

Original

# Instrumentación, monitorización y análisis del Puente de la Constitución de 1812 sobre la Bahía de Cádiz

*Instrumentation, monitoring and analysis of the Constitución de 1812 Bridge over the Cadiz Bay*

Vicente Puchol de Celis

*Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, Kinesia Ingeniería S.L., Madrid, España*

Recibido el 23 de noviembre de 2015; aceptado el 20 de abril de 2016

Disponible en Internet el 24 de junio de 2016

---

## Resumen

Con el objetivo de controlar el proceso constructivo, se ha llevado a cabo la instrumentación y monitorización de los parámetros estructurales más importantes del puente

© 2016 Publicado por Elsevier España, S.L.U. en nombre de Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural (ACHE).

*Palabras clave:* Auscultación; Instrumentación; Monitorización; Análisis; Espectros; Modelos

## Abstract

In order to control the construction process, the main structural parameters of the bridge have been instrumented and monitored

© 2016 Published by Elsevier España, S.L.U. on behalf of Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural (ACHE).

*Keywords:* Auscultation; Instrumentation; Monitoring; Analysis; Spectra; Models

---

## 1. Introducción

Por sus dimensiones y singularidad, tanto de diseño como de proceso constructivo, el Puente de la Constitución de 1812 sobre la bahía de Cádiz ha precisado un extenso conjunto de sensores y técnicas de medida y análisis que permitan controlar en tiempo real tanto el estado tenso-deformacional y su adecuación a las previsiones de proyecto, como la seguridad de las numerosas maniobras especiales habidas en su ejecución.

La instrumentación que aquí se describe ha cubierto desde el arranque de las torres de pilas P12 y P13 hasta el control de izado del tramo desmontable, la prueba dinámica del tramo atirantado [1] y la auscultación final de los tirantes [2].

## 2. Metodología de auscultación

Como en toda gran obra, la auscultación realizada ha seguido el esquema IMA, que integra 3 componentes esenciales claramente diferenciados:

- *Instrumentación:* es el conjunto de sensores y sistemas de adquisición de datos que recogen los parámetros estructurales físicos objeto de control y análisis. En otras palabras, el equipo (hardware) de medida.
- *Monitorización:* es el conjunto de procesos de transmisión, publicación web y distribución que hacen posible que la información llegue en tiempo y forma a sus destinatarios. En otras palabras, el sistema de gestión de datos.
- *Análisis:* es el conjunto de técnicas que permiten convertir los datos en conocimiento y comprender el comportamiento estructural. En otras palabras, las herramientas de proceso.

---

Correo electrónico: [kinesia@ciccp.es](mailto:kinesia@ciccp.es)

El IMA debe constituir un plan equilibrado para que los 3 eslabones de la cadena funcionen en armonía y no sobren datos o falten medios de gestión y análisis.

En nuestro caso, el software utilizado para las 3 actividades ha sido la plataforma Merlin, desarrollada por Kinesia Ingeniería a lo largo de 25 años con el objetivo de cubrir los 3 eslabones de forma tal que, segundos después de la obtención de un dato, esté en la mesa del analista junto con la herramienta necesaria para su proceso.

### 3. Instrumentación

La instrumentación ha estado constituida por 3 sistemas de diferente naturaleza. A su vez, cada uno de ellos ha estado dividido en 2 subsistemas, correspondientes a las torres P12 y P13 del puente (que, hasta el cierre del vano central, han sido tratadas como estructuras independientes).

#### 3.1. Instrumentación estática

La instrumentación estática ha estado compuesta por 8 maleas de 60 canales de capacidad de medida que, con cierta reutilización parcial, han servido para registrar la siguiente dotación de sensores:

- Tensiones (acero estructural y armaduras pasivas): 450.
- Giros (torres de atirantamiento, riostras): 18.
- Fuerzas (tirantes, barras de anclaje de carros de izado de dovelas): 76.
- Reacciones (apoyos pot): 4.
- Temperaturas (acero estructural, hormigón, tirantes, ambiente): 50.
- Movimientos relativos (tablero-riostra): 8.
- Anemómetros (torres, tablero): 5.
- Veletas (torres, tablero): 5.



