

El reto de aportar un carácter dinámico a las inspecciones de estructuras

The Challenge of Bringing a Dynamic Character to Structural Inspections

Ana Belén Menéndez Corral^a y Alejandro Rodríguez González^b

^a *Ingeniera de Caminos, Canales y Puertos. Universidad de A Coruña. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos (A Coruña, España). GEOTECNIA Y CIMIENTOS, S.A. (Madrid, España)*

^b *Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Alfonso X El Sabio. GEOTECNIA Y CIMIENTOS, S.A. (Madrid, España)*

Recibido el 13 de octubre de 2020; aceptado el 9 de marzo de 2021

RESUMEN

La operatividad y seguridad de las redes de transporte es un asunto de vital importancia para el bienestar económico y social de cualquier país. Dentro de dichas redes, no cabe duda de que los puentes constituyen puntos críticos por su especial vulnerabilidad y las consecuencias de todo tipo que conllevaría su hipotético fallo. Por ello, la evaluación de su salud estructural debe ser una cuestión primordial en todo sistema de gestión de puentes, y más teniendo en cuenta que muchos de ellos se encuentran próximos al fin de la vida útil para la que fueron proyectados. La evaluación de su estado de conservación se basa en la actualidad, de forma mayoritaria, en las inspecciones visuales. Este artículo se centra en las posibilidades que ofrecen los ensayos dinámicos, los avances en las monitorizaciones, comunicaciones y tratamiento de datos, para complementar y reforzar dichas inspecciones, eliminando la subjetividad y llegando, en tiempo real, a donde el ojo humano no puede llegar, de forma que los gestores de los puentes puedan decidir cómo, dónde y cuándo actuar de una manera más racional, objetiva y eficaz.

PALABRAS CLAVE: Gestión de puentes, fallo, ensayos dinámicos, salud estructural, inspección de puentes, análisis modal operacional .

© 2021 Asociación Española de Ingeniería Estructural (ACHE). Publicado por Cinter Divulgación Técnica S.L. Todos los derechos reservados.

ABSTRACT

A safe and efficient transportation infrastructure system is vital to sustaining any nation's economic and societal well-being. Bridges are especially vulnerable under conditions like natural or man-made hazards and are usually considered critical paths on the infrastructure network. Therefore, structural health assessment should be a primary issue in any bridge management program, especially considering that many infrastructure assets are becoming aged beyond their expected life-span. Present methods for structural condition evaluation of bridge structures rely heavily on on-site visual inspections of each structure. This article focuses on the possibilities offered by dynamic tests, advances in monitoring, communications and data processing, to complement and reinforce visual inspections, eliminating subjectivity and reaching, in real time, where the human eye cannot reach, so that bridge managers can decide how, where and when to act in a rational, objective and, hence, more efficient manner.

KEYWORDS: Bridge management, failure, dynamic tests, structural health, bridge inspection, operational modal analysis.

© 2021 Asociación Española de Ingeniería Estructural (ACHE). Published by Cinter Divulgación Técnica S.L. All rights reserved.

1. INTRODUCCIÓN

Una red de transporte segura y eficiente es vital para el sostenimiento del sistema económico y social de un país, por lo que

una gestión eficaz de sus infraestructuras repercutirá directamente en el beneficio de la sociedad en general. Es por tanto innegable que el deterioro y envejecimiento de su infraestructura, parte de la cual se encuentra cerca del fin de la vida útil para la que fue proyectada, constituye un problema de primera magnitud no solo para los responsables y gestores de las infraestructuras, sino para la sociedad en general.

* Persona de contacto / Corresponding author.
Correo-e / email: abmenendezc@geocisa.com (Ana Belén Menéndez Corral).

Además del deterioro de las infraestructuras derivado del tráfico (en aumento cada año) y del paso del tiempo, los eventos extremos (cada vez más frecuentes), naturales o causados por el hombre, pueden ocasionar graves problemas en la funcionalidad de las redes de transporte. Los puentes que, por definición, salvan obstáculos en el trazado que las carreteras no pueden salvar por sí mismas, son los más vulnerables frente a esas condiciones, pudiendo ocasionar mayor perjuicio a la sociedad el colapso de una única estructura que el de un gran tramo de carretera para el que exista una ruta alternativa. Así, será de vital importancia que la gestión de las estructuras garantice su seguridad y correcto estado de conservación, manteniendo, a la vez, un presupuesto limitado.

Por todo ello, resulta cada vez más necesario mejorar y reforzar los actuales métodos de evaluación del estado de conservación de los puentes, que en general ofrecen un control discontinuo, de baja frecuencia (del orden de años), parcial en cuanto a su alcance (normalmente no se puede llegar a todos los elementos en una inspección principal) y subjetivos (dependemos de la pericia del inspector). En el apartado 4 se describirá en qué consiste una inspección principal. Es importante señalar que las nuevas metodologías han de aportar validez, tanto durante el estado operacional normal de una red de infraestructuras cualquiera, como tras la ocurrencia de un evento extraordinario (riadas, fuertes episodios de viento, sismos, accidentes, entre otros).

Uno de los conceptos que más suena últimamente (aunque es fruto de más de dos décadas de trabajo de la comunidad científica e ingenieros) es el de la monitorización de la salud estructural de los puentes [1,2] (en inglés *structural health monitoring, SHM*). Existen diversas formas de monitorización, aunque en el presente artículo hablaremos sobre la relacionada con la observación del comportamiento dinámico de las estructuras. En concreto, la que está basada, fundamentalmente, en su respuesta dinámica en condiciones de operación, para mediante algoritmos y *machine learning*, alimentar y calibrar modelos analíticos y poder así avisar con antelación de posibles mecanismos de fallo, además de realizar una prognosis del comportamiento futuro de la estructura. Esta metodología permite obtener una información valiosísima que puede alimentar nuevas herramientas para la toma de decisiones en el ámbito de la conservación de las infraestructuras.

Lo inmediato es pensar en el ímprobo esfuerzo que supondría plagar de sensores toda la infraestructura. Sería muy productivo, más en esta época gobernada por el *Big Data*, pero poco realista por los elevados costes que conllevaría. Por esto, es necesario complementar las técnicas de detección de daños más avanzadas, con un filtro que realice un análisis de vulnerabilidad de la red, y en un nivel inferior, de la identificación de elementos críticos dentro de las estructuras seleccionadas para marcar unas prioridades en la actuación.

El presente artículo explorará métodos ya consolidados, que se están empleando fuera de nuestras fronteras y en casos singulares en España, que permiten la detección precoz de los fallos que podrían dejar a los puentes fuera de servicio, en el peor de los casos, o bien producir un agravamiento incontrolado de los deterioros existentes con el consiguiente aumento en la trascendencia y coste de las reparaciones, por no hablar del acrecentamiento de los periodos fuera de servicio. El objetivo final es lo que podríamos denominar como una red de “estructuras inteli-

gentes” [3], donde se aprovechan los últimos avances tecnológicos en sistemas de comunicación, información y de sensores, el desarrollo de técnicas de evaluación globales y no destructivas, y sobre todo, un conocimiento profundo de los mecanismos de deterioro y comportamiento real de los puentes.

¿Y qué entendemos por una “estructura inteligente”? Serían estructuras capaces de “sentir” las cargas y su respuesta ante las mismas, así como la existencia de daños; deberían poder “contar” cómo están funcionando y sus necesidades para un mejor desempeño, a la par que “avisar” o alertar a los administradores responsables de las mismas si la situación lo requiere.

