

# Monitorización de la Ampliación del Puente de Rande

## *Structural Health Monitoring of the Rande Bridge Widening\**

Jon Ruiz de Azua Ruiz<sup>\*, a</sup>, Vicente Puchol de Celis<sup>b</sup>, Raúl Husillos Rodríguez<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, Kinesia Structural Monitoring, Director Técnico, jruizdeazua@kinesia.net

<sup>b</sup>Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, Kinesia Ingeniería, Gerente, vpuchol@kinesia.es

<sup>c</sup>Dr. Ingeniero de Minas, Kinesia Structural Monitoring, Director de Operaciones, rhusillos@kinesia.net

### RESUMEN

La ampliación del Puente de Rande ha contado con un sistema integral de monitorización instalado, gestionado y mantenido por Kinesia. Con el objetivo de controlar el proceso constructivo se han instrumentado y monitorizado los parámetros más relevantes del puente existente, la nueva ampliación y estructuras auxiliares de construcción. La gestión de datos ha permitido fusionar las dos tipologías (estáticos y dinámicos) y la topografía externa a través de la plataforma empleada.

### ABSTRACT

The widening of the Rande Bridge has been thoroughly followed by a Structural Health Monitoring system provided and maintained by Kinesia. With the aim of closely monitoring the bridge during the construction stages, the pre-existing cable stayed structure, the new additional and the temporary structures have been closely monitored. Dynamic and static data flows have been bundled together as well as external topography data for the successful monitoring and analysis of the evolving structure.

**PALABRAS CLAVE:** Auscultación, Instrumentación, Monitorización, Tirantes, Espectros

**KEYWORDS:** Auscultation, Instrumentation, Monitoring, Cables, Spectra

## 1. Introducción

El Puente de Rande, ubicado en la ría de Vigo entre las localidades de Redondela y Moaña cruza la ría en su zona más estrecha formando parte de la Autopista del Atlántico. Inaugurado en 1981 proyecto de los ingenieros Florencio del Pozo, Fabrizio de Miranda y Alfredo Passaro. Cuenta con un tramo atirantado de 705 m y un vano central de 400 m entre pilonos. Las pilas de hormigón sustentan un tablero metálico mediante 80 tirantes.

Debido a las condiciones de tráfico existentes en el puente se ha ampliado su configuración inicial de dos carriles por sentido añadiendo un carril lateral adicional por sentido.

La ampliación consta de dos tableros anexionados por cada lado al puente, unidos al mismo mediante rótulas y sustentados por un nuevo juego de tirantes anclados a un cabecero metálico añadido. En el año 2016 comenzaron los trabajos de ampliación en los que Kinesia ha participado monitorizando tanto la estructura existente como la ampliación.

Para un correcto control del comportamiento estructural Kinesia ha instalado y mantenido una instrumentación con el objetivo de medir tensiones, movimientos, giros, aceleraciones, temperaturas, fuerzas y viento. La disposición de sensores ha abarcado todos los

principales elementos portantes de la estructura (Figura 1) y ha sido medida por un sistema de adquisición modular repartido por el puente, registrando tanto de manera estática como dinámica.

## 2. Instrumentación

La función del sistema instalado ha sido generar una base de datos de 600 canales, controlando tanto la estructura existente como la nueva en fase de construcción y también las estructuras auxiliares necesarias. A medida que el puente crecía, la base ha contado con más canales activos, llegando a ser medidos 500 de manera simultánea. La adquisición de datos comenzó con los primeros sensores en septiembre de 2016 y ha concluido a los 26 meses, a finales de 2018.

