

Ampliación del Puente de Rande. Pruebas dinámicas y de confort.*

*Widening of Rande Bridge. Dynamic and comfort tests.***

Óscar Ramón Ramos Gutiérrez^{*,a}, Juan Peña Lasso^b, Moisés Álvarez Cuesta^a, Álvaro Serrano Corral^c, Ana Fernández Prieto^d, Marcos J. Pantaleón Prieto^a, Miguel Rupérez Astarloa^c

^a Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Universidad de Cantabria.

^b Ingeniero Industrial. WSP Spain

^c Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. MC2 Ingeniería.

^d Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Audasa.

RESUMEN

Durante 2017, el Puente Rande (un puente atirantado de 400 m de longitud construido a finales de los años 70) fue ampliado sin detener el tráfico. La singularidad del diseño de ampliación basado en la colocación de dos carriles adicionales unidos al tablero original y sujetos por tirantes adicionales requiere una comprensión profunda, no solo de la estática, sino del comportamiento dinámico de la estructura. Para este propósito, se realizó una extensa prueba de carga dinámica antes de abrir el puente al tráfico. Este documento describe la prueba de carga dinámica realizada y los resultados obtenidos en términos de propiedades dinámicas, desplazamientos y aceleraciones del tablero y confort de conducción de los pasajeros bajo varias velocidades de paso y configuraciones de vehículos.

ABSTRACT

During 2017, Rande Bridge (a 400 m span cable stayed bridge built during the latest 70's) was widened without stopping the traffic. The singularity and uniqueness of the widening design based on the addition of two extra lanes pinned to the original girder and hold by extra cable stays required a deep understanding of, not only the static, but the dynamic performance of the structure. For that purpose, an extensive dynamic load test was conducted prior to opening the bridge to the traffic. This paper describes the dynamic load test performed and the results obtained in terms of dynamic properties, deck displacements and accelerations and riding comfort of passengers under several passing speeds and vehicle configurations.

PALABRAS CLAVE: Prueba de carga, análisis dinámico, puente atirantado, ampliación, interacción vehículo estructura, confort rodadura.

KEYWORDS: Dynamic tests, dynamic analysis, cable stayed bridge, widening, vehicle-structure interaction, riding comfort.

1. Introducción

El Puente de Rande es el primer puente atirantado de envergadura similar en ser ampliado del mundo. Esto se ha logrado además sin realizar cortes significativos en el tráfico.

La ampliación consiste en dos tableros mixtos adicionales a ambos lados del tablero existente, de losa ortótropa. Los tableros adicionales están conectados al tablero existente mediante jabalcones terminados en rótulas. Adicionalmente la sustentación de los nuevos tableros se consigue mediante un nuevo plano de tirantes por cada tablero. Con esta solución se añade un nuevo carril por cada nuevo tablero.

Esta solución estructural se puede considerar como correspondiente al estado del arte. Este hecho, combinado con la esbeltez, ligereza y flexibilidad del puente, implicaba un reto no superado en el momento de la ejecución; además esta solución implica un panorama desafiante en términos de comportamiento dinámico.

2. Descripción del puente

El puente Rande fue abierto al tráfico en 1981. Es un puente atirantado simétrico con dos vanos laterales de 147,20 metros y un vano principal de 400,14 metros, con un gálibo vertical en marea alta de 45 metros. Los pilonos presentan una configuración de tipo "H" y están arriostrados en la corona y debajo del tablero. El tablero existente está formado por un tablero metálico de losa ortótropa de 23,46 metros de ancho y 2,46 metros de profundidad cubierta por una losa de hormigón de 7 cm de espesor. La losa ortótropa está triangulada por celosías de acero tipo Warren que sirven como diafragmas transversales. El tablero está sujeto por dos planos simétricos de 36 tirantes en configuración de arpa.



Figura 1. Vista inferior de los tableros.