Hay un largo camino por delante, evidentemente, y muchos estudios e investigaciones que realizar. Pero el esfuerzo merece la pena, ya que el desarrollo e implementación de un sistema de “estructuras inteligentes” tendrá un gran potencial para ahorrar importantes costes y proporcionar los datos necesarios para una gestión y toma de decisiones de un modo más racional, objetivo y por tanto más eficiente.

2.

EL FALLO DE LAS ESTRUCTURAS

En primer lugar, es importante definir lo que entendemos por el fallo de una estructura. Podemos definir el fallo de un puente como la incapacidad de desempeñar la función para la que fue proyectado y construido.

Debido a la redundancia estructural de muchos elementos que constituyen un puente, el fallo no tiene por qué implicar, necesariamente, el colapso total de la estructura.

Así pues, una estructura puede dejar de desempeñar su función por cualquiera de estas dos razones:

- El colapso, total o parcial, que ocurre cuando algún elemento importante del puente pierde su capacidad para resistir las cargas para las que fue proyectado. En un colapso total, la mayor parte de los elementos principales han fallado y el puente ha perdido su capacidad operativa. En un colapso parcial, algunos elementos principales han fallado y por tanto la seguridad de la propia estructura y de los usuarios, sobre o bajo esta, está gravemente comprometida. En todo caso, si existe un colapso habríamos superado los estados límite últimos de los elementos principales.
- El deterioro avanzado, progresivo y acumulado tras un largo periodo de tiempo, que deja el puente fuera de servicio, pero sin que necesariamente se haya producido un colapso. En este caso, estaríamos superando los estados límite de servicio en cuanto a funcionalidad, confort y/o aspecto, con síntomas detectables normalmente en una inspección principal.

Las causas del fallo de un puente pueden ser muy variadas (figura 1) y entre ellas se pueden citar sobrecargas, defectos de proyecto o construcción, materiales defectuosos, falta de mantenimiento, etc., aunque las más frecuentes son los eventos extraordinarios, como las riadas, sismos y las colisiones de



Figura 1. Colapso parcial del puente Nishihomiya, debido a la licuefacción del suelo durante el sismo de Kobe, 1995. Fuente: Wikipedia.



Figura 2. Deterioro avanzado de la losa del tablero de un puente. Fuente: GEOCISA, 2010.

vehículos. Dejando al margen estos eventos extremos, lo que más nos interesaría saber es cuándo es más probable que se produzca ese fallo causado por un deterioro progresivo, y del que nos podría alertar un sistema SHM.

Un buen punto de partida lo constituye la famosa “curva de la bañera”, que es una gráfica que representa los fallos durante el período de vida útil de un sistema o máquina. Se llama de esta manera por la forma de la curva (figura 3):

Llevado al campo de las infraestructuras, podríamos aplicar esta misma curva (figura 4), pero invertida para representar su desempeño o estado en el tiempo. De la misma forma que en el caso anterior, la estructura permanece en buen estado durante un periodo de tiempo hasta que empieza a empeorar, y el problema es que una vez que comienza la fase final el desempeño decae a una velocidad cada vez mayor. Como dice Víctor Yepes en un artículo: “... Y lo que es peor de todo, llega un momento que la caída en las prestaciones ocurre de forma muy acelerada, sin capacidad de reacción por parte de los gestores. Por eso se ha utilizado el símil de la “bomba de relojería”. [4]

El gran reto por lo tanto que se presenta en la gestión de la conservación de los puentes sería conocer con la mayor fiabi-

lidad posible en qué punto de la curva se encuentra cada uno de ellos, ya que las decisiones a tomar con una estructura en concreto serían muy diferentes si supiésemos que se encuentra en el punto A, B o C de la curva. En definitiva, cuanto mayor sea la información disponible, en cantidad y en calidad, se podrán tomar las decisiones más acertadas, actuando de forma preventiva y proactiva, anticipándose a un fallo repentino y optimizando los recursos disponibles.

3. EL ESTADO “0”

Un concepto primordial que aborda la Instrucción sobre Inspecciones Técnicas en los puentes de ferrocarril (ITPF-05) [6], es el de “estado cero” para los puentes de nueva construcción. La primera inspección principal (recordemos, se realiza junto con la prueba de carga), consistirá en una caracterización detallada del puente que servirá como situación de referencia para el posterior análisis y seguimiento de su evolución a lo largo de su vida

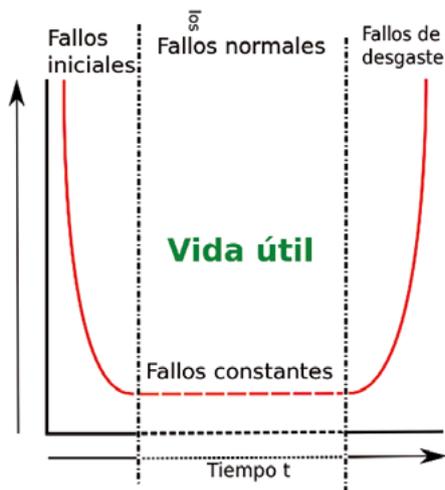


Figura 3. Curva de la bañera. De Toniperis - Trabajo propio, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=27327347>

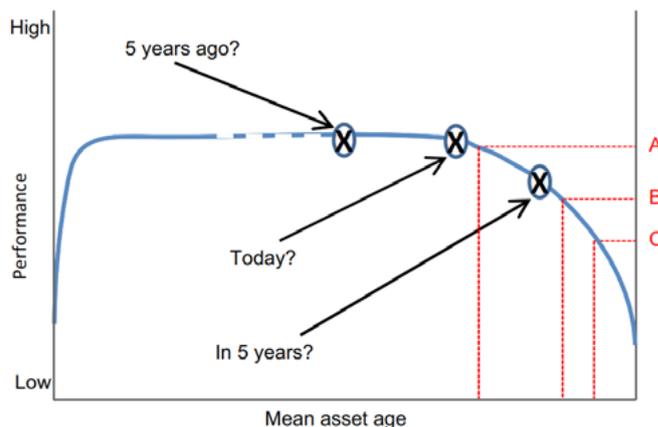


Figura 4. Gráfico del estado o desempeño de una estructura (Robert Thurlby, 2013) [5].

útil. La esencia de este concepto, tan bien definido en su momento, es la que se recupera para darle una nueva dimensión mediante las técnicas que abordamos en el presente artículo.

En el caso de nuevas estructuras, asumiendo los resultados y labores que ya se realizan (inspección principal y prueba de carga), la implementación de una acción adicional llevaría a la consecución de múltiples objetivos. La acción adicional es la Caracterización Dinámica de la estructura, a la que se llegaría a través del procesamiento de señales mediante Análisis Modal Operacional (en el [apartado nº 5](#) se explican esta y otras técnicas). Para conseguir una adecuada caracterización es fundamental la obtención de los parámetros dinámicos de la estructura (modos principales de vibración y las frecuencias y amortiguamientos asociados) de una manera fiable.

Parece sensato pensar que el momento idóneo para la obtención de estos parámetros es durante la realización de una prueba de carga (ya sea para un puente ferroviario o carretero), puesto que se dan toda una serie de circunstancias favorables. En ese momento la estructura presenta una instrumentación suficiente (flechas, deformaciones, aceleraciones, temperatura y humedad) capaz de adquirir datos de manera continua y con precisión elevada (centésima de milímetro en flechas, 10 V/g en aceleraciones), empleando altas frecuencias de muestreo (en general 100 Hz y con capacidad para mayorar si fuera necesario), tráfico controlado (características, velocidad de paso, distribución, etc.) y por último, sin incrementar la duración de una prueba convencional.

