguna San Rafael (INECON, 2009).



Figura 2. Ubicación del puente colgante “Pasarela Exploradores”.

El puente “Pasarela Exploradores” es un puente colgante con viga de rigidez. Tiene un solo vano de 132,0 m de longitud y una altura de las torres sobre la calzada de 16,23 m. Los cables principales se anclan a una distancia de 45,88 m detrás de las torres. La flecha de los cables principales es de 1/10 de la luz y el tablero tiene una contraflecha de 1,25 m. La figura 3 muestra el corte longitudinal del puente según el proyecto.

El tablero se compone de dos vigas rigidizadores de acero con una cercha tipo Warren y un canto de 1,50 m, conectadas entre sí con vigas transversales 2xIPE240 a distancias de 1,50 m. La distancia entre ejes de las vigas rigidizadores mide 3,52 m. El tablero dispone de barreras metálicas y dispone de un ancho útil de 2,55

m. La calzada del puente se compone de 6 longuerinas metálicas IPE120 y tabloncillos de madera de coihue de 2"x6", dispuestos en 2 capas: una transversal (tabloncillo resistencia) y una longitudinal (tabloncillo de rodado). La figura 4 muestra la sección tipo del puente.

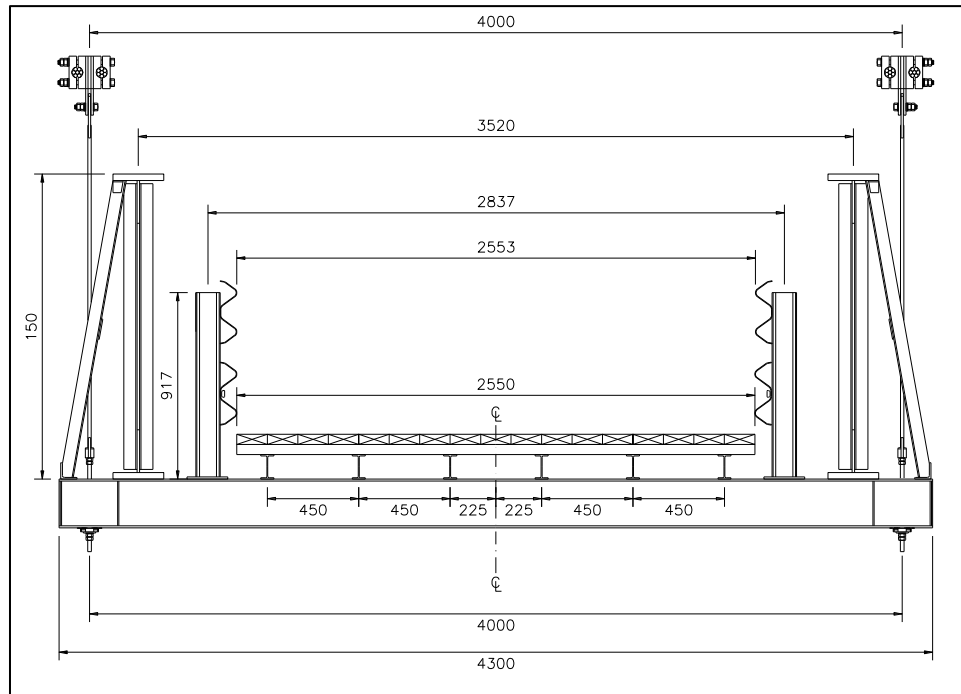


Figura 4. Puente colgante "Pasarela Exploradores", sección transversal (Echaveguren, 2011).

El puente cuenta con dos pares de cables principales, de 54 mm de diámetro cada uno, serie 6x36 (14/7+7/7/1), alma acero tipo Angula AA. De ellos cuelgan 87 péndolas (por cada lado) tipo barra lisa de acero con 16 mm de diámetro. Los cables principales se anclan de a pares en machones de anclajes ubicados en los extremos de la pasarela.

2. Metodología.

El trabajo realizado se puede dividir en 4 etapas:

1. Simulación de la prueba de carga mediante modelo de elementos finitos
2. Diseño e implementación del sistema de instrumentación
3. Planificación y ejecución de la prueba de carga

Realizadas estas etapas, se puede proceder a la comparación medición vs. simulación y el análisis de resultados.

A continuación, se describen los aspectos técnicos principales de cada etapa.