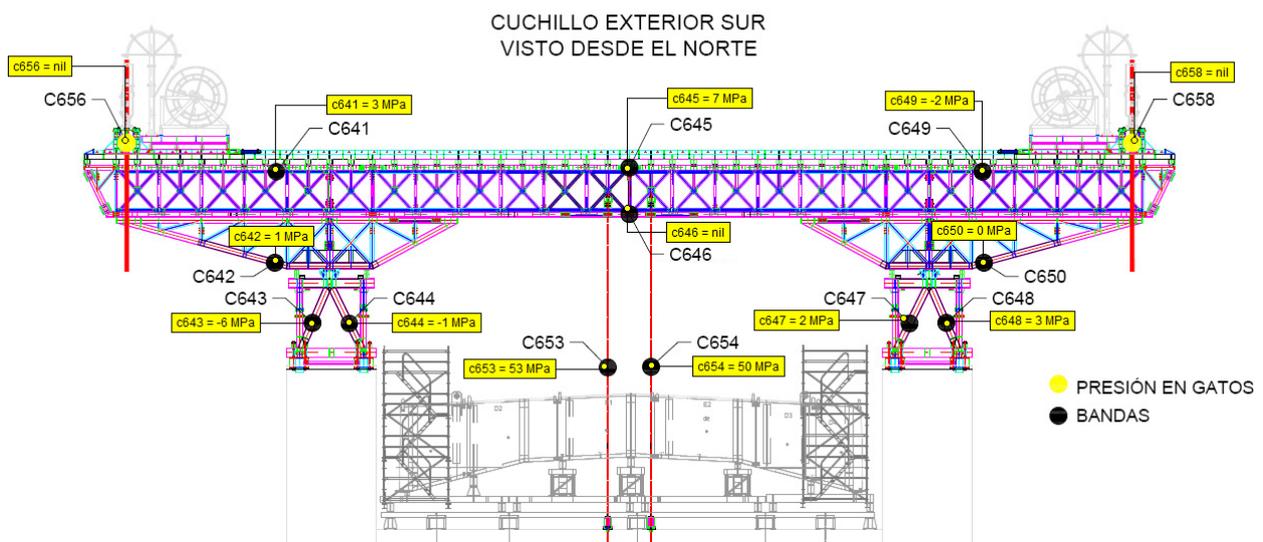
### 2.1 Distribución de sensores

Para la monitorización del puente existente, previo a la ampliación, se han controlado las cuatro pilas que conforman la estructura atirantada, las pilas laterales y pilonos centrales. En cada fuste se han colocado

clinómetros longitudinales (Figura 2) en coronación para conocer el giro y extensómetros en la base para las tensiones. El tablero, tanto el central como los dos laterales de ampliación se ha instrumentado con numerosos extensómetros en dirección longitudinal y transversal, midiéndose también la apertura de la junta de dilatación.

Las fuerzas en los tirantes de ampliación se han medido mediante células de carga monotorón. Debido a la complejidad de actuar sobre los tirantes existentes se decidió instrumentar de manera no invasiva cada chapa de anclaje bajo el tablero con 3 extensómetros. Posteriormente se amplió el control de fuerzas instrumentando 12 tirantes permanentemente con acelerómetros para conocer su fuerza mediante la analogía de cuerda vibrante. La información del estado tensional del resto de los tirantes existentes se ha ampliado con varias campañas de auscultación de tirantes en distintas fases de la obra. El esquema de fuerzas configurado por los tirantes se ha completado con extensómetros en los péndulos de retenida que unen el tablero con las pilas laterales.

## PÓRTICO IZADO SUR





Las estructuras auxiliares que han hecho posible la ampliación también se han instrumentado con numerosos sensores. Así se ha hecho, por ejemplo, en los pórticos de izado ubicados en coronación de pilonos y en los cuatro carros de izado de dovelas. Los extensómetros en los perfiles y barras han permitido conocer el estado tensional, completándose con sensores de presión para medir el circuito conectado a los gatos de izado. Para las maniobras de cierre de tablero se han dispuesto dos distanciómetros láser que han medido la distancia entre ambos extremos a unir con la dovela de cierre.

**Tabla 1. Enumeración de sensores instalados.**

Sensores	
Clinómetros	8
Extensómetros	388
Sondas temperatura	10
Células de carga	40
Anemómetro-veleta	2
Sensores de presión	8
Distanciómetros	5
Acelerómetros	32

## 2.2 Adquisición de datos

La totalidad de sensores descrita ha sido gobernada por un sistema de adquisición de

datos (SAD) que de manera flexible se ha adecuado a los condicionantes del puente. Tanto a la configuración de sensores y requisitos de medida, como a su distribución y ubicación a lo largo de los 700 m de puente con tres tableros separados.

