

Original

# Auscultación dinámica de tirantes del Puente de la Constitución de 1812 sobre la Bahía de Cádiz

*Dynamic auscultation of the cable stays of the Constitución de 1812 cable-stayed 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 29 de junio de 2016

## Resumen

Con el objetivo de documentar la fuerza y el coeficiente de amortiguamiento de los tirantes a efectos de su seguimiento en el tiempo, se ha realizado una auscultación dinámica de los mismos previamente a la entrada en servicio del puente. La determinación de las fuerzas se ha hecho mediante la analogía de la cuerda vibrante.

© 2016 Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural (ACHE). Publicado por Elsevier España, S.L.U. Todos los derechos reservados.

*Palabras clave:* Tirante; Excitación; Auscultación dinámica; Frecuencia; Amortiguamiento; Cuerda vibrante

## Abstract

In order to have a record of the cable stay stresses and the damping coefficients to keep track of its evolution, a dynamic auscultation of them has been performed before the bridge is open to traffic. Their tension forces have been obtained through the vibrating string analogy.

© 2016 Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural (ACHE). Published by Elsevier España, S.L.U. All rights reserved.

*Keywords:* Stay; Excitation; Dynamic auscultation; Frequency; Damping; Vibrating string

## 1. Introducción

Como último control experimental [1,2] del puente antes de su entrada en servicio, se ha procedido a la auscultación dinámica de todos los tirantes. El objetivo ha sido doble: por una parte, contrastar la fuerza de los cables con respecto a los valores previstos; y, por otra, obtener una *fotografía* de referencia para detectar cualquier cambio en futuros controles a llevar a cabo dentro del plan de inspección y mantenimiento del puente en fase de explotación.

Para que el ensayo sea fácilmente repetible con el puente abierto al tráfico, es necesario que, a la vez que preciso, sea rápido y poco intrusivo. En este sentido, la auscultación como

*cuerda vibrante* es el método idóneo, pues no precisa de grandes medios auxiliares, como sería un gato de pesaje, ni los tirantes resultan afectados en ningún sentido. Tan solo es necesario inducir en ellos una cierta excitación y deducir su fuerza a partir de la frecuencia de vibración y de sus características mecánicas (longitud y masa unitaria). La ecuación (1) expresa esta relación, donde  $f$  es la frecuencia de vibración (Hz),  $L$  es la longitud (m),  $F$  es la fuerza del tirante (N) y  $m$  es la masa por metro lineal (kg/m).

$$f = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{F}{m}} \quad (1)$$

El procedimiento, aunque sencillo de concepto, requiere una ejecución cuidadosa por los siguientes aspectos:

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



Figura 1. A la izquierda, plataforma elevadora. A la derecha, sistema de adquisición y análisis de datos.

- La frecuencia principal de vibración de los tirantes es muy reducida, de 0,40 a 1,50 Hz, por lo que las medidas deben hacerse con una resolución mejor que 0,01 Hz.
- La frecuencia de vibración de los tirantes se encuentra inmersa entre las frecuencias de los primeros modos de vibración del puente, por lo que hay que prestar atención para evitar confusiones entre unas y otras.
- El sensor de medida debe tener, además de buena respuesta en baja frecuencia, alta sensibilidad, porque los movimientos que se pueden inducir en el tirante son reducidos.

## 2. Instrumentación

El equipo instrumental utilizado ha consistido en un servoacelerómetro (Kistler 8330B3), una unidad de adquisición de datos dinámica (Agilent 1313A) y un ordenador portátil de control y registro. El software de medida y análisis es un desarrollo propio de Kinesia Ingeniería.

Como medio auxiliar de acceso a los tirantes (fig. 1) se ha utilizado una plataforma elevadora (Manitou) típica de obra civil. El juego del brazo articulado ha permitido que, con un mismo posicionamiento de la máquina, se hayan podido auscultar 3 o 4 tirantes seguidos a una altura unos 15 a 20 m que, como se comenta más adelante, es suficiente tanto para la excitación del tirante como para la captación de su frecuencia de vibración.

Como los acelerómetros de tipo servo tienen respuesta desde 0 Hz en adelante, el sistema de medida se ha encargado de restar automáticamente la proyección de la aceleración gravitatoria —que es una aceleración constante de cero hertzios— sobre el ángulo de cada tirante. Además, se ha utilizado un filtro paso-bajo para amortiguar las frecuencias elevadas carentes de interés.