Es importante destacar que ya se están produciendo avances en este campo; actualmente se encuentran en fase de desarrollo normativas que integran el análisis modal en las Caracterizaciones Dinámicas y Pruebas de Carga de viaductos de ferrocarril. [7]

Para estructuras en servicio, independientemente del año de su construcción, es fundamental generar, igualmente, su propio “estado cero” lo más detallado posible, para poder hacer un posterior seguimiento de su salud estructural o bien compararlo con modelos numéricos desarrollados con ese propósito. ¿Cuál es el momento adecuado? Cualquiera, cuanto antes mejor si se trata de estructuras muy envejecidas o deterioradas. Sin embargo, para aprovechar toda la estructura de normativas y rutinas, podría ser oportuno incorporar un ensayo dinámico a la inspección principal de la estructura.

Desde el punto de vista práctico, ¿qué implicaría adoptar los ensayos dinámicos? En el [apartado nº 5.2](#) se exponen los detalles.

4. MÉTODOS ACTUALES DE EVALUACIÓN DE ESTRUCTURAS. LA INSPECCIÓN VISUAL

Los métodos habitualmente empleados para la evaluación del estado de conservación de las estructuras, integrados dentro de los diferentes sistemas globales de gestión de las mismas, pueden variar entre las diferentes administraciones públicas o privadas, aunque de una forma muy genérica se puede decir que la metodología actual se basa normalmente en los siguientes pilares:

- La realización de los diversos tipos de inspección, generalmente dividida en tres niveles, que tal como se definen en

la “Guía para la realización de inspecciones principales de obras de paso en la Red de Carreteras del Estado” [8]:

- o Inspección básica o rutinaria, que es una inspección visual realizada por personal no especializado de las empresas responsables del mantenimiento ordinario de las infraestructuras. Son las inspecciones que se realizan con una mayor frecuencia, normalmente cada 1-2 años. Su objetivo principal es la detección temprana de deterioros para poder así prevenir que estos degeneren en deterioros más graves.
- o Inspección principal o general ([figura 5](#)), realizada por técnicos e ingenieros especializados con formación específica en la inspección y patología de estructuras. La frecuencia varía mucho según las diferentes administraciones, normalmente entre 4 y hasta 10 años, según el caso. Su objetivo es realizar una auscultación visual minuciosa de la estructura y de cada uno de sus elementos, que permita cuantificar, lo más objetivamente posible, el “índice de estado” de la misma. Si se emplean medios de acceso especiales se denomina inspección principal detallada.
- o Inspección especial ([figura 6](#)), que a diferencia de las anteriores no se realiza sistemáticamente, sino que surge a partir de las necesidades detectadas tras cualquiera de las inspecciones anteriores, o tras la ocurrencia de un evento extraordinario. Son las inspecciones de mayor alcance, normalmente orientadas al estudio en profundidad de daños específicos, por lo que suelen conllevar ensayos de caracterización, mediciones complementarias y cálculos estructurales.
- La elaboración de una base de datos que recoge los datos recopilados por las sucesivas inspecciones realizadas, de forma que se puedan consultar los datos obtenidos y analizar la evolución del estado de las estructuras a lo largo del tiempo. La complejidad de la base de datos puede variar desde unas sencillas tablas de datos hasta las aplicaciones específicas de gestión de puentes más complejas, donde se integran los datos de inventario, conservación y planificación de las actuaciones necesarias.

Así, en el panorama actual de la gestión de puentes, tanto en España como a nivel mundial, podemos deducir que, al margen del mayor alcance de las inspecciones especiales, la evaluación del estado de conservación de los puentes se basa fundamentalmente en datos obtenidos a partir de las inspecciones visuales.

Los principales inconvenientes de esta metodología son la subjetividad de los inspectores, el alcance limitado en muchos casos, el tiempo transcurrido entre las distintas inspecciones, la falta de criterios objetivos de valoración para comparar inspecciones realizadas en distintos momentos, así como los medios y plazos necesarios para llevar a cabo las inspecciones visuales de miles de estructuras ([figuras 7 y 8](#)). Por otra parte, la relación entre los daños observados y el comportamiento real de la estructura es muy difícil de establecer y en muchas ocasio-

1 “Índice de estado” – valoración del estado de conservación de una estructura dentro de un rango predeterminado, que permite ordenar las estructuras y priorizar así las actuaciones según la urgencia y gravedad de los deterioros observados.



Figuras 5 y 6. A la izquierda, inspección detallada con camión pasarela. A la derecha, determinación *in-situ* de los parámetros de corrosión, en el marco de una inspección especial. Fuente: GEOCISA.



Figuras 7 y 8. En una inspección visual se pueden evaluar los deterioros de forma cualitativa, y a veces parcialmente cuantitativa (la pérdida de sección de una armadura o la longitud y anchura de las fisuras), pero difícilmente se puede conocer la influencia del daño en el desempeño del elemento. Fuente: GEOCISA.

nes puede estar basada en hipótesis erróneas. La evaluación de estados límites de servicio y de los estados límites últimos conlleva una gran incertidumbre, igualmente. Por otra parte, estas inspecciones no pueden evaluar daños que no presentan síntomas evidentes, o que no son visibles por la existencia de un revestimiento; por ejemplo, el deterioro del tablero bajo el asfalto, la corrosión de los cables de pretensado o una socavación de las cimentaciones. Cabe señalar, también, que las inspecciones visuales no son el método más fiable para evaluar la condición crítica de un puente tras un suceso extraordinario, como un sismo o una riada.

Dicho esto, es importante destacar la labor realizada en los últimos años por parte de diversos gestores de las infraestructuras, encaminada a paliar y reducir los inconvenientes comentados en el párrafo anterior, por ejemplo:

- La formación, el soporte y la ayuda que se ofrece a los operarios que realizan las inspecciones básicas.
- La acreditación exigida en formación y experiencia de los inspectores que realizan las inspecciones principales y especiales.
- La realización de cursos de formación intensiva a los inspectores de inspecciones principales, con el objetivo de reforzar su conocimiento y homogeneizar los criterios que

utilizan, de forma que la subjetividad se reduzca lo máximo posible.

- La supervisión y contraste de los datos obtenidos en las inspecciones principales.
- El empleo de nuevas tecnologías para inspeccionar zonas inaccesibles sin medios de acceso específicos, como el uso de drones (figura 9).
- La mejora constante de los algoritmos que calculan un “índice de estado”, gracias a la propia retroalimentación de los datos obtenidos tras las sucesivas inspecciones.

En resumen, la calidad de las inspecciones visuales y la fiabilidad de los resultados obtenidos son cada vez mayores gracias a estos procesos de mejora continua, y por otra parte, dichas inspecciones siempre serán necesarias porque el ojo humano es insustituible; no obstante, no debemos dejar de reflexionar sobre nuevas formas de mejorarlas, complementarlas y reforzarlas para obtener una información cada vez más precisa sobre el estado real de los puentes [9], aumentando así la eficacia y la efectividad en la toma de decisiones (cómo, dónde y cuándo invertir los recursos disponibles) relacionada con la gestión de una red de infraestructuras, cada vez más numerosa y más envejecida.