2.1. Simulación de la prueba de carga mediante modelo de elementos finitos.

Para el análisis estructural teórico del puente se elaboró un modelo de cálculo tridimensional en el software de elementos finitos SOFISTIK. La geometría se basa en los planos as-built, donde la distancia de los anclajes hacia las torres se reduce a 48,02 m en el lado Pto. Río Tranquilo y a 48,14 m en el lado Bahía Exploradores. Todos los elementos del tablero y de las torres se modelan mediante elementos tipo viga, mientras que los cables principales y péndolas se modelan mediante elementos tipo cable. Adicionalmente, y sólo para efectos de aplicación de carga, se disponen elementos finitos tipo lámina en el área de rodado, que no tienen rigidez ni peso (SOFISTIK, 2013). La figura 5 muestra el modelo de cálculo con elementos finitos.

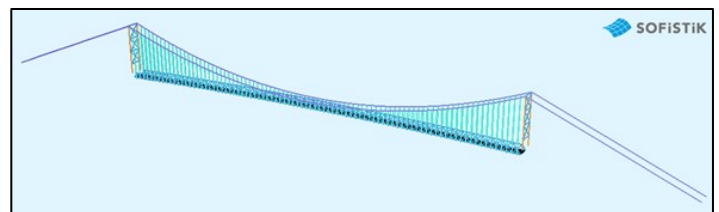


Figura 5. Modelo de cálculo en elementos finitos.

Dado que los resultados teóricos se deben comparar con mediciones en terreno, se requiere la más alta exactitud posible en la modelación. Por lo anterior, se decidió determinar la forma del cable principal mediante un proceso de formfinding. Es un proceso iterativo considerando una no linealidad geométrica de grandes desplazamientos (Jung et al. 2013). La figura 6 ilustra los resultados del proceso de formfinding.

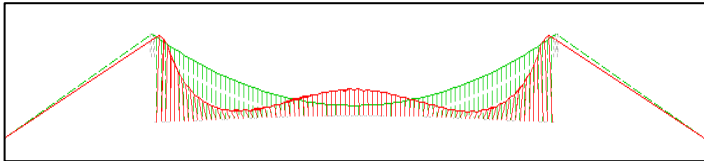


Figura 6. En rojo: Forma resultado del formfinding (amplificado x500) En verde: Forma inicial (x1).

La sobrecarga aplicada al modelo corresponde a un camión ligero Nissan Atlas 200, vehículo con dimensiones reducidas común para el transporte de carga en la zona del emplazamiento del puente. Tiene dos ejes a 2,515 m de distancia y un peso máximo de 4 toneladas aproximadamente. La carga correspondiente a cada rueda se establece de acuerdo a las mediciones realizadas en terreno.

2.2. Diseño e implementación del sistema de instrumentación.

El enfoque de la verificación experimental del comportamiento estructural del puente se centró en la fuerza de los cables principales, por lo que se decidió medirlas en cada uno de los 4 cables y en cada uno de sus extremos. Además, se registraron las inclinaciones transversales y longitudinales de las torres, dado

que tienen en su base una rótula y cambian de inclinación a medida que se cargan y descargan los cables principales. En el tablero, se midieron las aceleraciones verticales a 1/4, 1/2 y 3/4 de la luz. Todo lo anterior se registró mediante sensores (strain gauge, inclinómetro y acelerómetro), conectado a un sistema de adquisición de datos que operó de forma continua durante la prueba de carga. La tabla 1 especifica los parámetros técnicos del sistema y la figura 7 muestra la disposición de los sensores del sistema de instrumentación.

Tabla 1. Parámetros técnicos del sistema de instrumentación.

Elemento	Parámetros
Strain gauge	roseta apilada biaxial en T, rejilla de 7 mm, resistencia de 350 Ohms, compensación térmica para acero
Inclinómetro	biaxiales, tipo MEMS, precisión del 0,001°, rango de +/- 10°
Acelerómetro	piezoeléctricos, dos tipos: sensibilidad 1000 mV/g y 10000mV/g
Adquisición de datos	módulos universales de 8 canales, convertidor A/D de 24 bit, tasa muestreo hasta 40 kS/s, clase de precisión hasta 0,05%

Adicionalmente y fuera del sistema de instrumentación, se midió topográficamente la deflexión del tablero a 1/4, 1/2 y 3/4 de luz durante la prueba de carga. En el puente descargado, se determinaron las frecuencias propias de vibración en las 8 retenidas del puente mediante acelerómetro para calcular la fuerza en el cable bajo peso propio del puente mediante el método de la cuerda vibrante.