A pesar de la división de los trabajos de ampliación en las distintas pilas de manera independiente, se trata de una estructura conjunta al estar unidos por el puente existente. El SAD se ha dividido en varios subsistemas en las zonas de concentración de sensores, teniendo un total de 4 centros de adquisición. Cada pilono ha tenido dos, uno en coronación y otro en el interior de la viga riostra bajo el tablero. La frecuencia de medida ha sido de una lectura completa a los sensores cada 5 minutos, reuniéndose todos los valores en la misma base de datos.

Tras 6 meses de monitorización, en abril de 2017 se añadieron acelerómetros en tablero y tirantes, que junto con los anemómetro-veleta han registrado datos en dinámico. Con una velocidad de 100 lecturas por segundo, se sumaron 30 canales dinámicos al conjunto adquirente. Se automatizó el disparo por eventos para situaciones de elevada vibración ( $> 50 \text{ mg}$ ) o viento ( $> 50 \text{ km/h}$ ) y también se facilitaron los datos de vientos máximos y medios diezminutales.

## 3. Monitorización

Como segundo paso de los datos generados por el conjunto sensor-adquirente, se encuentra la transmisión, distribución y publicación en tiempo real de la información generada. Tras cada registro parcial de los sub-sistemas adquirentes del puente, el dato se ha transmitido con conexión 4G al servidor central ubicado en Madrid. Una vez recibido, se ha añadido al resto de datos existentes realizando un backup de seguridad. Es entonces cuando el dato queda disponible vía web para consulta y es distribuido a los técnicos que utilizando la

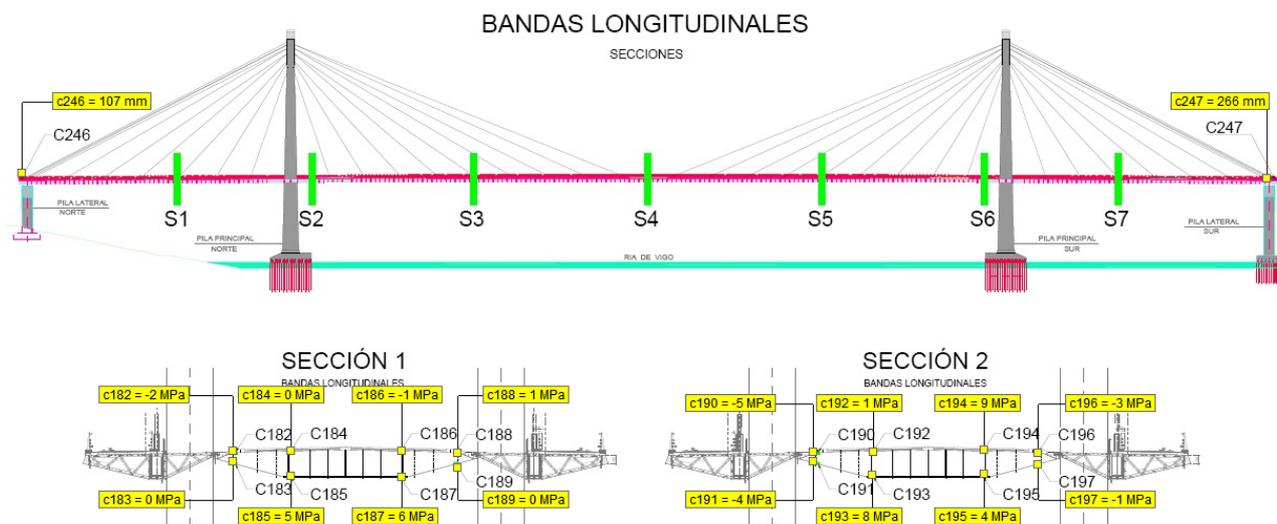


Figura 3. Infograma de secciones instrumentadas con extensómetros longitudinales en tablero central

plataforma (Figura 3) han seguido el proceso constructivo. La transmisión y gestión de datos se ha dado en tiempo real, recibándose los valores segundos más tarde de su medida.