Figura 9. Inspección de puente mediante el uso de drones. Fuente: GEOCISA, 2016.

Parece obvio por lo tanto que tenemos por delante un apasionante camino por recorrer, más o menos largo en función de lo que se apueste por él, desde el estado actual hacia una red de “estructuras inteligentes”. Para poder recorrerlo será necesario, por un lado, incrementar la investigación y el estudio de nuevas técnicas, y por otro implementar una educación multi-disciplinar de los ingenieros que realicen las inspecciones, para que abarque un conocimiento más profundo sobre el comportamiento estructural, la innovación tecnológica y los sistemas de información.

5. MONITORIZACIÓN DE LA SALUD ESTRUCTURAL

Como ya se ha comentado en la introducción del presente artículo, la evaluación del comportamiento estructural de los puentes mediante su instrumentación y monitorización ha sido un tema de interés e investigación mundial desde hace tiempo. Se han estudiado sobre todo aspectos problemáticos de la operativa en sí, como la validez de los resultados y las diferencias entre una monitorización continua y otra intermitente, la monitorización a corto o a largo plazo, las diferentes formas de medir respuestas globales y locales, y especialmente las dificultades en la interpretación de los datos que se obtienen. El objetivo, en todo caso, ha sido y sigue siendo, obtener el estado de las estructuras mediante sistemas fiables, ágiles y de fácil aplicación e interpretación, y a ser posible dentro del marco operacional del puente (es decir, obtener datos únicamente a partir del tráfico habitual o acciones ambientales, como fuente de excitación).

Para empezar, debemos ser conscientes de las dificultades para lograr este objetivo debido a que muchos de los datos fundamentales de los puentes suelen ser desconocidos:

- El estado de la estructura *as-built*, en cuanto a tensiones iniciales, rigidez global y rigideces locales, etc.
- La determinación precisa de conceptos como los estados límite de servicio, la seguridad, la vida útil, etc.
- Un conocimiento exhaustivo de las cargas actuantes, de los mecanismos de deterioro, de los modos de fallo y de cómo

estos se ven afectados por distintos tipos de daños, etc.

- Por no mencionar que en muchos casos se carece hasta de una definición geométrica precisa.

Por supuesto, también existen problemas relacionados con la tecnología, tales como la adquisición de datos en campo de forma fiable y precisa, la interpretación posterior de estos datos y el tratamiento de la información.

En general, una metodología de auscultación debe seguir el esquema IMA, que integra tres fases claramente diferenciadas: la *instrumentación* (conjunto de sensores y adquisición de datos), la *monitorización* (gestión de datos) y el *análisis* (comprensión del comportamiento estructural). El enfoque de la auscultación se puede clasificar en tres grandes grupos:

- Auscultación topográfica, con el objeto de controlar movimientos o incluso generar un modelo digital BIM del puente (escaneos en 3D). Es esta una posibilidad sin duda de gran interés, pero difícil de extender a un gran número de puentes por su elevado coste, tiempo requerido y la complejidad de la tarea. A pesar de esto hay que reconocer que se está avanzando enormemente en la reducción de los tiempos de escaneado, así como en el aumento de la resolución de los resultados.
- Auscultación estática, dentro de la cual se pueden utilizar una gran variedad de sensores para registrar múltiples variables como tensiones, fuerzas, reacciones en los apoyos, giros, desplazamientos relativos, parámetros atmosféricos, etc. Como limitación principal encontramos que la mayor parte de las acciones a las que se ven sometidas las estructuras tienen una naturaleza “dinámica” y, por ende, la respuesta de la estructura, por lo que al intentar captarlas con frecuencias de adquisición “estáticas” (una muestra al día, en el mejor de los casos) no somos capaces de caracterizar estos eventos. Sin embargo, tienen su campo de aplicación bien definido siempre que se conozca el carácter del fenómeno que se esté estudiando. En cualquier caso, resultan un buen complemento para la auscultación dinámica, sobre todo para estudiar el efecto de factores ambientales (ciclos anuales de temperaturas).

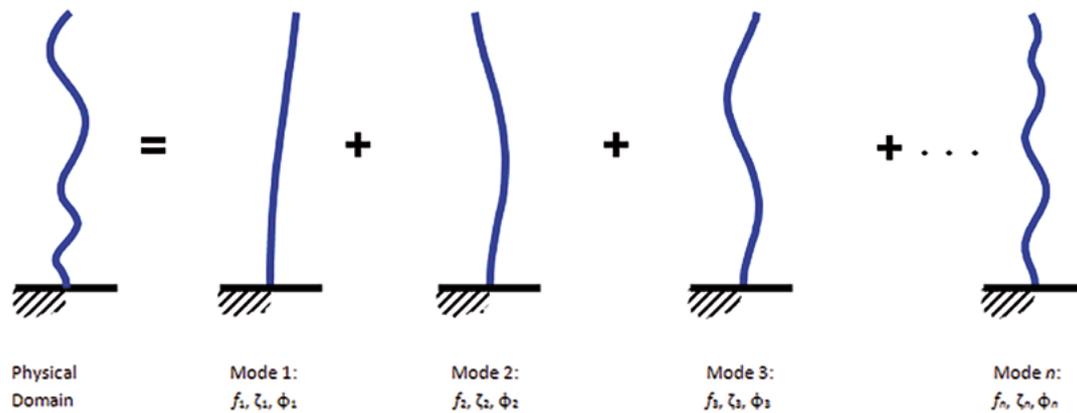


Figura 10. Descomposición de un movimiento real en sus modos naturales de vibrar [10].

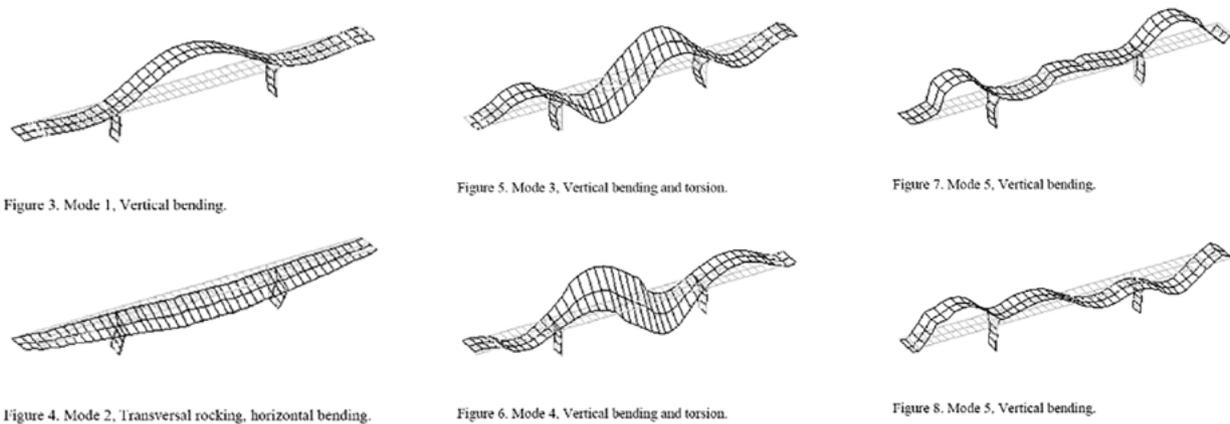


Figura 11. Ejemplos de modos de vibración, flexionales y torsionales del Swiss Z24 Highway Bridge [11].