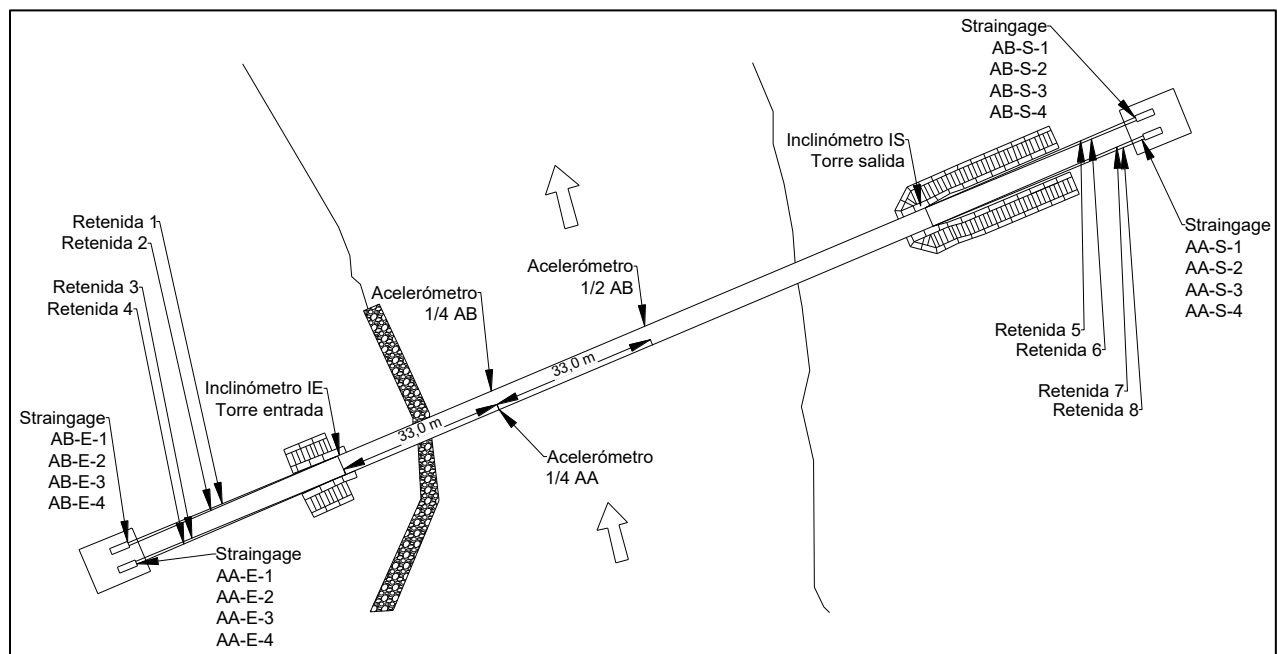


Figura 7. Esquema general de la disposición de los sensores del sistema de instrumentación

2.3. Planificación y ejecución de la prueba de carga.

La prueba de carga se realizó empleando un camión, con y sin carga. Durante la prueba de carga, se han realizado dos mediciones con carga estática y tres mediciones con carga dinámica. Las pruebas estáticas consisten en la detención del camión a 1/4, 1/2 y 3/4 de la luz del puente. En la primera pasada (prueba n°1) se empleó el camión con carga, mientras que en la segunda (prueba n°2) pasó sin carga.

Para las pruebas de carga dinámica se utilizó el camión sin carga, pero en estas pruebas el vehículo no se detiene, sino que circula a una velocidad constante. En la primera prueba dinámica (prueba n°3), el camión avanza a una velocidad muy baja, correspondiente a una prueba cuasi-estática. En la segunda prueba dinámica (prueba n°4), el procedimiento es idéntico, pero el camión pasa a una velocidad constante de aproximadamente 40 km/h. Por último, en la tercera prueba dinámica (prueba n°5), el camión avanza a una velocidad similar a la prueba n°4, pero en esta ocasión se incluye un tablón de Rilem (RILEM, 1984) a los 33 m desde la entrada del puente (1/4 de luz), por sobre el cual pasa el camión produciendo una mayor excitación en las vibraciones. La Tabla 2 muestra un resumen de las pruebas realizadas

Inmediatamente antes de la realización de la prueba de carga, se procedió al pesaje del camión, midiendo la carga sobre cada una de sus ruedas. Así se obtuvo el peso camión con carga. Una vez terminada la prueba n° 1, se descargó el camión y volvió a medir la carga sobre sus ruedas. La tabla 3 muestra las cargas finalmente usadas durante la prueba de carga.

Tabla 2. Resumen de las pruebas realizadas.