La mejora de la capacidad de la carretera realizada en 2017 consiste en la construcción de un tercer carril en cada dirección de 5 metros de ancho. Para ello, se comprobó la capacidad estructural de los pilonos asegurando la viabilidad de la ampliación sin realizar ningún refuerzo importante de la cimentación. De esta manera, la solución estructural para la ampliación aprovechó al máximo las torres principales existentes. Se construyó un nuevo cabezal de acero sobre la parte superior de cada torre que permite el anclaje de la nueva familia de tirantes que soporta la ampliación. Los nuevos tableros, ubicados a cada lado de la calzada actual, que pasan por el exterior de los pilonos, están formados por vigas cajón mixtas articuladas al tablero actual por medio de celosías de acero transversales llamadas jabalcones. El propósito de esta conexión rotulada es reducir las fuerzas de interacción entre los tableros antiguos y nuevos. Por lo tanto, solo se tuvieron que realizar operaciones menores de mantenimiento y refuerzo en el tablero existente. [1].

3. Descripción de la prueba de carga dinámica

Con el fin de verificar la respuesta dinámica del puente y el confort de los conductores en el tablero de ampliación, garantizando su funcionalidad completa, se realizó una prueba de carga dinámica con vehículos pesados y livianos al final de la fase de construcción y antes de la puesta en servicio. Esta prueba de carga dinámica se diseñó específicamente teniendo en cuenta el esquema isostático estructural de la nueva solución, que permite la rotación transversal (efecto balancín, fig.2) de los tableros de ampliación alrededor de las rótulas.

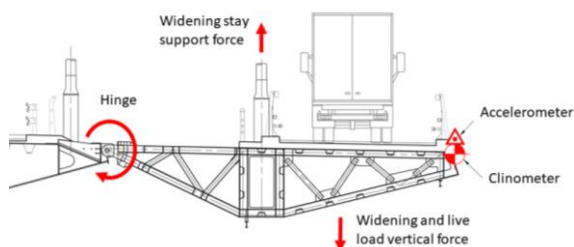


Figura 2. Balancín.

Es reseñable que este tipo de prueba no es obligatoria de acuerdo con los principales códigos de diseño, a nivel nacional e internacional [2], [3], [4], incluso para este tipo de puentes, donde los aspectos dinámicos podrían ser de gran importancia. La práctica general con respecto a las pruebas de carga dinámica, cuando es necesario, incluye el paso de un solo camión a diferentes velocidades o el uso de un tablón Rilem para excitar y extraer las frecuencias naturales de la estructura y los valores de amortiguamiento asociados [5].

En este caso particular, la prueba de carga realizada va más allá de la práctica general. Se definieron diferentes escenarios de vehículos (tablas 1 y 2) para investigar los modos de vibración natural del tablero y las relaciones de amortiguación asociadas, el factor de impacto y el confort de conducción. Se obtuvieron las frecuencias naturales y valores de amortiguamiento del puente ampliado para verificar la correspondencia de la solución

construida y los modelos teóricos utilizados antes y durante las etapas de construcción. Se obtuvo el factor de impacto para evaluar la importancia ponderada de la respuesta dinámica cuando un vehículo pesado atraviesa los carriles de ampliación. Finalmente, se evaluó el confort en la conducción para corroborar los estudios teóricos sobre este aspecto y para confirmar experimentalmente la funcionalidad de la solución construida.



Figura 3. Tablón Rilem.

Los escenarios 1 a 4 están destinados a excitar diferentes formas modales del puente por el impacto generado cuando los 4 ejes del camión de 36000 kg atraviesan el tablón Rilem normalizado colocado en diferentes posiciones longitudinales del tablero de ampliación. El escenario 5 consiste en el paso del camión a diferentes velocidades para estudiar su influencia en la respuesta de la estructura. Además, un tren de carga instrumentado formado por dos camiones similares seguidos por un vehículo liviano o una motocicleta, que atraviesa el puente a diferentes velocidades, se ha utilizado para estudiar el confort de conducción (escenarios 6 a 9). El espacio entre vehículos se fijó como 21,2 m, coincidiendo con el espacio entre anclajes de tirantes, para que los conductores pudieran tomarlo como referencia (figura 4). En este último escenario, se eligieron diferentes velocidades para hacer que los vehículos pasasen por la misma posición longitudinal en un intervalo de tiempo específico, con la intención de excitar el puente en las primeras frecuencias naturales.