- Auscultación dinámica, basada fundamentalmente en la medida de vibraciones a través de acelerómetros (aunque también se pueden emplear vibrómetros láser, geófonos o sismómetros). Requiere del empleo de un mayor número de acelerómetros respecto a lo que encontramos, actualmente, en los ensayos dinámicos, como, p.ej. los de pruebas de carga, donde se emplea un único acelerómetro por cada vano, además de una mayor sensibilidad de estos (en torno a 10 V/g). Por otro lado, la adquisición se hace a frecuencias de muestreo altas. A pesar de presentar los puentes frecuencias naturales esperadas bajas, normalmente bajo los 15 Hz (depende mucho del tipo de estructura) y tener presente el teorema de Nyquist-Shannon (simplificando, la frecuencia de muestreo debe ser igual o superior al doble de la frecuencia estudiada), es común muestrear a varios cientos de Hz de frecuencia (en un muestreo de 100 Hz se interroga cada sensor de la red 100 veces en un segundo), aunque en el pretratamiento se diezmen los registros. Otro aspecto importante es el del sincronismo entre sensores para poder mantener la fase (coherencia) a lo largo de toda la estructura. Esto que, en una red cableada, empleando un *datalogger* adecuado, queda salvado, en una red inalámbrica se torna en su “tallón de Aquiles”.

Por otra parte, existen diversas técnicas probadas y utilizadas desde hace tiempo y viables técnicamente, orientadas hacia la

evaluación estructural mediante ensayos no destructivos, tales como la termografía infrarroja, el georradar, la emisión acústica o las corrientes de Eddy. Estas técnicas pueden funcionar bastante bien para un estudio específico si el daño está más o menos localizado, pero plantear estas técnicas como un método de evaluación global de la salud estructural puede ser bastante costoso en tiempo y dinero, además de necesitar un gran número de sensores, que a su vez requieren una calibración frecuente, además de la especial dificultad que suelen presentar en la interpretación de los resultados.

De todos los sistemas de auscultación expuestos, el presente artículo se centrará en la auscultación dinámica y el análisis modal, por sus ventajas comparativas.

5.1. La dinámica y el análisis modal

Todas las estructuras vibran y presentan, de manera intrínseca, unos parámetros dinámicos, capaces de definir las desde el punto de vista de su comportamiento dinámico, en un instante determinado (“foto”). Estos parámetros son los modos de vibrar y la frecuencia y amortiguamiento asociados a cada uno de estos modos y pueden extraerse mediante análisis modal.

El análisis modal descompone el movimiento real complejo de una estructura, captado por sensores (p.ej. acelerómetros), en una superposición de modos de vibración natural con sus correspondientes frecuencias y amortiguamientos, es decir, sus parámetros dinámicos (figuras 10 y 11).

Los parámetros a los que se hace alusión se pueden extraer, en general, mediante tres procedimientos:

- Análisis Modal Experimental (AME). En este análisis, los parámetros dinámicos se obtienen de las funciones de respuesta en frecuencia (FRF) que relacionan la respuesta de la estructura (salida) con la excitación (entrada). También se le conoce como análisis “*Input-Output*” puesto que precisa conocer la entrada y la salida del sistema. Se requiere que la única excitación de la estructura provenga de un excitador controlado (*shakers*, martillos, liberaciones súbitas de cargas). La excitación ambiental es tratada como una fuente de ruido no deseada.
- Análisis modal Operacional (AMO). Este tipo de análisis permite la obtención de los parámetros dinámicos a partir de la medida, exclusivamente, de la respuesta dinámica de una estructura frente a las acciones ambientales (viento, sismo, etc) y operacionales (tráfico). Las fuerzas de entrada al sistema no se miden, por eso también son conocidos como análisis “*Output-only*”. Los ensayos se realizan con tráfico real y en condiciones de operación, lo que minimiza el trastorno ocasionado al servicio. Para garantizar unos buenos resultados, la excitación debe parecerse lo máximo posible a un “*Ruido blanco*” (señal aleatoria cuya densidad espectral de potencia es una constante; es decir, la señal contiene todas las frecuencias y todas ellas muestran la misma potencia). Estas técnicas están especialmente indicadas para extraer parámetros dinámicos de grandes estructuras, que son difíciles de excitar artificialmente y resulta igualmente dificultoso asegurar una única fuente de excitación durante el ensayo (requerimientos del AME). Esto ha aumentado enormemente el alcance de los análisis modales, extendiéndose a grandes estructuras como los puentes, aerogeneradores, presas, estadios, rascacielos, o grandes catedrales.
- También se puede aplicar un tercer método, basado en la combinación de los dos anteriores, conocido como Análisis Modal Operacional con entradas Exógenas (AMOX).

Debido a que las restricciones que impone el AME (excitación conocida y aislada, y el empleo de excitadores de gran tamaño), chocan, frontalmente, con la premisa fundamental de cualquier administrador, que es mantener siempre el servicio, nos centraremos en el AMO, que se adapta mucho mejor a la realidad de las estructuras en servicio. A pesar de esto, a la hora de abordar un estudio, es interesante valorar todas las alternativas para poder garantizar el éxito.

Otras consideraciones sobre esta metodología son:

- Se debe tener especial precaución al investigar los puentes muy flexibles o de grandes luces. En estos casos, en los que las frecuencias naturales son bajas (< 1 Hz), el empleo de acelerómetros en lugar de sensores de velocidad, unido a la interpretación posterior de los datos en términos del espectro de aceleraciones en vez del espectro de desplazamientos, puede dar lugar a un error importante en la determinación del modo fundamental de la estructura.
- Otro aspecto destacable es la diferencia entre un análisis modal operacional y el análisis modal experimental. Diversos estudios realizados indican que bajo condiciones ambientales (el tráfico habitual) se obtiene una represen-

tación totalmente diferente de los modos de vibración, y bastante más clara que la obtenida mediante excitaciones externas. Esto se debe a que las excitaciones externas son cargas puntuales verticales inducen la respuesta vertical del puente, pero no la horizontal que sí se registra bajo condiciones ambientales.

Dentro ya del AMO, vamos a explorar algunas de sus fases para entender mejor aquello de la idoneidad para las estructuras en servicio.