Prueba N°	Tipo	Descripción
1	Estática	Camión con carga, se detiene en 1/4, 1/2 y 3/4 de luz hasta estabilizar las deformaciones
2	Estática	Camión sin carga, se detiene en 1/4, 1/2 y 3/4 de luz hasta estabilizar las deformaciones
3	Dinámica (cuasi-estática)	Camión sin carga, avanza a velocidad constante de 5 km/h
4	Dinámica	Camión sin carga, avanza a velocidad constante de 40 km/h
5	Dinámica	Camión sin carga, avanza a velocidad constante de 40 km/h, pasa por encima de un tablón RILEM a 1/4 de luz

Tabla 3. Peso por eje del camión de prueba

	Peso del Camión [kN]		Total
	Eje delantero	Eje trasero	
Con carga	13,7 (34%)	26,7 (66%)	40,4
Sin carga	11,3 (54%)	9,67 (46%)	21,0

3. Análisis de resultados.

3.1. Comparación medición vs simulación.

El análisis de los resultados se puede realizar convenientemente por separado, según los siguientes ítems:

1. Fuerza en los cables bajo peso propio.
2. Variación de la fuerza en los cables por sobrecarga.
3. Inclinación de las torres.
4. Deflexión del tablero.
5. Frecuencias de vibración natural.
6. Amortiguamiento estructural.
7. Factor de impacto.
8. Aceleración vertical máxima.

3.1.1. Fuerza en los cables bajo el peso propio.

En la figura 8 se muestra, a modo de ejemplo, el registro de aceleraciones obtenidas para la retenida 8 y su correspondiente espectro de frecuencias calculado mediante transformada de Fourier.

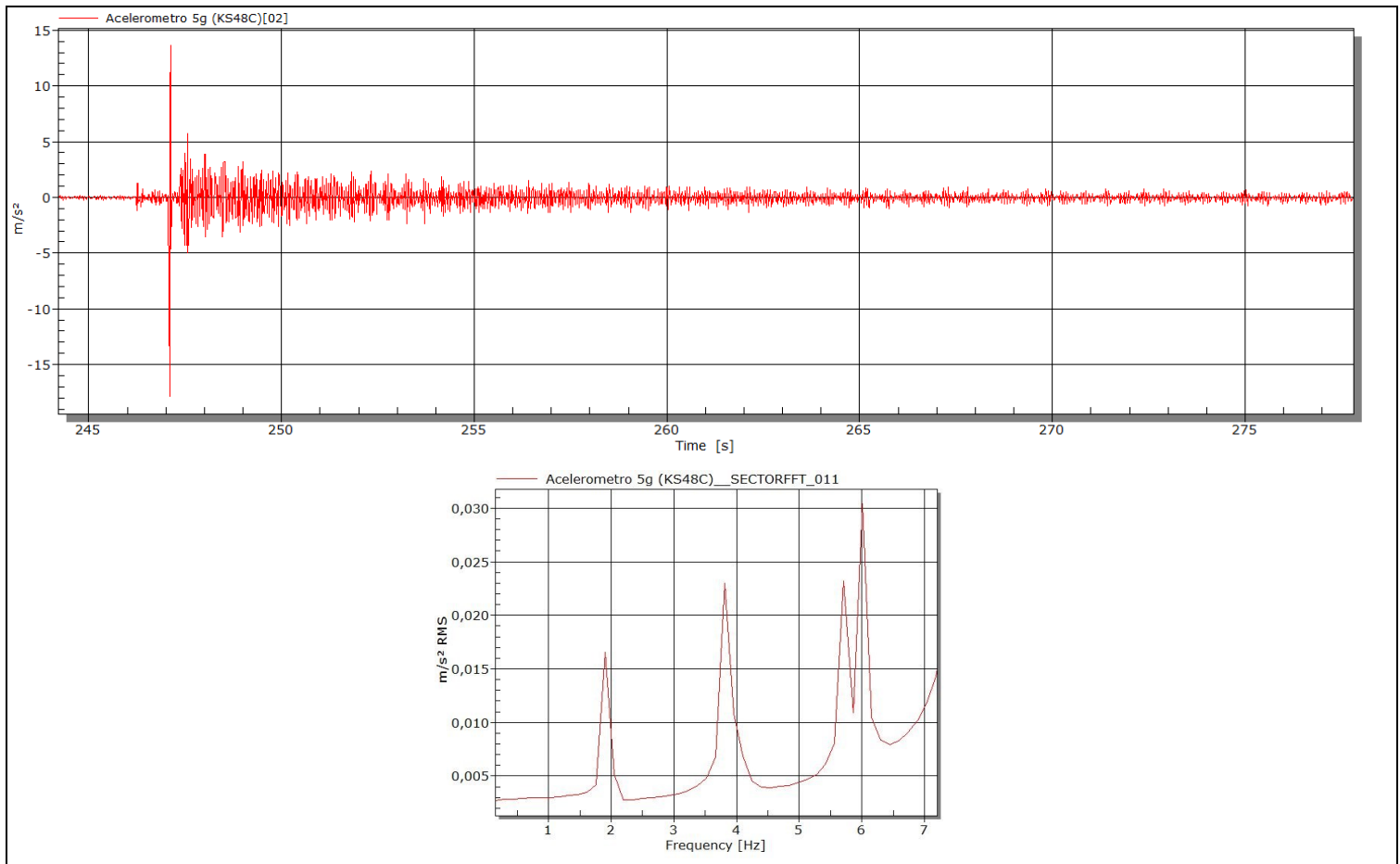


Figura 8. Registro de aceleraciones y espectro de frecuencias correspondiente de la retenida 8.