La prueba de carga dinámica se realizó sobre el tablero de ampliación, lado Este, durante la noche, para minimizar la afección al tráfico.

Tabla 1. Hipótesis con tablón Rilem.

Hipót.	Carga	V (km/h)	Posición Rilem
1	1 camión	30	C.d.V. Lat.
2	1 camión	30	Pilón
3	1 camión	30	Cuarto d.V. Princ.
4	1 camión	30	C.d.V. Princ.

Con el fin de afectar lo menos posible a los resultados de la prueba, el tráfico en el tablero original se limitó a solo dos carriles, y la

velocidad máxima permitida fue de 60 km/h. Estos carriles se ubicaron lo más lejos posible del carril siendo excitado, para minimizar la afección a los resultados.

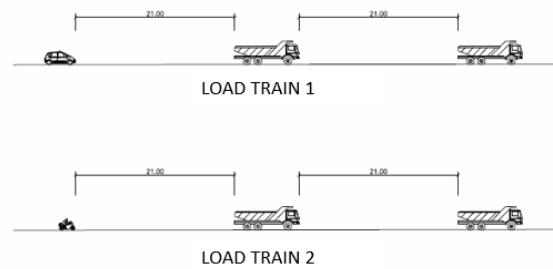


Figura 4. Trenes de carga.

Tabla 2. Escenarios de interacción vehículo-estructura.

Escenario.	Carga	V (km/h)	Distancia (m)	Objetivo
5	1 camión	10, 30, 50, 60, 70	-	Interacción vehículo-estructura
6'	2 camiones + vehículo ligero	32	21.2	Modo transversal 1
6	2 camiones + vehículo ligero	40	21.2	Modo vertical 1
7	2 camiones + vehículo ligero	48	21.2	Modo de torsión 1
8	2 camiones + vehículo ligero	70	21.2	Modo balancín
9	2 camiones + motocicleta	70	21.2	Modo balancín

4. Monitorización

Diecinueve dispositivos de medición, incluidos acelerómetros capacitivos e inclinómetros se utilizaron en el puente y en los vehículos. El sistema de monitoreo fue instalado y operado por Kinesia Ingeniería. Las aceleraciones y rotaciones se midieron a una frecuencia de muestreo de 200 Hz durante intervalos de tiempo de al menos 4 minutos en diferentes condiciones de carga. Los acelerómetros se colocaron cerca del pavimento en las posiciones que se muestran (figuras 5 y 6).

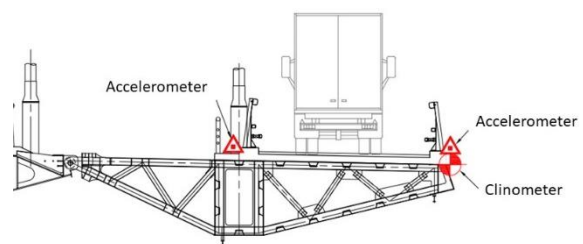


Figura 5. Instrumentación de la sección.

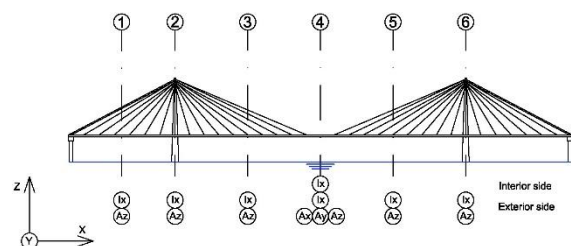


Figura 6. Posición long. de instrumentación.

Las posiciones longitudinales más obvias correspondientes a las primeras formas modales esperadas fueron elegidas para ser medidas. Secciones en el centro del vano lateral, pila, cuarto del vano principal y centro del vano principal. El vano lateral norte no se pudo medir debido a aspectos logísticos. La presencia de acelerómetros e inclinómetros en cada posición se debe al esquema estructural isostático mencionado anteriormente que provoca movimientos de rotación y traslación vertical acoplados en el tablero de ampliación.