Es importante que adquisición, registro y análisis sean procesos simultáneos en el tiempo. Es decir, que los datos se obtengan, guarden y analicen al unísono para que se den las condiciones de una verdadera auscultación en tiempo real como requiere la medida ágil de los 176 tirantes con que cuenta el puente.

## 3. Excitación

Habitualmente se piensa en la excitación como en algo parecido a *dar un golpe* al tirante y escuchar la respuesta. Esto no solo no es así, sino que rige el principio antrópico de que «si quieres una respuesta amable, haz una pregunta amable». Un golpe seco es una actuación impulsiva, breve en el tiempo y, por tanto, de

alta frecuencia; es decir, lo más desaconsejable para auscultar un elemento que tiene frecuencias muy bajas. Empujar el tirante desde la plataforma de acceso es mejor que golpearlo, pero no es buena solución, porque el tirante a baja altura es más rígido que la plataforma y es el operario el que resulta desplazado hacia atrás.

El medio utilizado ha consistido en atar una cuerda al tirante junto al punto de medida y, desde el tablero, tirar fuertemente y soltar la cuerda de golpe. Aunque, evidentemente, la fuerza de tiro no puede superar el peso de la persona, y la cuerda está atada a solo 1/10 de la longitud del tirante, el desplazamiento que se consigue es suficiente para provocar una oscilación nítida que puede medirse con mucha precisión. Y, sobre todo, es una sollicitación de baja frecuencia, proveniente de imponer al tirante una deformada inicial y dejarle que oscile libremente movido por sus fuerzas elásticas. En función del punto donde se haya atado la cuerda se obtendrán diferentes combinaciones (proporciones) de armónicos en la respuesta (timbre musical del tirante), pero no diferentes frecuencias.

## 4. Adquisición de datos

El proceso se ha hecho con los siguientes parámetros:

- Velocidad de adquisición de datos: 100 Hz (lecturas por segundo).
- Algoritmo de proceso: transformada rápida de Fourier (FFT).
- Ventana de proceso: 16.384 lecturas consecutivas.
- Duración del registro: 15 s de pre-evento más 200 s de evento.
- Resolución de medida: 0,0061 Hz.

La velocidad de 100 lecturas por segundo puede parecer excesiva, pero de acuerdo con el teorema de Nyquist-Shannon, para que la señal esté perfectamente identificada la tasa de muestreo debe ser, al menos, el doble de la frecuencia más alta existente. Eso da lugar a una frecuencia límite teórica de 50 Hz, que se reduce a unos 16 Hz si dotamos al sistema de un factor de seguridad de 3. Sin una velocidad de medida suficiente, cualquier frecuencia real que esté por encima del límite de Nyquist-Shannon aparecerá en el espectro como un eco fantasma (*aliasing*).

## 5. Resultados

La analogía de *cuerda vibrante* es muy apropiada para los tirantes, que oscilan con una frecuencia fundamental de base