Para todas las retenidas, las primeras 3 frecuencias de vibración bajo peso propio del puente son, sin excepciones, prácticamente iguales: 1,9 Hz, 3,8 Hz y 5,7 Hz. Dado que los cables en sí y sus longitudes también son iguales, la fuerza calculada mediante el método de cuerda vibrante también es prácticamente la misma en todas las retenidas: 466 kN. Esta fuerza es ligeramente mayor (7,6%) que la fuerza obtenida mediante el model FEM (433 kN).

3.1.2. Variación de la fuerza en los cables por sobrecarga.

La variación de la fuerza en los cables por el efecto de la sobrecarga, fue medida con los strain gauge instalados en los anclajes de las retenidas. La figura 9 muestra, a modo de ejemplo, los registros de la fuerza en la retenida 5, para la prueba del camión con carga.

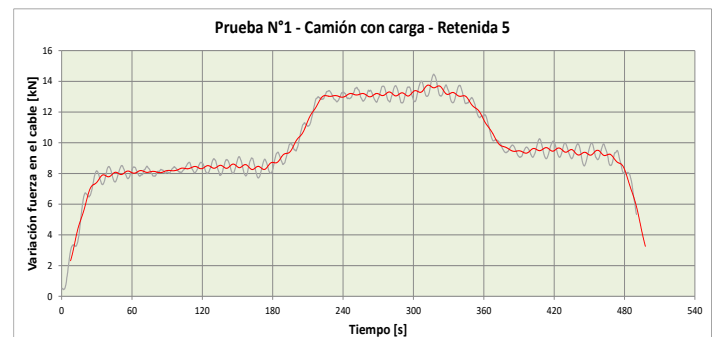


Figura 9. Registro de la variación de fuerza en la retenida 5 durante la prueba N° 1.

De estos gráficos se puede extraer el valor de la fuerza en los cables de retenida cuando el camión estaba a 1/4, a 1/2 y a 3/4 de la luz del puente. Los tres valores se toman como referencia para la comparación con los valores teóricos del cálculo MEF, así como para establecer las conclusiones correspondientes. En la tabla 4 se da un resumen de estos tres valores, para cada retenida y cada fase de la prueba de carga.

Tabla 4. Variación de fuerza axial en retenidas – Pruebas N°1 y N°2

Prueba	Retenida	Variación de fuerza en retenida [kN]		
		Camión en 1/4	Camión en 1/2	Camión en 3/4
N°1 con carga	1	7,5	13,0	9,5
	2	8,5	16,0	12,0
	3	7,5	12,5	9,5
	4	7,0	13,5	9,0
	5	8,5	13,5	9,5
	6	8,0	13,5	9,0
	7	7,0	16,0	13,5
	8	8,5	13,5	9,5
N°2 sin carga	1	5,0	7,5	5,5
	2	6,0	9,5	7,0
	3	4,5	7,5	5,5
	4	5,5	8,5	6,5
	5	5,0	8,0	6,0
	6	6,0	9,0	6,5
	7	6,0	8,0	5,5
	8	5,0	8,0	6,0

En un primer paso, se puede comparar el promedio de las fuerzas medidas con aquellas que son teóricamente esperables, según el modelo de elementos finitos, como muestra la Tabla 5.

Tabla 5. Comparación fuerzas medidas con fuerzas teóricas según modelo FEM.

	Variación de fuerza en retenida [kN]		
	Camión en 1/4	Camión en 1/2	Camión en 3/4
Cargado – Medición	7,8 (66%)	13,9 (85%)	10,2 (88%)
Cargado – FEM	11,8	16,4	11,6
Sin carga – Medición	5,4 (87%)	8,3 (98%)	6,1 (102%)
Sin carga - FEM	6,2	8,5	6,0

En la anterior tabla se puede observar que las fuerzas medidas para el camión en la posición 3/4 de luz, son considerablemente mayores que las fuerzas medidas para el camión en la posición a 1/4 de luz. Esto se debe a un efecto stick-slip por fricción en los desviadores por delante de los machos de anclaje. Se nota cada vez que la variación de la fuerza en las retenidas cambie de signo.

Considerando esto, se puede establecer los valores corregidos de las mediciones, restando el efecto stick-slip. Esta corrección solamente se aplica para efectos de comparación con el modelo FEM, el cual no considera el efecto stick-slip. La tabla 6 contiene los valores corregidos:

Tabla 6. Comparación fuerzas medidas con fuerzas teóricas según modelo FEM.