- Como fase previa, siempre es recomendable disponer de un modelo de la estructura aproximado, que ofrecerá un primer tanteo a la hora de identificar el número y la posición de los sensores requeridos.
- La toma de datos, salvo que se disponga de un gran número de acelerómetros, se suele realizar a partir de grupos de instrumentación, comúnmente llamados setups, por lo que de esta manera limitamos la distancia entre el *datalogger* y los sensores (algo interesante tanto si la red es cableada como si se hace de manera inalámbrica) y limitamos, igualmente, el número de sensores a emplear.
- Debido a que se emplean grupos de instrumentación para una misma estructura, es necesario establecer algún tipo de continuidad. Esto se hace por medio de unos acelerómetros de referencia que permanecerán constantemente en la misma ubicación durante todos los *setups* mientras el resto se mueven para poder cubrir toda la estructura (por lo general puntos del tablero, aunque puede extenderse a pilas, pilonos, arcos, etc.). Es primordial colocar estos sensores de referencia en puntos que presenten un nivel de vibración representativo en la mayoría de los modos a estudiar. Una vez más, se le vuelve a sacar partido al modelo de la fase previa para evitar colocar estos sensores en antinodos.
- La duración de los setups está relacionada con las frecuencias naturales esperadas. Es comúnmente aceptado [12] que la duración de los registros debería estar entre 1000 y 2000 veces el periodo de la frecuencia fundamental de la estructura. En la práctica, se suelen emplear registros de unos 20-30 min. Como ejemplo, en el ensayo dinámico realizado por el Laboratorio de Vibraciones y monitorización (ViBest) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Oporto (FEUP) en el viaducto de *Millau* [13]. Los registros temporales fueron de 16 min. de duración y se emplearon un total de 13 *setups* para cubrir los 2.460 m de longitud del que en el momento de su construcción fue el puente atirantado más grande del mundo. El ensayo se completó en 5 horas (figuras 12 y 13).
- Pretratamiento de datos, diezmado, eliminación de frecuencias espurias, etc.
- Extracción de los parámetros dinámicos mediante métodos basados en algoritmos, que se pueden agrupar en dos grandes familias [14]. Seguidamente se citan los más utilizados de cada una de ellas:
 - o Métodos en el dominio de la frecuencia, que fueron los primeros en utilizarse. Podríamos destacar el denominado *Peak-Picking* (PP) y el *Frequency Domain Decomposition* (FDD).
 - o Métodos en el dominio del tiempo como el NEXt (*Natural Excitation Technique*), el ERA (*Eigensystem*



Figuras 12 y 13. Viaducto de Millau. Fuente ViBest.

Realization Algorithm) y el de Identificación de Subespacios Estocásticos (SSI) con sus respectivas variaciones SSI, COV y SSI

- Y finalmente, la interpretación de resultados mediante comparación con modelo calibrado o estados de referencia previos.

Por lo tanto, algunas de las ventajas del AMO frente a otros métodos son:

- o La medida puede realizarse en condiciones de funcionamiento de la estructura, no afectando al servicio de esta.
- o Como la fuente de excitación es la producida por los factores operacionales y/o ambientales, no se necesitan equipos de excitación externa de la estructura, por lo que es más económico, sencillo y seguro.
- o Solo requiere la colocación de los sensores sobre la estructura, por lo que resulta bastante rápido.
- o La respuesta medida es representativa de las condiciones de contorno reales de la estructura.

Las variaciones térmicas afectan, en gran medida, a las frecuencias naturales de las estructuras, esto es un hecho importante que debe tenerse en cuenta siempre. Se han llegado a constatar en estructuras especialmente sensibles, como pasarelas peatonales, variaciones en un rango de 15,3% - 21,4% a lo largo de un ciclo térmico [15].

En general, las variaciones de estos parámetros dinámicos (tomados en sucesivos ensayos), pueden deberse a varios factores como los ambientales (temperatura, humedad o la acción del viento), variaciones en la masa o la rigidez, o bien, variaciones en las condiciones de contorno de las estructuras. Estos dos últimos casos permiten evidenciar la presencia de deterioros en las estructuras siempre que seamos capaces de aislar el efecto de los factores ambientales previamente [16,17,18]:

- En cuanto a las variaciones de masa y rigidez, se trata de propiedades físicas intrínsecas a cada estructura especialmente importantes para la monitorización de la salud estructural. En condiciones normales, la masa de una estructura permanecerá constante antes y después de la ocurrencia de un daño, por lo que los cambios en

su rigidez, reflejados en variaciones en las frecuencias y modos de vibrar, constituirán el principal indicador de la existencia de dicho daño.

- Con respecto a las variaciones de las condiciones de contorno, permitiría detectar, entre otros, funcionamiento inadecuado de aparatos de apoyo, asientos en pilas o estribos y deterioros en dispositivos antisísmicos.

5.2. Monitorización dinámica de la superestructura de los puentes

Se expone a continuación un ejemplo (figura 14) sobre la realización de un ensayo dinámico para la obtención de los parámetros dinámicos de un puente, empleando la configuración más sencilla, un único vano, simplemente apoyado (de forma general también sería aplicable para tableros isostáticos de varios vanos). De nuestro modelo preliminar de la estructura obtendríamos, entre otras cosas (frecuencias y amortiguamientos), los cuatro primeros modos de vibración a flexión (figura 14) [19].

Estos son los desplazamientos a caracterizar y para ello, tendremos que colocar puntos de medida en el tablero de ese hipotético puente. Las mejores ubicaciones para conseguirlo serán las secciones de centro de vano y cuarto de vano. Con

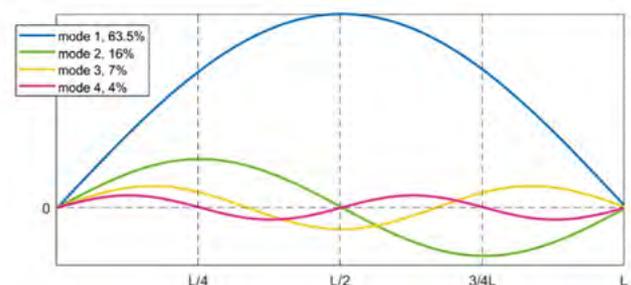


Figura 14. Primeros cuatro modos de flexión de una viga biapoyada de longitud L y porcentajes del factor de participación modal. En abscisas, ubicación en un vano de longitud L, en ordenadas desplazamiento y el cuadro, factor de participación modal.

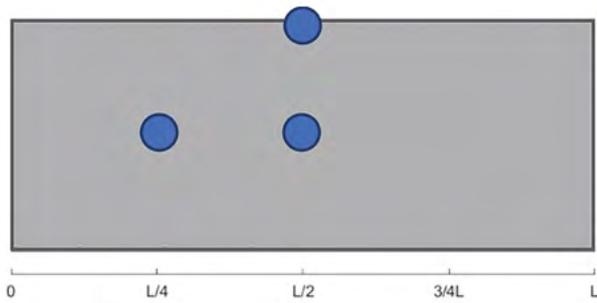


Figura 15 Ubicación ideal en planta del tablero de los puntos de medida mínimos.

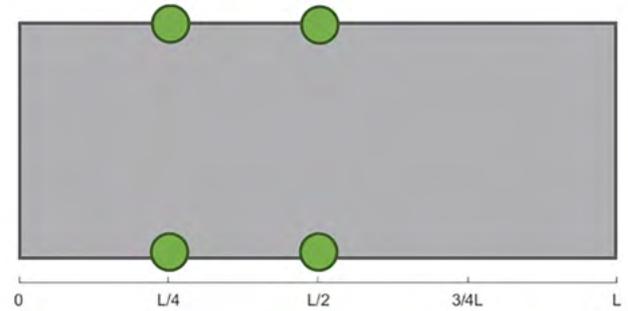


Figura 16. Ubicación realista en planta del tablero de los puntos de medida mínimos.

esta disposición evitaríamos ubicar puntos de medida en antinodos (puntos sin movimiento) de los tres primeros modos, los de mayor relevancia.

Dentro de cada una de las secciones ($L/2$ y $L/4$), para captar los modos de flexión bastaría con disponer de un punto de medida en el eje del tablero. Sin embargo, para medir los modos de torsión tendríamos que ubicar un punto de medida, de la sección de centro de vano, lo más alejado posible del eje de torsión (el eje del tablero en este caso), por ello, optamos por el extremo del tablero. En conclusión, necesitaríamos 3 puntos de medida (figura 15).