La monitorización ha incluido también los datos del sistema de topografía robotizada instalada por UTE Rande. Los prismas han sido medidos de manera automática (cada barrido duraba aproximadamente 15 minutos) por lo que en colaboración con el Servicio de Topografía de la UTE se han transmitido a Kinesia tras cada medida. La monitorización ha ido integrando los datos de topografía medidos aprovechando la plataforma para el análisis conjunto con la instrumentación o visualización vía web.

El conjunto sensor-adquisidor estático del puente ha generado 300 millones de datos estáticos y 2000 millones de datos dinámicos en 4000 ficheros de eventos. A su vez la plataforma ha gestionado conjuntamente 18 millones de datos provenientes del control topográfico.

#### 4. Análisis de resultados

Uno de los principales requisitos del proyecto de monitorización ha sido el seguimiento diario de los datos. Tanto su

bondad en el correcto funcionamiento de sensores y adquirentes como el análisis preliminar de las variables medidas, comprobando la concordancia con la evolución de la estructura. La recepción y análisis de los datos se ha realizado con el software Merlin desarrollado por Kinesia Ingeniería.

Entre las tareas destacan en análisis gráfico de los registros históricos, estadístico mediante histogramas y percentiles, resolución de rosetas extensométricas (círculo de Mohr) incluyendo el cálculo de tensiones principales y el análisis numérico declarando variables personalizadas. Éstas han permitido operar con valores derivados de los sensores (gradientes, medias, envolventes) como si de un dato medido más se tratara. Los datos dinámicos de vibración han sido sometidos a un análisis espectral para la obtención de resultados en el dominio de la frecuencia, especialmente con aceleraciones de tirantes y tablero.

A continuación, se muestran algunos de los resultados relevantes obtenidos mediante la monitorización y su análisis.



Figura 4. Ensayo de calibración, instante de auscultación dinámica de tirante cargado.

#### 4.1 Monitorización de tirantes existentes

Uno de los elementos en los que se ha centrado la instrumentación del Puente de Rande han sido los tirantes que sustentan el tablero central del puente. Los originales desde su inauguración, se encuentran inyectados en el interior de la vaina para protección. Se han realizado tres campañas de auscultación en las que se han medido de manera puntual en las fases previa, durante y final de la obra. Debido al avance de los tableros de ampliación y su incidencia sobre las cargas, ha sido prioritario registrar de manera continua. Al estar los tirantes inyectados y en carga, la inconveniencia de actuar sobre ellos para colocar células de carga, o extensómetros ha obligado a buscar soluciones alternativas. Se ideó un método no invasivo mediante el que se pretendía obtener la carga de manera indirecta sin necesidad de replicar ensayos continuamente.

##### 4.1.1. Instrumentación con extensómetros en anclajes

La solución propuesta fue instrumentar 3 de las 4 chapas que conforman cada anclaje al tablero y que sobresalen por el inferior. El objetivo fue registrar las tensiones en el anclaje para así poder correlacionarlo con la carga del tirante. Con esta metodología se pretendía recrear una “célula de carga” virtual empleando los elementos que conforman el tirante. El siguiente paso lógico fue calibrar dicha “célula”,

obteniendo el factor que relaciona la tensión en cada cara del anclaje y la variación de fuerza en el tirante.

La obtención de la constante de paso requirió un ensayo (Figuras 4 y 5) en el que introducir la carga en el tirante. La noche del 25 de octubre de 2016, se llevó a cabo dicha prueba, solicitando los tirantes con 4 camiones de 38 toneladas. El procedimiento de calibración consistió en auscultar mediante un acelerómetro el tirante sin carga alguna [1] y registrar simultáneamente las tensiones del anclaje. Acto seguido se posicionaron los camiones en las inmediaciones del tirante y se repitieron las medidas.