Figura 7. Aparatos de medición.

5. Resultados

En esta sección, se analizan y discuten los resultados en términos de propiedades dinámicas de la estructura (frecuencias de vibración naturales y factores de amortiguamiento), factor de impacto dinámico, valores de aceleración del tablero y confort en el vehículo.

5.1 Propiedades dinámicas de la estructura

Se utilizaron tres técnicas de identificación diferentes para determinar las propiedades dinámicas de la estructura: Peak picking, Densidad media normalizada de potencia espectral (ANPSD) y la descomposición en el dominio de la frecuencia (FDD).

La tabla 2 presenta las propiedades dinámicas del puente obtenidas mediante la aplicación de las técnicas antes mencionadas y

una comparación con el modelo FE del puente. Este modelo numérico se creó en ABAQUS utilizando elementos de viga para la estructura existente y elementos de lámina para los tableros de ampliación con el fin de reducir el costo computacional al tiempo que aumenta la precisión local. En general, los valores experimentales coinciden con los predichos.

También se proporciona una estimación experimental de la amortiguación. Se calcula aplicando el procedimiento de disminución logarítmica a la señal filtrada alrededor de cada frecuencia natural de la estructura, en diferentes ubicaciones. Los valores de amortiguación se obtuvieron promediando los resultados de diferentes condiciones de carga (escenarios con tablón Rilem y escenarios con varios camiones).

Los valores de amortiguación obtenidos están en correspondencia con los incluidos en la literatura, siendo estos valores entre 0.5 y 2 %. [3], [6].

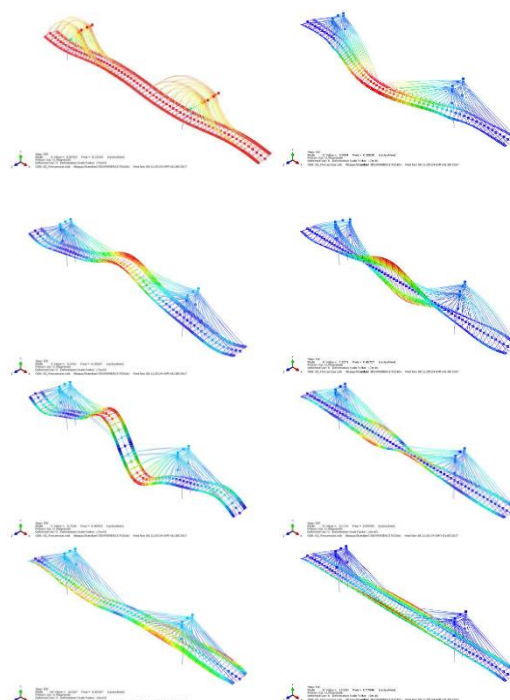


Figura 8. Formas modales.

Con respecto a las formas modales (figura 8), se identificaron experimentalmente al menos tres formas modales con buenos resultados: modo transversal 1, modo vertical 1 y modo de torsión

1. Esto ha sido posible a pesar de que el tamaño de ventana era menor que los valores propuestos por la literatura [7] (1000 a 2000 veces el período del primer modo de medir). La razón de esto es

que la aplicación de estas técnicas no estaba planeada originariamente.

Tabla 3. Parámetros dinámicos.