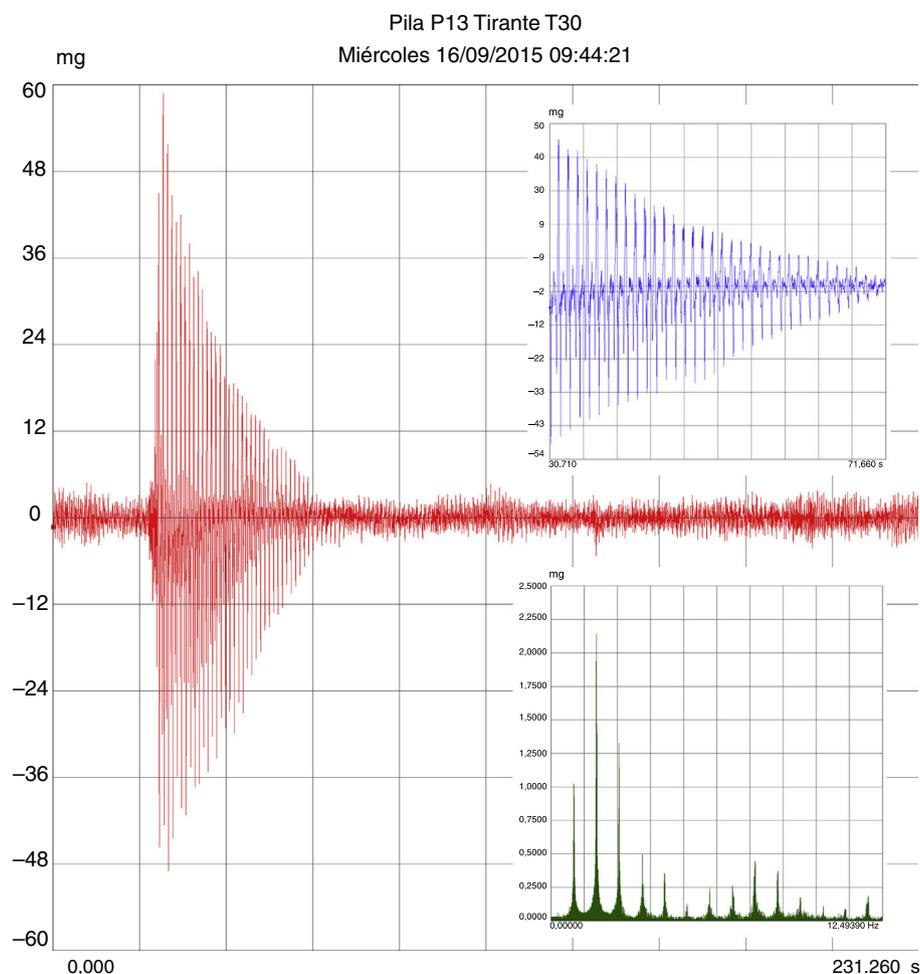


Figura 2. Acelerograma (rojo), zoom (azul) y espectro (verde).

más un conjunto de armónicos en el sentido matemático (y musical) del término; es decir, con relaciones enteras  $f$ ,  $2f$ ,  $3f$ ,  $4f$ . . . Esto implica que (1) si el espectro no es de tipo armónico, es muy probable que el ensayo esté mal realizado, y (2) que si no se ha conseguido excitar la fundamental, esta puede deducirse fácilmente mediante división aritmética de los armónicos subsiguientes.

La figura 2 es un ejemplo representativo de la auscultación de un tirante cualquiera. En color rojo está trazado el acelerograma registrado, en azul un detalle parcial del mismo (zoom) para que se aprecie mejor su morfología y curva de amortiguamiento, y en verde el espectro de frecuencias. Puede verse que, además de la fundamental, se contabilizan 13 armónicos en el espectro.

Para este tirante, la frecuencia medida es de 0,8667 Hz, frente a la de 0,9091 Hz prevista en el modelo teórico. El amortiguamiento logarítmico se ha cifrado en 0,0678, que equivale a una tasa de amortiguamiento crítico del 1,08%.

## 6. Resumen

Las ideas centrales y conclusiones del trabajo son:

- La analogía con la cuerda vibrante es un método apropiado que permite una auscultación elegante y rápida, a la vez que precisa.
- Es un ensayo fácilmente reproducible cada cierto tiempo para vigilar no solo la fuerza de los cables, sino también su tasa de amortiguamiento.
- El efecto de la catenaria de los tirantes es prácticamente despreciable en la frecuencia de vibración del cable.
- Medir sobre la vaina no introduce ninguna distorsión, incluso aunque no haya inyección, pues esta sigue fielmente el movimiento de los cables interiores (por sí misma, nunca tendría un espectro armónico).
- No es necesario acceder a puntos de medida muy elevados, pues a 1/10 de la altura total es fácil provocar vibraciones de 60 mg (como la del ejemplo), que están muy por encima de la vibración de fondo (3 mg)

## Bibliografía

- [1] V. Puchol de Celis, Instrumentación, monitorización y análisis del Puente de la Constitución de 1812 sobre la Bahía de Cádiz, *Hormigón y Acero*. 67 (2016) 261–266.
- [2] V. Puchol de Celis, J. de los Ríos de Francisco, J.L. Castro Rubal, Prueba de carga dinámica del Puente de la Constitución de 1812 sobre la Bahía de Cádiz, *Hormigón y Acero*. 67 (2016) 195–197.