Figura 1. Extensómetro de armadura pasiva instalado en base de pila P12.



Figura 2. Mapa de acceso web a las estructuras de la plataforma. En la ventana emergente, los enlaces a las diferentes instrumentaciones parciales del Puente de la Constitución de 1812 sobre la Bahía de Cádiz.

El proceso de medida ha sido de un registro completo de sensores cada 5 min.

### 3.2. Instrumentación dinámica

La instrumentación dinámica ha estado compuesta por 2 sistemas de medida de 32 canales de capacidad de medida y la siguiente dotación de sensores:

- Aceleraciones en tablero: 15 (10 verticales y 5 horizontales transversales).
- Aceleraciones en torres: 4 (2 horizontales longitudinales y 2 transversales).
- Anemómetros-veleta: 5 (2 en torres y 3 en tablero).

El proceso de medida ha consistido en disparos efectuados bajo condición de evento. Cada vez que un acelerómetro superaba el nivel de 0,050 g o un anemómetro detectaba un viento superior a 50 km/h, se realizaba una captura de alta velocidad (100 lecturas por segundo y sensor) de 6 min de duración (5 min de evento propiamente dicho más un minuto de pre-evento para contextualizar el episodio).

Para llevar a cabo este proceso, el sistema estaba monitorizando permanentemente 24 variables de control, guardando en una memoria circular (buffer) los últimos 60 s de datos y descartando los anteriores. Cuando alguna de las variables superaba el umbral citado, se iniciaba la captura, previa aportación al archivo de los 60 s de datos correspondientes al pre-evento.

### 3.3. Instrumentación topográfica

Lo que denominamos instrumentación topográfica ha sido, realmente, la incorporación al sistema de medida estático de los datos obtenidos por la topografía robotizada llevada a cabo por el Servicio de Topografía de Dragados. Cada 5 min, los datos recogidos por este sistema (que tardaba unos 15 min en hacer un ciclo completo de prismas) se integraban en el sistema estático en igualdad con otros sensores electrónicos (figs. 1-6).

Aunque ya empieza a ser habitual que una topografía de obra pueda ser seguida por Internet, la novedad del proceso aquí descrito reside en la integración plena con el resto de los sensores, compartiendo recursos de monitorización y herramientas de análisis en el sentido expuesto en el epígrafe 2 (ejemplo en la fig. 7).

El número total de puntos de control topográfico ha sido de 200.

## 4. Monitorización

La monitorización ha estado compuesta por los siguientes elementos:

- Transmisión de datos: 2 dispositivos 4G instalados respectivamente en las torres P12 y P13 (para los sistemas estáticos y dinámicos) más una conexión ADSL (para las lecturas