Si bien el ensayo fue satisfactorio y los resultados evolucionaron según lo esperado (aumento de la frecuencia y disminución de tensiones en el anclaje al solicitar), los valores registrados fueron de poca entidad. Los tirantes se cargaron del orden de 400 kN y las chapas del anclaje unos pocos MPa, siendo 8 MPa la mayor compresión. Tras el análisis de los resultados, se decidió priorizar la auscultación dinámica con acelerómetros como método para conocer la fuerza, sacrificando número de tirantes a controlar.

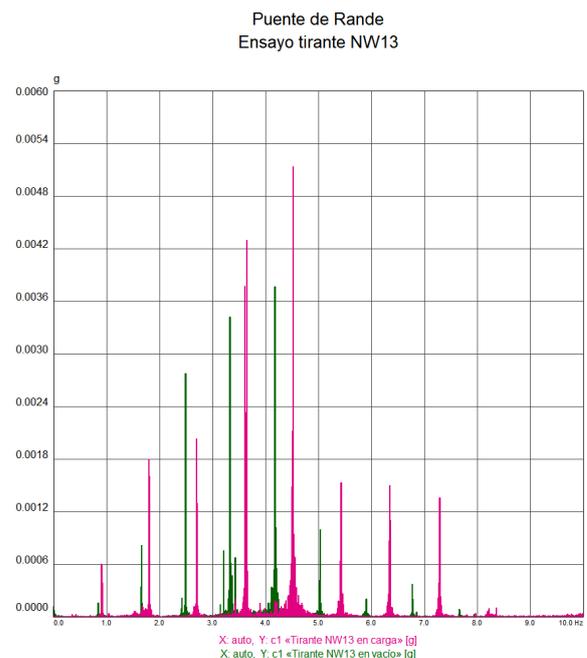


Figura 5. Espectro de magnitudes de tirante solicitado (magenta) y en vacío (verde).

#### 4.1.2. Instrumentación de tirantes con acelerómetros

Los datos de deformación en anclaje de tirantes se han completado con un sistema dinámico que ha medido 12 tirantes con acelerómetros, 2 por tirante. Dispuestos en los dos ejes transversales al plano definido por el tirante, han podido registrar acelerogramas nítidos y válidos. Mediante análisis se ha obtenido la frecuencia fundamental, independientemente del plano de vibración del tirante. La metodología empleada ha consistido en disparar el sistema diariamente en periodo nocturno y a la misma hora para minimizar efectos térmicos y mostrar el valor de la frecuencia en la base de datos. En constante comunicación con los técnicos en obra, se han programado los disparos ajustándose a las necesidades y maniobras en curso. El resultado del proceso ha sido la obtención del histórico de fuerzas de los tirantes centrales con gran precisión sin ninguna actuación invasiva sobre los mismos.

#### 4.1.3. Variaciones de carga en tirantes

El proceso de obtención de la fuerza mediante datos dinámicos se ha mantenido durante 10 meses, interrumpiéndose una vez completados los tableros laterales y estabilizadas las cargas de los tirantes. Esto ha permitido que en 12 tirantes se cuente con datos de ambos métodos, el inicialmente previsto con extensometría y el dinámico. Una representación conjunta de la tensión en el anclaje (cambiada de signo) y la carga del tirante obtenida con acelerómetros refleja la clara correlación entre ambas historias, Figura 6.

A diferencia del ensayo de pesaje previo, la colocación de dovelas ha supuesto unas variaciones de carga en tirantes muy superiores, reflejadas también en las medidas de deformación del anclaje. A su vez, los datos para calibrar la “célula de carga” virtual son 10 meses continuos y no únicamente 2 estados de carga. Tal y como se muestra en la Figura 6, aproximadamente la carga disminuyó 1800 kN

mientras que la deformación en anclaje creció 36 MPa. La traza representa la fuerza del tirante que tiene un coeficiente de determinación de 0.96 con la tensión y arroja una constante de “calibración” aproximada de -50 kN/MPa. Es decir, al aumentar el tirante su carga en 50 kN, el anclaje se comprime 1 MPa.