	Variación de fuerza en retenida [kN]		
	Camión en 1/4	Camión en 1/2	Camión en 3/4
Cargado – Medición	10,2 (87%)	16,3 (99%)	10,2 (88%)
Cargado – FEM	11,8	16,4	11,6
Sin carga – Medición	6,1 (98%)	9,0 (106%)	6,1 (102%)
Sin carga - FEM	6,2	8,5	6,0

De la tabla anterior se puede concluir que las fuerzas medidas en las retenidas, en promedio, son del mismo orden que las fuerzas teóricamente esperables. A continuación, se ha estudiado si todos los cables y retenidas participan por igual en sostener la carga, pudiendo concluir que, en general, la distribución de

fuerzas en las retenidas es uniforme, pero que existe una tendencia ($\approx 5\%$ a 10%) de cargar más los cables del lado aguas abajo.

3.1.3. Inclínación de las torres.

Los cambios de ángulo máximos de las torres teóricamente esperables son extremadamente pequeños, del orden de los 0,03° (30 milígrados). Dado el rango de medición de $\pm 10^\circ$ de los

inclinómetros usados, el ruido es del mismo orden de magnitud y debe ser filtrado. En la figura 10 muestra el registro original y la curva filtrada para un inclinómetro durante las pruebas de carga estática.

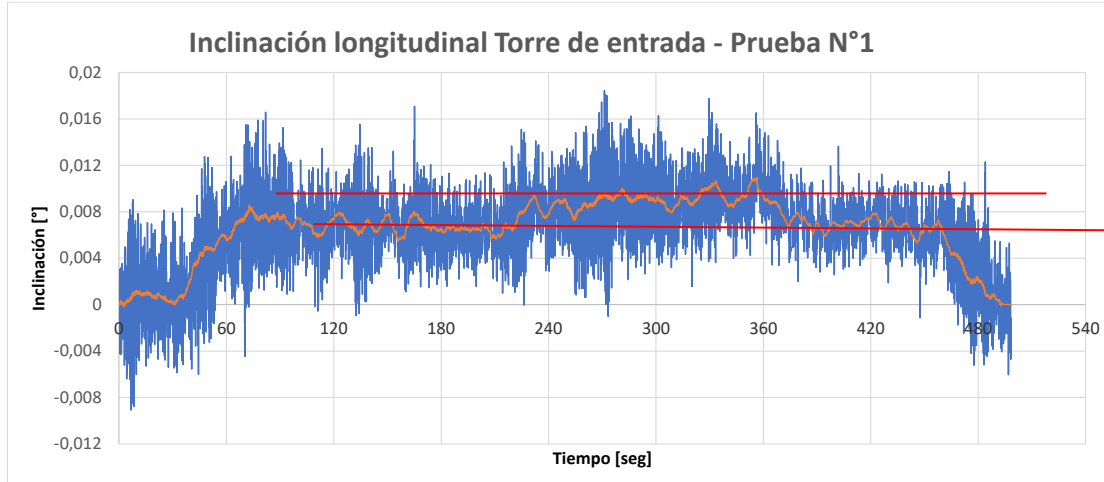


Figura 10. Inclínación longitudinal Torre de entrada – Prueba estática n°1.

De los datos obtenidos se pueden extraer las inclinaciones de las torres para los tres puntos de carga sobre la pasarela. Los cambios de inclinación medidos son del orden del 35% de los valores teóricos en la torre de entrada, y del 17,5% de los valores teóricos en la torre de salida.

Dado que las fuerzas medidas en las retenidas sí corresponden a los valores teóricos, este resultado indica que las torres no trabajan como se suponía en el modelo de cálculo. El modelo de cálculo supone rótulas perfectas en las bases de las torres; al ser el cambio de inclinación sólo un 35% y 17,5% de lo esperable, se concluye que las rotulas tienen cierta resistencia contra giros e

inducen momentos flectores en las torres. Este efecto es mayor en la torre de salida que en la torre de entrada.

3.1.4. Deflexión del tablero.

Las deflexiones del tablero se midieron topográficamente a 1/4, 1/2 y 3/4 de la luz, en cada caso en el lado aguas arriba y aguas abajo del tablero. La interpolación lineal de las mediciones aguas arriba y aguas abajo establece la deflexión del eje del tablero. La figura 11 muestra, a modo de ejemplo, los resultados de las mediciones y su comparación con los valores teóricos del modelo FEM para la prueba N° 1 (camión cargado).