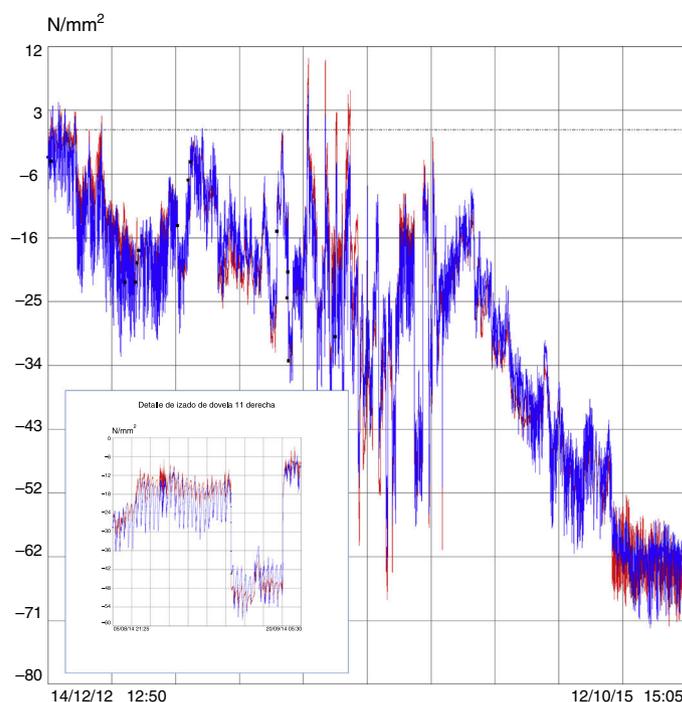


Figura 3. Registros históricos (trazas) de tensiones de flexo-compresión (2 sensores) en base de pila P13. En el recuadro pequeño, detalle (zoom) correspondiente a la maniobra de izado de una dovela (11D).

topográficas), que enviaban continuamente información desde obra (Cádiz) al centro de datos (Madrid).

- Centro de datos: ubicado en Madrid, ha gestionado la recepción continua de las 4 bases de datos estáticas parciales (2 de instrumentación y 2 de topografía) más los casi 2.000 archivos habidos de evento dinámico. De todas ellas ha ido creando copias de seguridad sobre la marcha.
- Fusión on-line de las bases de datos parciales en una base global que contuviera la totalidad de la información registrada experimentalmente.
- Publicación web: en tiempo real, los datos generados por los diferentes sistemas de instrumentación han estado disponibles en la página web del puente, bien mediante gráficos históricos (trazas) y listas numéricas o bien mediante infogramas (paneles gráficos como los mostrados en las figs. 8 y 9).
- Distribución de datos: desde el centro de datos, la información se ha reenviado continuamente a los 20 técnicos que, utilizando la plataforma, han participado en el seguimiento instrumental del proceso constructivo.

El conjunto instrumental ha generado unos 250 millones de datos estáticos y 1.800 millones de datos dinámicos.

Se ha puesto especial atención en que el flujo de datos fuera, además de automático, de doble sentido, de forma que a la mesa de cada analista llegara no solo la información nueva que se iba generando, sino, también la información antigua que por alguna cuestión hubiera sido modificada en el centro de datos. En otras palabras, que todos los técnicos dispusieran de las bases de datos sincronizadas y siempre actualizadas.