Frec. (Hz)	Modelo numérico	Ambiental	Ambiental	Ambiental	Forzada	Libre	Forma modal
	FEM	PP	ANPSD	FDD	PP	Amortiguamiento	
1	0.12	0.12	-	-	-	-	Longitudinal
2	0.28	0.28	-	-	0.28	-	Transversal
3	0.36	0.34	0.34	0.34	0.34	1.53	Vertical 1
4	0.44	0.4	0.41	0.41	0.42	1.47	Torsión 1
5	0.47	0.43	0.43	0.47	0.47	1.21	Vertical 2
8	0.63	0.6	0.61	0.61	0.6	1.27	Torsion 2
7	0.69	0.69	0.68	0.68	0.67	0.7	Transverse 2
8	0.57	0.6	0.61	0.59	0.61	1.11	Balancín

5.2 Factor de impacto

Con respecto a la evaluación del factor de impacto, la rotación transversal se toma como la variable a analizar. El enfoque clásico hubiera sido estudiar el factor de impacto de la estructura global al considerar la desviación vertical. Sin embargo, como se indicó anteriormente, el aspecto de mayor importancia en la tipología de la estructura es la flexibilidad transversal introducida por la conexión rotulada con el tablero existente.

El factor de impacto dinámico local obtenido mediante la rotación transversal se define de acuerdo con [8]:

$$I(x) = \frac{\max[R_d(x, t)] - R_e(x)}{R_e(x)} 100(\%)$$

La referencia estática para calcular el factor de impacto se obtiene del historial de tiempo de cada inclinómetro filtrado con un filtro paso bajo a una frecuencia inferior al primer modo de vibración de la estructura y promediado entre diferentes velocidades del vehículo.

Los resultados mostraron que no hay una tendencia clara de amplificación en la rotación transversal con el aumento de la velocidad y los valores de rotación transversal se mantienen dentro de los límites admisibles de alrededor de 2,2 mrad en el vano central (fig. 9). Parece claro que hay un error de medida en los datos de la velocidad de paso de 30 km/h, ya que la desviación no es máxima en el vano central.

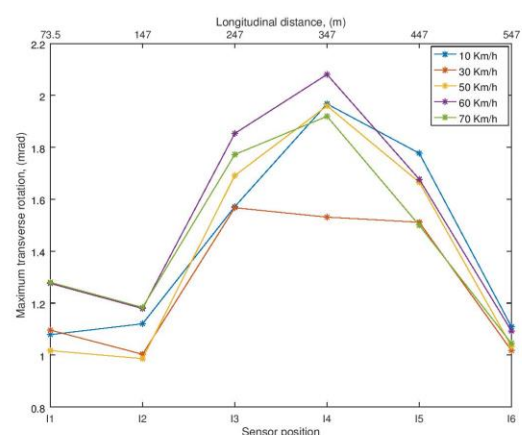


Figura 9. Máxima rotación transversal. Un camión.

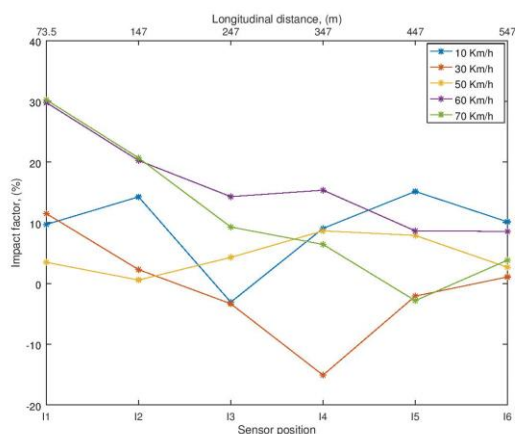


Figura 10. Factor de impacto de rotación (%).

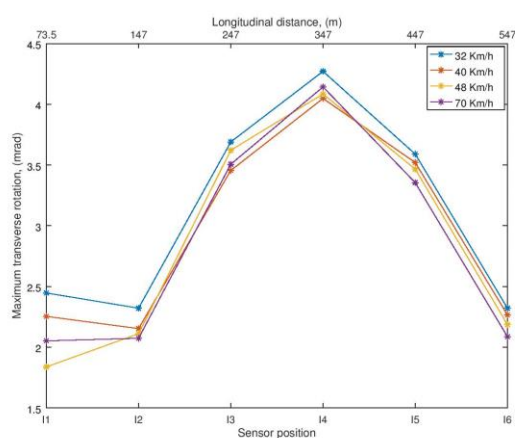


Figura 11. Máxima rotación transversal. Tren de carga 1.