La estrecha relación de ambos resultados y verificación con los datos teóricos validan los dos métodos indirectos de medida de la fuerza. No obstante, resulta problemático obtener la relación que guardan ambas variables mediante un único ensayo. Han de registrarse datos con ambos métodos de manera simultánea en diferentes estados de carga y obtener un resultado que permita extrapolar los datos futuros. Es por eso que las medidas han de tener la suficiente magnitud para que el factor obtenido entre ambos sea sólido y los efectos secundarios como las variaciones térmicas no sean relevantes. Puede afirmarse que la monitorización mediante extensómetros del anclaje del tirante refleja fielmente las variaciones de carga del mismo.

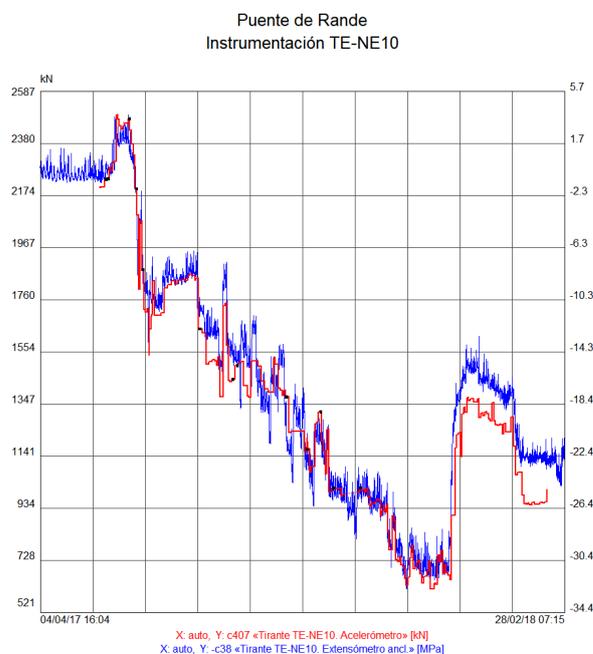


Figura 6. Comparación de tensión en anclaje (azul) y fuerza en el tirante (rojo) durante la construcción.

## 5. Pruebas de carga

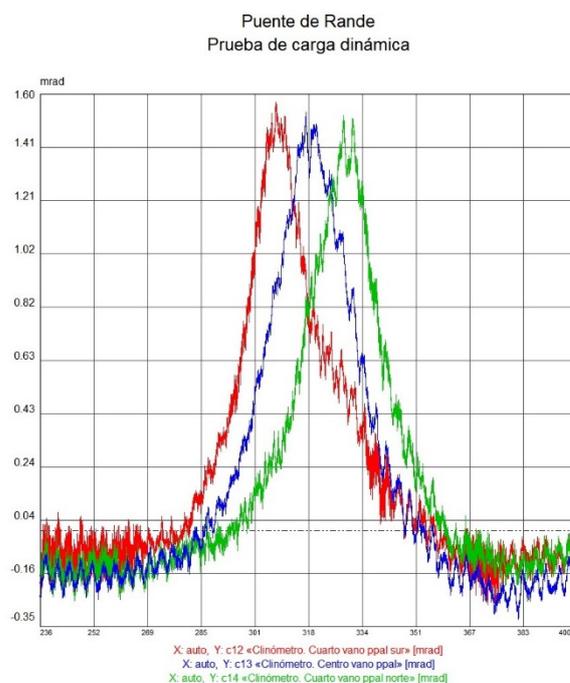
Tras la finalización de los dos tableros laterales y previo a la inauguración del puente se llevaron a cabo las pruebas de carga estática y dinámica. Kinesia participó en ambas, controlando el sistema desde el propio puente y asistiendo a la ejecución de las mismas. Se empleó la instrumentación existente de las obras de ampliación que fue complementada con varios sensores de tipo dinámico y estático. Dada la flexibilidad del puente a girar transversalmente (Figura 7), las medidas se centraron en el extremo del voladizo del tablero de ampliación del lado este, tanto en aceleraciones como en giros. La respuesta estrictamente estructural del puente a las pruebas será expuesta en otra ponencia por los técnicos responsables de la mismas.