Posición de medición	Camión en 1/4				Camión en 1/2				Camión en 3/4			
	Terreno [mm]	FEM [mm]	Δ [mm]	Terreno/FEM [%]	Terreno [mm]	FEM [mm]	Δ [mm]	Terreno/FEM [%]	Terreno [mm]	FEM [mm]	Δ [mm]	Terreno/FEM [%]
1/4	59	50	9	117%	35	35	0	100%	5	8	-3	56%
1/2	29	34	-5	86%	63	63	0	100%	26	35	-9	74%
3/4	3	8	-5	33%	37	34	3	108%	57	51	6	113%

Figura 11. Inclínación longitudinal Torre de entrada – Prueba estática n°1.

Se puede evidenciar que la mayoría de las medidas reales son del orden de los valores teóricamente esperables. Este resultado es consistente con el resultado de las mediciones de fuerzas en las retenidas, que también están del orden de los valores teóricos.

Sin embargo, de la comparación de todas las mediciones también se puede derivar que las deflexiones medidas en el lado aguas

arriba son siempre mayores que las del lado aguas abajo, lo cual indica que existe una torsión en el tablero. En revisión con el modelo de cálculo, se puede establecer que esta torsión no se debe solamente a una eventual excentricidad del camión, sino que además a otros factores, como puede ser alguna diferencia de rigidez entre los planos estructurales aguas arriba y aguas abajo.

3.1.5. Frecuencias de vibración natural.

Las frecuencias de los distintos modos de vibración del puente se han obtenido por medio de la FFT realizada a las mediciones de los acelerómetros dispuestos para la prueba dinámica. También se obtuvieron los modos de vibración teóricos por medio del modelo de elementos finitos (FEM). Los 2 primeros modos de vibrar del puente se ilustran en la figura 12.

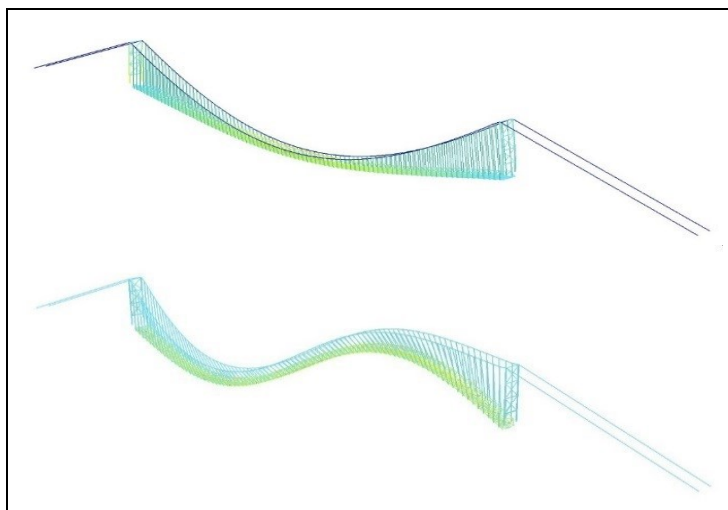


Figura 12. Modo n°1 (FEM) 0,50 Hz y Modo n°2 (FEM) 0,78 Hz.

En una comparación con las frecuencias propias obtenidas de las mediciones en terreno, se puede observar que las frecuencias de vibración medidas son, en su mayoría, ligeramente mayores que las frecuencias teóricas. En promedio, resultan un 11,6% mayor.

3.1.6. Amortiguación estructural.

Se ha aprovechado los registros de vibraciones de las pruebas de carga dinámicas para calcular el amortiguamiento presente en la estructura. Para aquello se ajustó una envolvente logarítmica a las oscilaciones decrecientes registradas. En promedio, el amortiguamiento calculado es de 1,5%, que es mayor a los valores recomendados para estructuras metálicas en el rango elástico de 0,4% (SETRA, 2006), lo cual se explica por los aportes del tablero de madera y los cables espirales al amortiguamiento.

3.1.7. Factor de impacto.

La sobrecarga usada para la prueba de carga tiene una magnitud muy reducida con respecto a la carga causada por peso propio de carga permanente de la estructura. Además, dadas las restricciones de uso vehicular que tiene el puente, no fue posible circular con el camión a una velocidad mayor de 40 km/h por el puente. Analizando las distintas mediciones de los distintos sensores, se pudo establecer un incremento de la respuesta estructural global debido a la velocidad de la carga de aproximadamente un 15%.

3.1.8. Aceleración vertical máxima.

Las aceleraciones verticales experimentadas por el puente se pueden evaluar de acuerdo a las mediciones de los acelerómetros para la prueba dinámica n°4. Los valores máximos de aceleración vertical máxima medidos son del orden de los 0,35 m/s². Este tipo de aceleración no se considera molesto para los peatones, siendo el límite recomendado 0,5 m/s² (Bachmann et al., 1991).