Se ha realizado un análisis similar considerando que el convoy TC1 (dos camiones seguidos por un vehículo) circula a velocidades crecientes de 32, 40, 48 y 70 km/h. La dependencia del valor de la rotación transversal con la velocidad y la posición del sensor se muestra en la figura 11. El análisis muestra que la dependencia de la rotación con respecto a la velocidad es insignificante y la pequeña fluctuación en el valor máximo de rotación puede estar relacionada con la variación de la distancia real entre los vehículos que forman el convoy TC1 y/o las tolerancias de medición. Además, se puede observar que la rotación máxima se produce en el vano central, siendo el valor de alrededor de 4,4 mrad, asegurando buenas condiciones de servicio.

5.3 Aceleración del tablero

Las aceleraciones en el tablero de ampliación se midieron para verificar que se mantengan bajo ciertos límites. Estas medidas se vieron ligeramente afectadas por el tráfico en el puente existente y la acción del viento. No obstante, la velocidad del viento se midió durante toda la fase de construcción, siendo muy baja en el momento de la prueba dinámica. Por lo tanto, las mediciones están cerca de lo que se espera durante la vida útil del carril de ampliación.

Teniendo en cuenta que los valores de aceleración pueden mostrar algunos valores picos debido a perturbaciones puntuales, los resultados se muestran en términos de la aceleración cuadrática media, cuyo cuadrado es proporcional a la energía contenida en el historial de tiempo. Los cuantiles del 95 % y del 99 % representan valores con una probabilidad de excedencia de 5 % y 1 % de los valores de aceleración.

Un detalle importante a tener en cuenta es que se cortó la respuesta de aceleración completa para estudiar la fase de vibración forzada (camión que atraviesa el puente) minimizando los efectos relativos de las vibraciones ambientales.

Con el fin de verificar la influencia del valor de la velocidad en la respuesta de aceleración de la estructura, se analizaron los resultados del escenario 5 (camión que atraviesa el puente a diferentes velocidades) y los escenarios 6-8 (convoy TC1 a diferentes velocidades). Los datos revelaron que un aumento en la velocidad del camión aumenta la respuesta de aceleración del tablero.

En general los resultados mostraron que las aceleraciones están por debajo de 20 mg, por lo que están claramente en el rango de confort (<50 mg) según IAP-11. A diferencia de lo que sucedió al analizar la rotación transversal, se puede ver claramente una relación proporcional entre la velocidad y la aceleración del vehículo que se evidencia en las figuras 12 y 13. El hecho

de tener una relación casi lineal de acuerdo con [9] y [8].

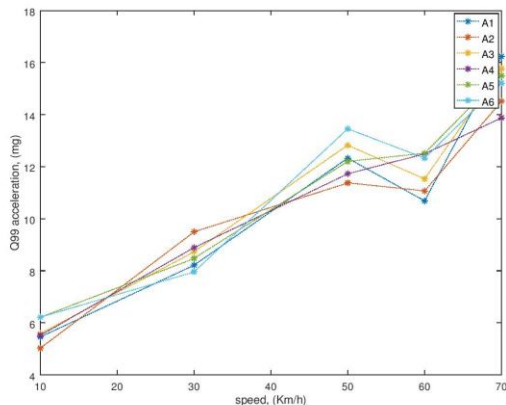


Figura 12. Aceleración, 1 camión. Q99.

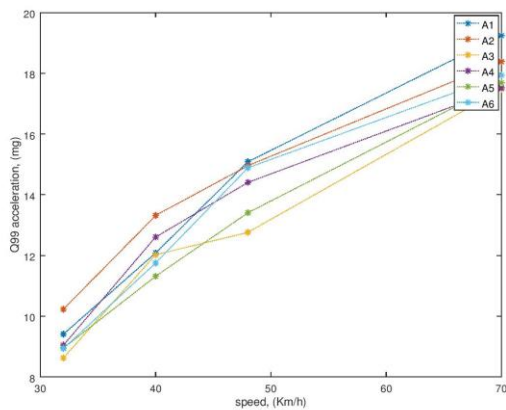


Figura 13. Aceleración, TC 1. Q99.