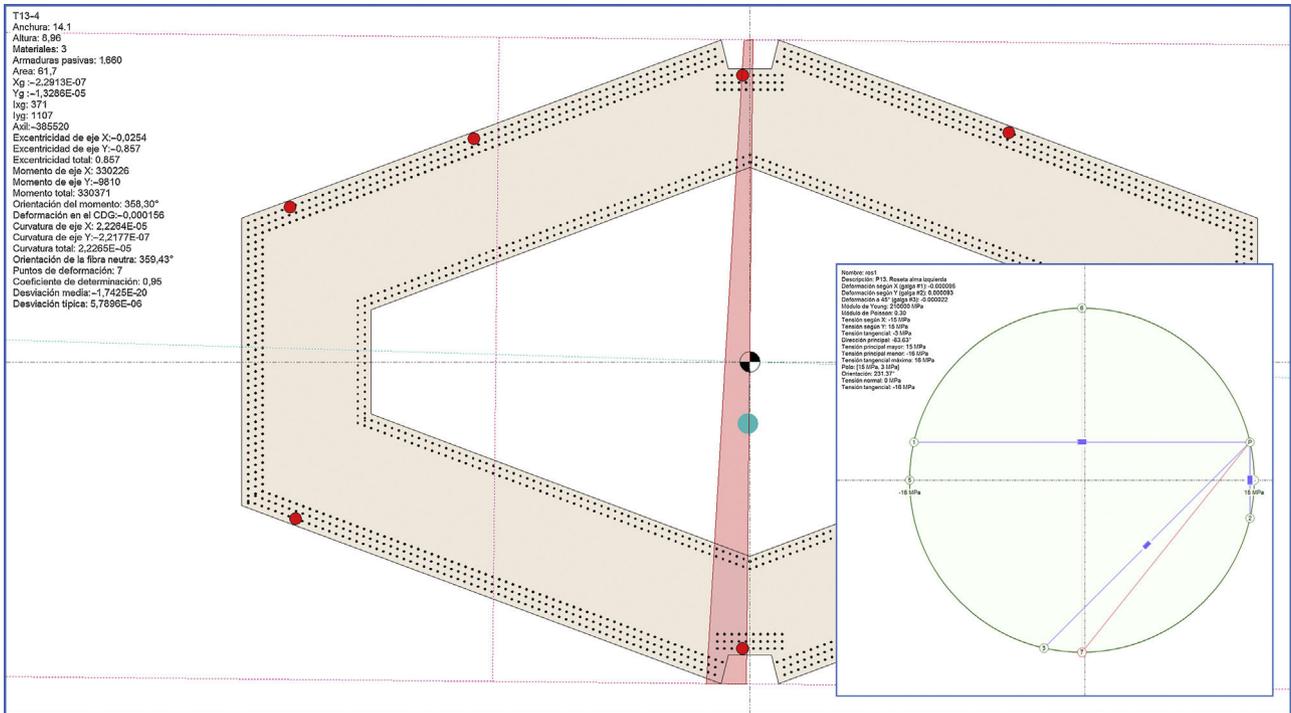


Figura 4. Estado tenso-deformacional de la sección de base de la pila P13 en el momento de inicio de izado de la dovela 11D. En el recuadro pequeño, análisis de tensiones cortantes (roseta extensométrica) en alma de apoyo de tablero sobre P13 en ese mismo instante.

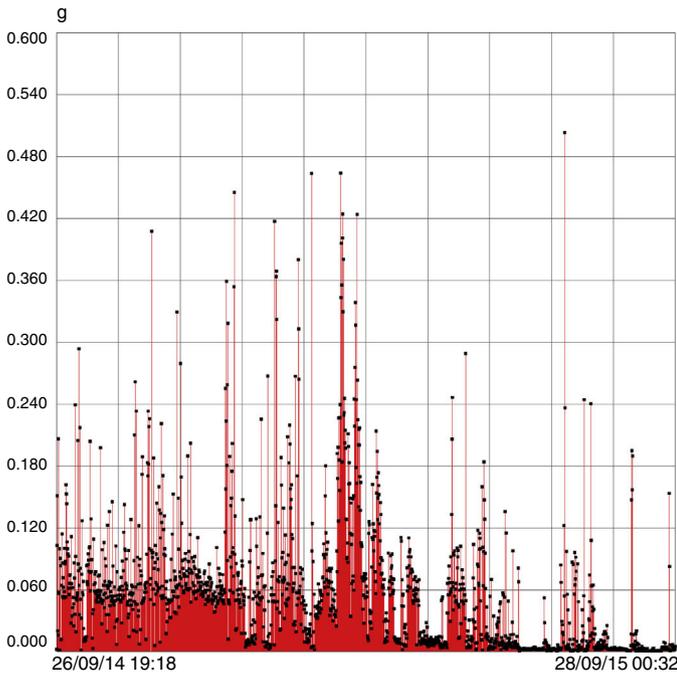


Figura 5. Metabase (base de bases de datos) de aceleraciones verticales en centro de vano de tablero compuesta por 1.700 episodios dinámicos. Las aceleraciones varían entre 0,001 g cuando son provocadas por una brisa suave, hasta más de 0,500 g cuando son causadas por maquinaria de obra.

### 5. Análisis

Las herramientas de análisis han cubierto los siguientes campos:

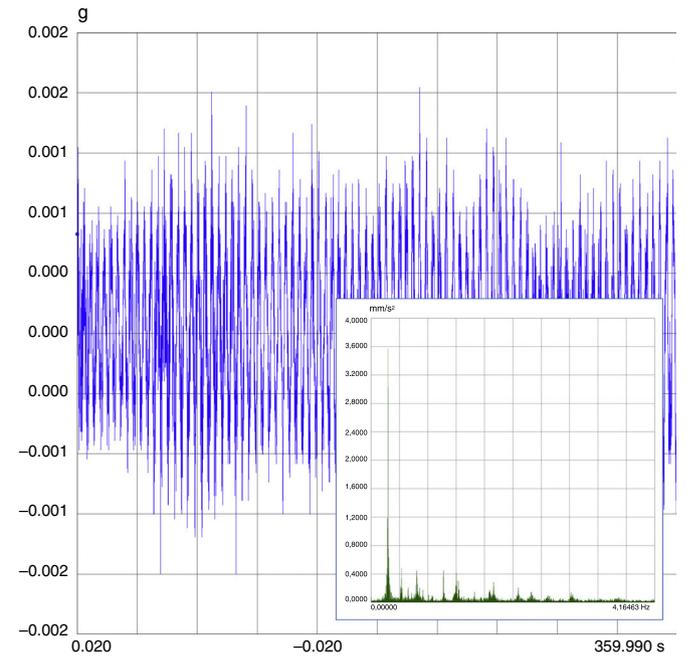


Figura 6. Acelerograma vertical en centro de vano causado por viento de 50 km/h. Si bien las vibraciones apenas llegan a 0,001 g, son suficientes para determinar con precisión el primer modo característico de flexión de las torres, que oscilan con una amplitud de 3,60 mm/s<sup>2</sup> a una frecuencia de 0,2482 Hz.

- Análisis gráfico de registros históricos, con superposición de trazas y múltiples opciones de zoom para estudiar con detalle cualquier maniobra.
- Análisis estadístico, mediante histogramas y percentiles probabilísticos.

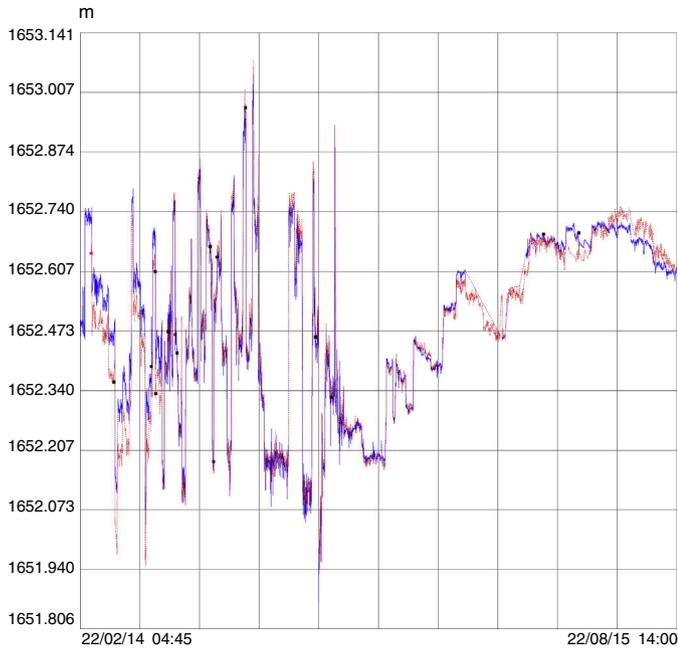


Figura 7. Modelo de regresión sobre 18 meses de datos (16.000 puntos). En color rojo, movimiento horizontal medido mediante topografía a 130 m de altura en la torre P13 (punto de unión de los brazos inclinados largos). En azul, el mismo movimiento medido mediante un clinómetro. El clinómetro es explicativo ( $r^2$ ) en un 98%, lo que demuestra la bondad de ambos métodos de medida y del ajuste realizado. Cada mili-radián real medido por el clinómetro equivale a 67,47 mm de movimiento topográfico. El cálculo análogo mediante deformada parabólica teórica de la torre sería de 64,98 mm por mili-radián.