### 5.1 Prueba de carga dinámica

El 20 de diciembre de 2017 se realizó la prueba de carga de confort y dinámica de la estructura para la cual se amplió la monitorización. La prueba consistió en el análisis estructural del puente además de otros ensayos de confort de los usuarios bajo excitación de la estructura. El punto crítico de medida fue el extremo del voladizo de los tableros laterales, instalándose en ellos los acelerómetros.

Se añadieron 9 acelerómetros (7 verticales y 2 horizontales) que midiendo aceleraciones en el tablero central y en el lateral este distribuidos a lo largo de todo el tramo atirantado. En la misma sección de cada uno de ellos se instaló un clinómetro (Figura 7) para poder medir el giro transversal de la sección de manera dinámica al paso de los vehículos.

Adicionalmente y de manera especial la prueba de confort se llevó a cabo en 2 vehículos (moto y coche) instrumentados con 3 acelerómetros móviles cada uno (registro en tres ejes). Las pruebas consistieron en la medida de aceleraciones de los pasajeros al circular con la



**Figura 7. Giro transversal del tablero medido con 3 clinómetros del vano central al paso del camión.**

estructura sin acciones dinámicas importantes (brisa y tráfico leve en tablero alledaño) así como al circular con acciones dinámicas en curso rodando tras los camiones de excitación. Las medidas fueron completadas con el sistema dinámico integrado en la monitorización de construcción que se empleó de manera simultánea.

En la prueba se concluyó que el puente presenta una correcta respuesta estructural dinámica a las acciones a las que se sometió. Los ensayos en vehículos no registraron ninguna afeción de confort a los usuarios que circularon durante la excitación, siendo las aceleraciones similares a una circulación fuera de la estructura.

### 5.2 Prueba de carga estática

La noche del 26 de diciembre de 2017 tuvo lugar la prueba de carga estática en el Puente de Rande. La imposibilidad de referenciar los desplazamientos a puntos fijos (por elevada distancia y presencia de la ría de Vigo bajo el puente) obligó a realizar la medida de flechas mediante topografía. El resto de variables como tensiones, giros y temperaturas fue registrado con los sensores de la instrumentación de las

obras de ampliación. A dichos sensores se añadieron los 7 clinómetros transversales dispuestos en tableros durante la prueba de carga dinámica.

Los clinómetros registraron el giro del tablero de ampliación en sentido transversal en 6 puntos. Para conocer el giro relativo entre los dos tableros, es decir el existente en la rótula, el séptimo clinómetro de control se ubicó en el tablero central, en la sección centro de vano.

## 5. Monitorización en servicio

La instrumentación descrita se prolongó tras la inauguración del puente hasta el instante en el que comenzó la fase en servicio. Desde noviembre de 2019 se cuenta con datos sobre la nueva instrumentación que va a monitorizar el puente en de forma permanente en su fase de explotación. Con una distribución y tipos de sensores distinta a la de construcción, la instrumentación tiene un fuerte carácter dinámico en el que el control de los tirantes del tablero central cobra especial importancia. Con 40 acelerómetros instalados a 30 m de altura en dichos tirantes y otros 40 en sus homólogos de la ampliación con células de carga, se seguirá de manera excepcional la evolución de cargas y niveles de vibración.

El conjunto instrumental se completa con acelerómetros en pilas y tableros, así como clinómetros dinámicos para conocer los giros transversales de los tableros de ampliación. Los sensores restantes son de tipo estático y miden tensiones en tablero, giros en pilas y desplazamientos de juntas.

La complejidad del nuevo periodo de monitorización radica en la gestión de los datos dinámicos y obtención automatizada de resultados tangibles para un correcto control y seguimiento.

## Referencias

- [1] V. Puchol de Celis, Auscultación dinámica de tirantes del Puente de la Constitución de 1812 sobre la Bahía de Cádiz, Hormigón y Acero. 67(2016) 195-197.