5.4 Comfort

Para evaluar el confort de los pasajeros, se midieron las aceleraciones no solo en el tablero sino también en los vehículos. La idea principal era evaluar la tasa de confort de los pasajeros al atravesar el puente de manera cualitativa. Los valores de aceleración de confort dependen de muchos factores, como el tiempo total de viaje, las actividades que realizan los pasajeros mientras viajan y los factores ambientales. Por lo tanto, el alcance del análisis en este documento está limitado para obtener un indicador aproximado del confort durante la conducción.

Se atendió a dos códigos, la IAP-11 y la ISO-2631. El primer código define los criterios

funcionales relativos a las vibraciones en puentes peatonales y áreas peatonales en términos de valores absolutos, que de todos modos se tomaron como referencia. El segundo rango de aplicabilidad del código es más amplio y no se limita a las áreas peatonales.

La norma ISO-2631, al estudiar los efectos de la aceleración de todo el cuerpo, diferencia entre el confort, la percepción y el mareo, y la salud. Aquí solo el confort y la percepción son aplicables. Los límites de aceleración de confort se definen de manera general en función de un parámetro de aceleración RMS de referencia obtenido después de ponderar la señal de aceleración original en el dominio de la frecuencia.

Los resultados que se muestran en la tabla 4. corresponden a las diferentes configuraciones del tren de carga, dos camiones seguidos de un automóvil o una motocicleta y una motocicleta en solitario, las medidas se realizan dentro del vehículo marcado con un asterisco. El análisis de aceleración de sólido rígido realizado en los camiones y en los vehículos confirma claramente que el confort está garantizado ya que los valores de aceleración están dentro de los límites admisibles (<50 mg). Además, el indicador de confort de aceleración de los vehículos de 4 ruedas que atraviesan el puente existente tiene el mismo orden de magnitud que los niveles de aceleración en segmentos adyacentes de la carretera, lo que significa que no se perturban los valores de confort general al cruzar el puente. Con referencia a la motocicleta, la aceleración de referencia está claramente en el rango incómodo. Incluso detenido al ralentí, los valores de aceleración medidos son bastante altos y se magnifican cuando la moto está en movimiento. A 48 km/h, los resultados mostraron que los valores de aceleración están en una zona incómoda, y no se aprecia una diferencia clara cuando la moto cruza el puente. A 70 km/h, los valores de aceleración son más altos y se deben a la alta vibración del motor cuando se alcanza la velocidad máxima de la moto.

Tabla 4. Valores de confort.

V(km/h)	Tren de carga	Vano sur	Vano central
32	2 Cam*, y coche	25	31
40	2 Cam*, y coche	33	40
48	2 Cam*, y coche	39	47
70	2 Cam*, y coche	53	56
32	2 Cam. y coche*	36	42
40	2 Cam. y coche*	37	51
48	2 Cam. y coche*	36	40
70	2 Cam. y coche*	41	43
0	Moto* parada	50	50
48	Sólo moto*	97	98
70	2 Cam. Y moto*	97	210

6. Conclusiones

Se ha llevado a cabo la primera ampliación de un puente atirantado sin afecciones significativas al tráfico existente. Debido al esquema estructural particular, se ha llevado a cabo una prueba de carga dinámica extensa e innovadora. Esta prueba de carga dinámica se ha realizado en tres etapas siguiendo tres objetivos distintivos: obtener las propiedades dinámicas de la estructura, evaluar el factor de impacto y verificar las condiciones de confort bajo tráfico pesado. Para ese propósito, los vehículos pesados y livianos se han utilizado por separado y en conjunto. Las conclusiones derivadas de los resultados obtenidos se pueden agrupar en tres secciones: propiedades dinámicas del puente, respuesta dinámica del puente o factor de impacto y confort de conducción de los vehículos.