Puesto que el ensayo de ese hipotético puente ha de desarrollarse en condiciones de operación y no queremos interrumpir el servicio, lo adecuado es disponer los puntos de medida en los extremos del tablero, como puede verse en el gráfico de la derecha (figura 16).

Por ello, como requisitos tendríamos:

- Modelo preliminar de la estructura que nos aporta información para dimensionar y definir el ensayo dinámico.
- Empleo de 4 acelerómetros (como referencia, en los ensayos de Pruebas de Carga en su parte dinámica, se pide un acelerómetro por vano). Aunque con tres sería estrictamente suficiente, añadir un cuarto aporta redundancia, aumentando la seguridad y calidad de la adquisición, sin elevar mucho el número de sensores.
- Capacidad para adquirir los registros de esos acelerómetros, distribuidos en todo el tablero, manteniendo en todo momento el sincronismo entre sensores. Existen muchas opciones de instrumentación, en general, en caso de tener la red cableada, el *datalogger* aportaría adquisición sincronizada. Si se opta por equipos inalámbricos en pro de reducir los tiempos de instalación y desmontaje, el sincronismo puede hacerse mediante la propia red inalámbrica o bien a través de la conexión de un GPS a cada sensor (figura 17). Otra opción es emplear un sistema mixto en el que una serie de sensores se cablean a un *datalogger* inalámbrico sincronizado con GPS con el resto de *dataloggers*.
- La propia adquisición. Puesto que los sensores son de reducido tamaño y se ubican de tal forma que no afectarían al tráfico, solo habría que dedicar unos pocos minutos del tiempo de una hipotética inspección, para tener información suficiente. Se podrían preparar protocolos de medida adaptados a distintas tipologías de puentes, de tal modo

que el personal que realiza cualquier inspección pudiese ocuparse de esta tarea.

- Envío de datos. Como opción más versátil, la mayor parte de los equipos inalámbricos por su propia naturaleza, cuentan módulos 4G (o hasta 5G) para la comunicación remota. A través de estas redes los datos podrían llegar al gabinete para la siguiente fase del proceso, pocos segundos después de ser adquiridos. La otra posibilidad sería el almacenamiento en tarjetas de datos y posterior envío.
- Para el procesamiento de los registros dinámicos ambientales y operacionales, mediante técnicas de AMO, sería necesario un software de análisis modal.



Figura 17. Equipos de medida de aceleraciones inalámbricos para análisis modal. Fuente: GEOCISA, 2021.

Con todo esto, se pretende hacer ver que la incorporación de los ensayos dinámicos a las tareas habituales de inspección y mantenimiento de puentes es factible y aporta una información de gran valor en la toma de decisiones por parte del administrador y en el aumento del conocimiento del comportamiento real de las estructuras.

5.3. Evaluación dinámica de la subestructura de los puentes

Uno de los objetivos fundamentales de la evaluación del estado de los puentes debe ser el de obtener información precisa sobre

el estado de sus subestructuras, es decir, de sus elementos de soporte: cimentaciones, pilas y estribos. Estos elementos, que soportan el tablero, presentan una gran vulnerabilidad sobre todo ante los eventos extraordinarios que con mayor frecuencia pueden producir el colapso de las estructuras: las riadas y los sismos.

En el caso de las riadas, la socavación puede provocar la rápida disminución de la capacidad portante de las cimentaciones. En el caso de los sismos, se pueden producir efectos adversos como la licuefacción de los suelos, la pérdida de ese suelo bajo las cimentaciones o incluso fenómenos de resonancia, en el supuesto de que la frecuencia natural del puente sea similar a la del movimiento del terreno, en cuyo caso se podrían producir importantes movimientos y deformaciones. Por otra parte, en muchas ocasiones es imposible conocer el tipo de cimentación de una estructura, o si es superficial o profunda, lo que impide evaluar su vulnerabilidad con los típicos métodos hidráulicos y geotécnicos.

Por todo ello, resulta de gran importancia evaluar la vulnerabilidad de las cimentaciones de un puente frente a la socavación y los sismos o bien monitorizarlas, de forma que se pueda actuar de manera preventiva para evitar el coste social y económico que supondría un posible fallo de esos elementos del puente.

Un posible y prometedor enfoque para averiguar tanto el tipo de cimentación como su estado de conservación sería mediante un análisis dinámico. Aunque se trata de una técnica mucho más desarrollada para analizar el comportamiento de los tableros de los puentes, es de aplicación también para la evaluación de la subestructura.

Así, los principales objetivos de un ensayo dinámico en la subestructura de un puente podrían ser determinar, en una toma de datos inicial, su rigidez global y su tipología, y posteriormente repetir estos ensayos dinámicos, en ciertos intervalos de tiempo o tras la ocurrencia de un evento extraordinario, como un sismo o una riada para conocer su estado mediante comparación con el estado de referencia.

Es importante señalar que, a diferencia del ensayo dinámico de la superestructura, que puede realizarse en modo operacional, en el caso de la subestructura, por su mayor rigidez, es necesario introducir una excitación externa (AME) aplicada desde la plataforma y sobre la vertical de la pila. Sin embargo, hay líneas de investigación abiertas basadas exclusivamente en medidas ambientales y operacionales (AMO) [20]. El modo óptimo de introducir esta excitación externa sería mediante un vibrador sísmico, que es un dispositivo montado en un camión o un *buggy* que es capaz de inyectar vibraciones de baja frecuencia en la tierra, técnica de exploración sísmica conocida como “*Vibroseis*” (figura 18). Otras alternativas de menor coste, pero también de menor eficacia para excitar la subestructura, serían el empleo de martillos de impacto o vibradores modales (o *shakers*).

Para el estudio de la viabilidad y fiabilidad de los análisis dinámicos orientados a averiguar el tipo de cimentación y su vulnerabilidad frente a sismos y riadas, son necesarios, de forma especial, el interés de las administraciones en esta línea y su colaboración para ofrecer obras de paso que se vayan a demoler. En Estados Unidos, la *Federal Highway Administration* ya ha realizado estudios en esta línea [22], realizando detallados ensayos dinámicos en puentes objeto de demolición, registran-



Figura 18. Ensayo dinámico de la pila de un puente mediante vibrador sísmico. Fuente: [21].



Figuras 19 y 20. Arriba, simulación de socavación en la cimentación de una pila. Abajo, simulación de daños por sismo. Fuente: Catbas, F.N. (1997).

do su comportamiento al ir produciendo daños progresivos en las cimentaciones (excavaciones para simular la socavación por una riada y rotura de las cimentaciones para simular los daños por un sismo) (figuras 19 y 20). Se obtuvieron resultados prometedores y se demostró la eficacia del análisis dinámico para la detección del daño, aunque deben seguir realizándose estudios de este tipo [23] para poder aplicar el método con la fiabilidad requerida.

6. CONCLUSIONES

Es innegable que la operatividad y seguridad de las redes de transporte constituyen un pilar básico para el bienestar social y

económico de un país. Los puentes, muchos de ellos cerca del fin de su vida útil, son unos elementos críticos dentro de estas redes, por lo que una gestión óptima de los mismos, que ayude a decidir dónde, cómo y cuándo invertir los recursos disponibles para mantenerlos, rehabilitarlos o sustituirlos es un tema de vital importancia.

Una gestión eficaz del parque de puentes de una red de transporte debe analizar una importante cantidad de datos, tanto de inventario (localización, número, dimensiones y tipologías) como de evaluación de su conservación, de forma que se conozca el estado de condición de cada uno de sus elementos. La gestión deberá incluir también el coste de las actuaciones de mantenimiento y reparación necesarias, así como predicciones del comportamiento futuro de los puentes que permitan una óptima planificación de los recursos.