4. Conclusiones.

En mayo 2021 el Laboratorio de Ingeniería de Puentes de la UACH realizó la instrumentación y prueba de carga de la “Pasarela Exploradores”, un puente colgante de 132,0 m de luz para tránsito de vehículos hasta 5 toneladas. Los resultados de las mediciones fueron comparados con los valores teóricamente esperables. El objetivo del estudio fue verificar el correcto comportamiento de la estructura recién construida de tipología y envergadura singular.

La instrumentación consistió de 16 strain gauge, 4 inclinómetros, 3 acelerómetros y una estación topográfica. La prueba de carga se realizó con un camión ligero con carga (4 t totales) y sin carga (2,1 t). Se realizaron 2 pruebas estáticas y 3 pruebas dinámicas a 5 km/h, 40 km/h y 40 km/h con tablón RILEM.

Los principales resultados del estudio son los siguientes:

- Conclusión 1. Todas las retenidas tienen una fuerza bajo carga permanente prácticamente igual, ligeramente superior (7,6%) a lo esperable.
- Conclusión 2. La variación de fuerza en las retenidas por sobrecarga es del orden de magnitud esperable. La distribución de fuerzas en las retenidas es uniforme, pero existe una tendencia menor (≈5% a 10%) de cargar más los cables del lado aguas abajo.
- Conclusión 3. Las torres se comportan en general según lo esperado, pero con inclinación menor, lo que significa un aumento de las tensiones teóricas en no más de 1,5 N/mm².
- Conclusión 4. Las deflexiones medidas son del mismo orden de magnitud que los valores teóricos, pero mayores en el lado aguas arriba.
- Conclusión 5. El comportamiento dinámico del puente, en términos de frecuencias, amortiguamiento y aceleraciones, está dentro del rango normal y esperable. El coeficiente de impacto fue determinado ser aprox. 1,15, algo mayor que el valor propuesto por la normativa (1,09).

- Conclusión 6. En general, la prueba de carga confirma el correcto funcionamiento de la pasarela, dentro de las tolerancias admisible. No obstante, para la adecuada interpretación de posibles futuros daños y defectos, se deben tener en cuenta los resultados de la prueba de carga.

Para futuros proyectos similares, se recomienda determinar la densidad y resistencia de la madera usada para la construcción del puente considerando su grado de humedad de equilibrio bajo las condiciones reales de uso. Los resultados con respecto al coeficiente de impacto deben ser complementados y contrastados con los resultados de otros estudios similares.

5. Agradecimientos.

Los autores agradecen la Dirección de Vialidad Región de Aysén y la empresa STRADALE Ingeniería de Proyectos & Asesorías Ltda. por su apoyo durante el desarrollo de este proyecto.

6. Referencias.

- Echaveguren, E. (2003). *Aspectos del diseño de puentes en la Región del Aysén*. Acta del programa de Capacitación Interna, p. 138, Dirección de Vialidad Región de Aysén, Ministerio de Obras Públicas, Coyhaique, Chile.
- Echaveguren, E. (2011). *Pasarela Exploradores, Ruta X-728 km 75, Provincia Aysén*. Planos del proyecto, pp. 1-24, Dirección de Vialidad Región de Aysén, Departamento de Proyecto, Coyhaique, Chile.
- Bachmann, H. et. al. (1991). *Vibrations problems in structures. Practical guidelines*. CEB Bulletin, nº 209, Viena
- INECON – Ingenieros y Economistas Consultores S.A. (2009). *Actualización plan director de infraestructura MOP*. Informe final, Región del Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo, Dirección de Planeamiento, Ministerio de Obras Públicas, Chile.
- JUNG, M.R., MIN, D.J., KIM, M.Y. (2013). *Nonlinear analysis methods based on the unstrained element length for determining initial shaping of suspension bridges under dead loads*. Computers & Structures, Vol. 128, pp. 272-285.
- MOP (2022). *Manual de Carreteras*. Dirección de Vialidad, Dirección General de Obras Públicas, Ministerio de Obras Públicas, Santiago de Chile.
- RILEM - Réunion Internationale des Laboratoires d'Essais et de Recherches sur les Matériaux et les Constructions (1984) *TBS 3 Testing concrete bridges in situ*. RILEM Recommendations for the Testing and Use of Constructions Materials, e-ISBN: 2351580117, E & FN SPON, pp. 386-391.
- SETRA - Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes. (2006) *Footbridges: Assessment of vibrational behaviour of footbridges under pedestrian loading*, Paris.
- SOFiStiK (2013) *ASE – General Static Analysis of Finite Element Structures*. Versión 27.14, Oberschleissheim.