En cuanto a las propiedades del puente dinámico, las formas modales de vibración más importantes son la torsión y la flexión vertical del tablero. La contribución del modo balancín a la respuesta dinámica es, en general, de mucha menor importancia. Los modos principales están por debajo de 1 Hz y las relaciones de amortiguamiento modal son de alrededor del 1

%, que es ligeramente superior a la estimación inicial basada en la tipología de la estructura. Los efectos resonantes no están presentes dado que la frecuencia de la carga dinámica inducida por los vehículos que pasan a las velocidades habituales está lejos de la de los modos naturales de la estructura.

Con referencia a la respuesta dinámica, los factores de impacto de rotación transversal obtenidos para diferentes posiciones bajo diferentes escenarios de carga son menores al 20 %. La flexibilidad transversal de la estructura no afecta al comportamiento del puente. Con respecto a la aceleración de la estructura medida, se observó una clara relación cuasi lineal entre la respuesta de aceleración máxima del puente y la velocidad de circulación. La aceleración vertical medida en la estructura está dentro de los valores admisibles por debajo de 20 mg.

Con respecto al análisis de confort de conducción, las mediciones de aceleración en los vehículos durante la prueba de carga permitieron la aplicación de la metodología propuesta por la ISO 2631. El análisis de aceleración de todo el cuerpo se llevó a cabo combinando las aceleraciones direccionales ponderadas en frecuencia medidas en los vehículos a diferentes velocidades de paso. y obteniendo un indicador de confort. Los resultados muestran que el indicador de confort de aceleración es aceptable en camiones y automóviles, siempre por debajo de 55.7 mg ($0.55 \text{ } \$/ \text{ m/s}^2 \text{ } \$$). Sin embargo, los valores más altos que se midieron en la moto están justificados ya que su rango de confort es mucho más bajo que el de los vehículos de cuatro ruedas y las vibraciones del motor se transmiten directamente a los pasajeros.

Los resultados extraídos del análisis de prueba de carga dinámica confirman que la flexibilidad transversal de la estructura no compromete la solución de ampliación. Los factores de impacto de la rotación transversal local medidos y los registros de aceleración del puente no comprometen el comportamiento estructural de la solución de ampliación.

Además, la prueba de carga dinámica de confort realizada en los carriles de ampliación confirmó que no se espera que ocurran efectos adversos de incomodidad en los pasajeros que crucen el puente.

La ampliación ha sido llevada a cabo por AUDASA, como Concesionaria de la Autovía. La construcción corrió a cargo de DRAGADOS y Grupo Puentes, bajo proyecto original de MC2. La asistencia técnica durante la construcción por MC2 y WSP Spain.

El control estático y dinámico fue realizado por Kinesia Ingeniería. El diseño y análisis de la prueba de carga dinámica han sido realizados por WSP Spain.

Referencias

- [1] Martínez Calzón, Juliá Villardell, Serrano Corral, Gómez Navarro. Widening of the Cable-Stayed Bridge over the Rande Strait, Spain. *Structural Engineering International*. 18 (4) (2008) 314–317.
- [2] LRFD bridge design specifications, Standard, American association of state highway and transportation officials, Washington, D.C (2018)
- [3] Eurocódigo. Actions on structures. traffic loads on bridges. (2004)
- [4] Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera. Ministerio de Fomento, España (2011)
- [5] Recomendaciones para la realización de pruebas de carga de recepción de puentes de carretera. Ministerio de Fomento, España (1999).
- [6] Norma de construcción sismorresistente: Puentes, Ministerio de Fomento, Spain (2008).
- [7] A. Felber, R. Cantieni, Advances in ambient vibration testing: Ganter bridge, switzerland, *Structural Engineering International* 6 (3) (1996) 187–190.
- [8] Y.-B. Yang, J. Yau, Z. Yao, Y. Wu, *Vehicle-bridge interaction dynamics: with applications to high-speed railways*, World Scientific, 2004.
- [9] L. Fryba, *Vibration of solids and structures under moving loads*, Vol. 1, Springer Science & Business Media, 2013.