La evaluación del estado de conservación de los puentes se realiza actualmente de forma mayoritaria a través de las inspecciones visuales. Estas han mejorado mucho en los últimos años, gracias a la mayor especialización que se les exige a los inspectores, al incremento de la formación específica y a la optimización de los criterios para homogeneizar los resultados obtenidos. Aun así, hay cierto componente subjetivo que hay que tratar de mitigar, por no mencionar que una inspección visual no puede detectar daños internos o deterioros sin síntomas evidentes. Por todo ello, a pesar de que las inspecciones visuales siempre serán necesarias y parte fundamental de la gestión de los puentes, debemos reflexionar sobre la incorporación de otras técnicas, como parte integrante de la evaluación del estado de un parque de estructuras, que aporten más información, precisión y objetividad a la información aportada a los administradores para la toma de decisiones dentro de la gestión de las estructuras.

Los parámetros dinámicos deben entenderse como información del comportamiento real de las estructuras, en sus condiciones de contorno, y su análisis ofrece múltiples prestaciones en la mejora de la gestión de los puentes, como los que se enumeran a continuación:

- Aporta un mayor conocimiento del comportamiento dinámico global de la estructura, o de algún elemento de esta, que por su importancia nos interesa controlar.
- La calibración de modelos numéricos que sirvan de base para proyectos de rehabilitación, refuerzo, ampliación o en general cambio en las condiciones de trabajo de estructuras.
- Permite la monitorización, de forma continua o discreta de la salud de las estructuras.
- Puede ayudar a establecer un plan específico relativo a la frecuencia de inspección de las estructuras, lo que permitiría optimizar los recursos.
- Puede alertar sobre la existencia de un daño sin síntomas aparentes y que por lo tanto podría pasar desapercibido en una inspección visual.
- Control del estado de elementos sensibles de algunas estructuras como pueden ser los tirantes, cimentaciones, elementos de apoyo, dispositivos sísmicos, entre otros.
- Evaluaciones de vibraciones relacionadas con el cumplimiento estados límite de servicio (vibraciones excesivas), para estructuras con tráfico de peatones, incluyendo tanto las pasarelas como los puentes de carretera con aceras peatonales, así como, para estructuras con tráfico de vehículos exclusivamente.

- Evaluaciones rápidas del estado de conservación de estructuras tras eventos excepcionales (tormentas, riadas, accidentes, deterioros graves, etc.). Este caso, de aplicación a estructuras críticas, requeriría de referencias previas para establecer comparaciones o la elaboración de un modelo calibrado con datos reales. Para ello será esencial la investigación en estructuras previas a su demolición, en diferentes escenarios con daño controlado que simulasen la ocurrencia de un evento como se hizo en el paso superior Z24 en Suiza coordinado por KU Leuven [24,25].

Es importante, a la hora de decidir, no olvidar que los deterioros, el envejecimiento, el aumento de las cargas del tráfico y los episodios ambientales cada vez más adversos, que afectan a nuestras estructuras, siguen inexorablemente una curva ascendente.

Agradecimientos

Sabio, culto y ameno como pocos, Luis Ortega Basagoiti superaba todo lo que de él se pueda decir aquí. Será difícil volver a conocer a una persona de tanta valía profesional y que al mismo tiempo resultara tan cercana y sencilla. Maestro, compañero y amigo inolvidable.

En el plano técnico, nos gustaría destacar, entre sus innumerables contribuciones, la realizada en la redacción de la ITPF-05, normativa que establece y regula la realización de inspecciones y pruebas de carga en puentes de ferrocarril.

Referencias

- [1] Aktan, A.E., Catbas, F.N. et al. Health monitoring for effective management of infrastructure. *Proceedings of SPIE*, 4696 17.
- [2] Glaser, S.D, Tolman, A. (2008) Sense of Sensing: From Data to Informed Decisions for the Built Environment. *Journal of Infrastructure Systems*, 14(1), 4-14.
- [3] Aktan, A.E. et al. (1997) Issues in health monitoring for intelligent infrastructure. *University of Cincinnati Infrastructure Institute*.
- [4] <https://victoryepes.blogs.upv.es/2020/09/29/the-asset-time-bomb/>
- [5] Thurlby, R. (2013). Managing the asset time bomb: a system dynamics approach. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Forensic Engineering*, 166(3):134-142.
- [6] <https://www.boe.es/eli/es/o/2005/06/10/fom1951> ITPF-05.
- [7] http://www.adif.es/es_ES/empresas_servicios/normativa_tecnica/normativa_tecnica.shtml. Redacción y aprobación de Normativa Técnica, Adif.
- [8] https://www.mitma.gob.es/recursos_mfom/0870250.pdf “Guía para la realización de inspecciones principales en las obras de paso de la Red de Carreteras del Estado”
- [9] Lenett, M.S., et al. “Subjective and objective evaluations of bridge damage”. *Journal of the Transportation Research Board, J. Transp.Res.* Board, 1688 76-86.
- [10] ARTEMIS Modal Technical Reviews. Experimental Modal Analysis and Operational modal Analysis
- [11] IBrincker, R., & Andersen, P. (2002). Identification of the Swiss Z24 Highway Bridge by Frequency Domain Decomposition. In *Proceedings of IMAC 20: A Conference on Structural Dynamics*: February 4-7.
- [12] Cantieni, R. (2005) Experimental methods used in system identification of civil engineering structures. *Proc. 1st IOMAC, International Operational Modal Analysis Conference*, April 26-27, Copenhagen, Denmark, pp. 249-260.
- [13] Magalhães, F., Caetano, E., Cunha, A., Flamaud, O., Grillaud, G., Ambient and free vibration tests of the Millau Viaduct: Evaluation of alternative processing strategies, ISSN 0141-0296.

- [14] Rainieri, C., Fabbrocino, G., Operational Modal Analysis of Civil Engineering Structures.
- [15] Cunha, A., Caetano, E., et al. Continuous Dynamic monitoring of bridges: Different perspectives of application.
- [16] Aktan, A.E., Lee, K.L. et al. Modal testing for structural identification and condition assessment of constructed facilities. *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, 2251 462.
- [17] Catbas, F.N. (1997). Investigation of global condition assessment and structural damage identification of bridges with dynamic testing and modal analysis. University of Cincinnati.
- [18] Magalhães, F., Cunha, A., Caetano, E., Vibration based structural health monitoring of an arch bridge: From automated OMA to damage detection.
- [19] Castellaro, S., Isani, S. (2019) Experimental Modal Analysis of Bridges; How to Employ Few Resources and Get it Right. *Fasttimes* Vol. 24, 3.
- [20] [PROYECTO TO-BM.pdf](#) (grupoacs.com).
- [21] <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/geotechnical/03089>.
- [22] "Dynamic Bridge Substructure Evaluation and Monitoring". Publication NO. FHWA-RD-03-089
- [23] Qiang Mao et al. (2016) "Dynamic Evaluation of a Bridge Substructure with Experimental Modal Analysis".
- [24] Torres Goitia, J.J. (2010) "A comparison and evaluation of different dynamic characterization approaches for bridges". University of Arkansas.
- [25] [Z24 Bridge benchmark – Structural Mechanics](#) (kuleuven.be).