- Análisis espectral, para control de la amplitud y frecuencia de las vibraciones estructurales (acción del viento, acción de la marea en pontonas durante el izado de dovelas, etc.).
- Análisis numérico, mediante declaración de variables personalizadas (gradientes, medias, envolventes, etc.), gestión de valores ausentes «nil» y listas de parámetros estructurales concomitantes.
- Análisis de punto elástico, mediante la resolución de rosetas extensométricas (círculo de Mohr) y cálculo de tensiones principales, especialmente de esfuerzos cortantes en almas de tablero metálico sobre pilas.
- Análisis de sección, mediante obtención de planos de deformación a partir de las lecturas de los sensores y cálculo de esfuerzos por integración de tensiones utilizando diferentes leyes constitutivas.
- Análisis térmico, para fijar los tramos horarios y condiciones que debían regir durante las operaciones de cierre central del tramo atirantado.

Las herramientas puestas a disposición del equipo técnico han permitido refrescar todos estos procesos en tiempo real.

### 6. Seguimiento en servicio

La mayoría de la instrumentación descrita (salvo la topográfica) se va a mantener activa durante la vida del puente en fase de explotación. Actualmente se está tendiendo una fibra óptica

Torre 12  
Tablero - Secciones F y G  
Termómetros

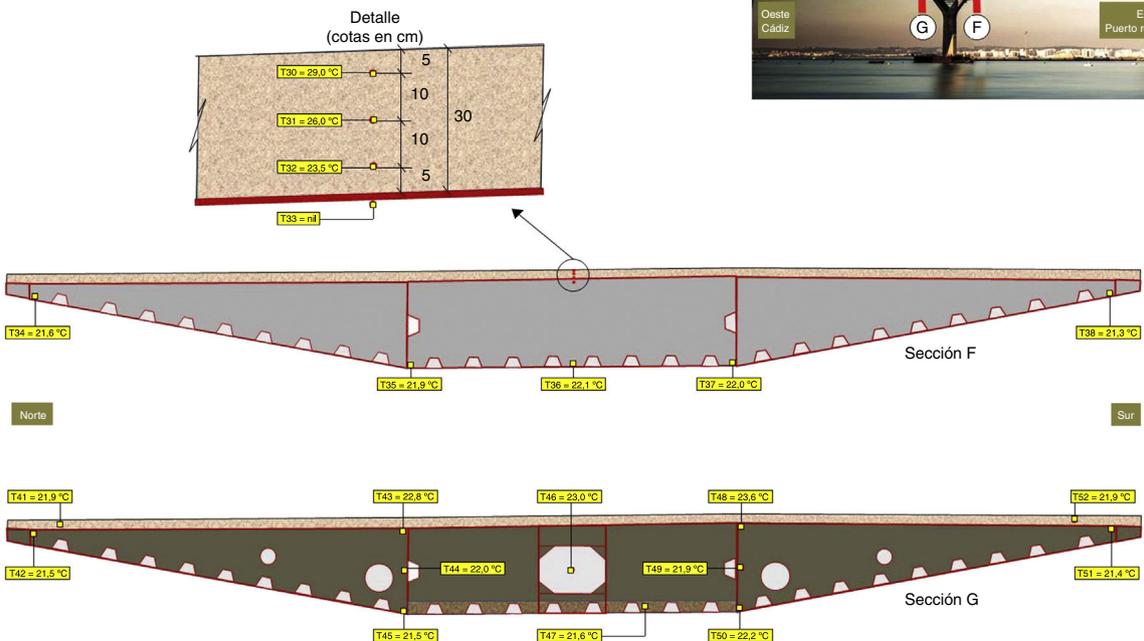


Figura 8. Infograma de seguimiento web de temperaturas en 2 secciones de tablero próximas a torre de pila P12.

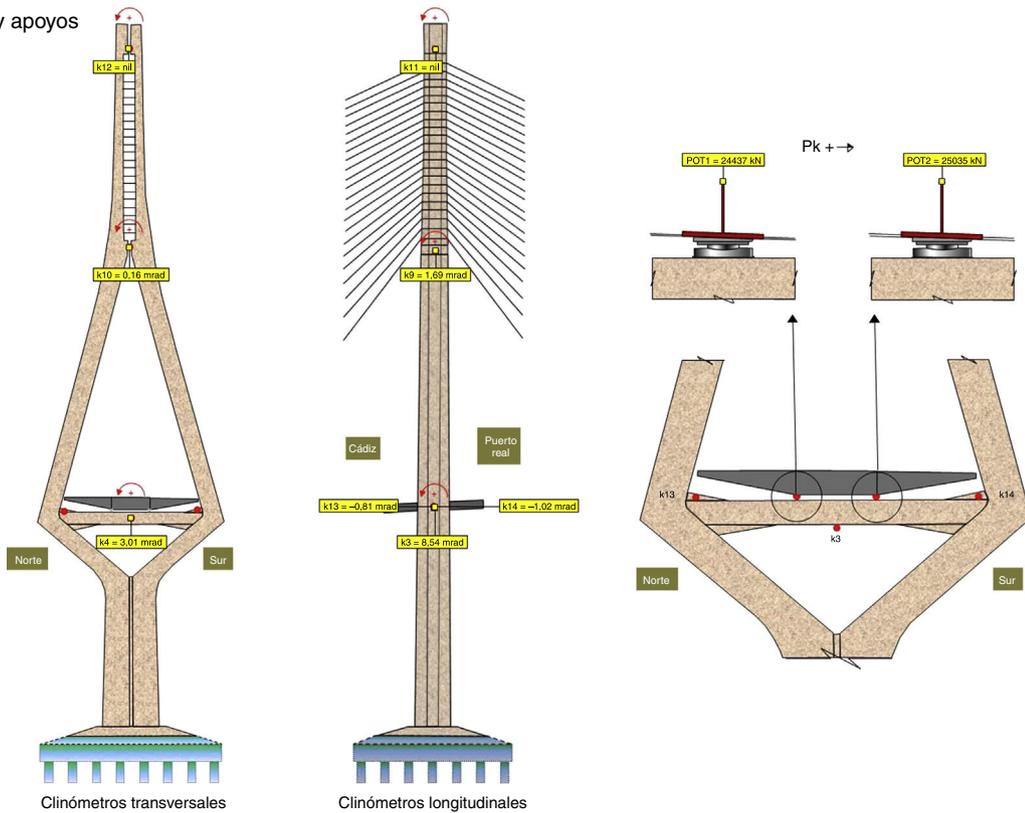
Torre 12  
Clinómetros y apoyos

Figura 9. Infograma de seguimiento web de giros y reacciones en torre de pila P12.

que recorre la totalidad de la obra y que va a permitir realizar la adquisición de datos desde el Centro de Control de la Dirección General de Carreteras en Puerto Real.

Especial esfuerzo se está llevando a cabo en las tareas de vigilancia del comportamiento estructural frente al viento. Se van a aumentar a 5 los 3 anemómetros actuales del tablero y se van a desarrollar algoritmos de proceso de datos para advertir a los usuarios mediante pórticos (e incluso cierre parcial o total de esta infraestructura) ante determinadas condiciones. Se va a elaborar, también, un modelo de predicción para anticipar situaciones de riesgo, a partir de datos de viento del aeropuerto de Jerez y de previsiones de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET).

La monitorización en servicio va a permitir, también, caracterizar la evolución reológica (hormigón), controlar las frecuencias de vibración (rigidez), vigilar las amplitudes de vibración (confort y funcionalidad), contrastar las reacciones

(rosetas extensométricas, apoyos pot) y las fuerzas en los tirantes (células de carga y auscultación dinámica).

## 7. Ejemplos de proceso analítico

En las figuras 3-9 se muestran diversos procesos de monitorización y análisis llevados a cabo como parte de la auscultación durante la construcción del puente. Todas las imágenes proceden del software señalado en el apartado 2.

## Bibliografía

- [1] V. Puchol de Celis, J. de Los Ríos de Francisco, J.L. Castro Rubal, Prueba de carga dinámica del tramo atirantado del Puente de la Constitución de 1812 sobre la bahía de Cádiz, *Hormigón y Acero*. 67 (2016) 191–193.
- [2] 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.