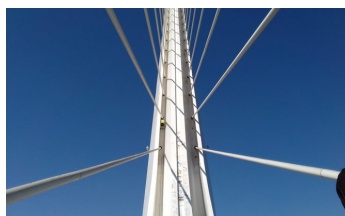


Estrategia avanzada de inspección y seguimiento para el Puente del Alamillo



Advanced inspection and monitoring strategy for the Alamillo Bridge

José Joaquín Hernández Martínez

Director del Contrato de conservación de carreteras zona Oeste de Sevilla

José E. Álvarez Giménez

Jefe Servicio Carreteras Delegación Territorial de Fomento, Articulación del Territorio y Vivienda de Sevilla

Raúl Díaz Álvarez

IMESAPI, S.A.

El Puente del Alamillo, por su concepción estructural y tamaño, es uno de los Puentes más singulares con los que contamos en España, y el hecho de ser un puente atirantado y no contar con tirantes en la retenida constituyó un hito en su momento.

Una vez que ha superado los 30 años de vida, y contando con tirantes como elemento fundamental de su concepto resistente, un planteamiento avanzado de inspección y seguimiento se hace imprescindible para un adecuado mantenimiento del mismo.

Tareas como la realización de una inspección especial de los tirantes, usando las más modernas técnicas, la generación de un modelo digital del Puente y la auscultación del mismo han formado parte de esta estrategia descrita en el artículo, y siempre bajo la supervisión y coordinación de expertos de reconocido prestigio en el ámbito de los Puentes.

The Alamillo Bridge, due to its structural concept and dimensions, is one of the most unique bridges in Spain. Being a cable-stayed bridge and not having retaining stay cables became a landmark job in its conception

Once the bridge has reached 30 years of service life, and having critical components such as the cables themselves, it is advisable to carry out an advanced inspection and monitoring approach to achieve proper maintenance and ensure a long service life.

The strategy developed, which is outlined in the article, includes a special inspection of the stay cables using the latest techniques, the creation of a digital twin model, and the auscultation and instrumentation of the bridge, among other technical works, always under the supervision and coordination of recognised experts in the field of bridges.

Introducción

El Puente del Alamillo se encuentra en Sevilla, en la carretera autonómica A-8083, la cual da continuidad a la ronda de circunvalación SE-30 de Sevilla salvando la dársena de San Jerónimo en su zona norte, y se encuentra encuadrado dentro del contrato de conservación integral de carreteras de nombre "Servicios de diversas operaciones de conservación en las carreteras de la zona oeste del Área Metropolitana de la provincia de Sevilla" y Clave: 07 – SE – 2 6 8 9 - 0.0 - 0.0 – GI, promovido por la Junta de Andalucía y del que es adjudicatario IMESAPI, S.A.

La empresa cuenta entre sus actividades la de la conservación de carreteras, disciplina en la que se encuentra entre las empresas punteras del sector y para la que cuenta con una sensibilidad especial, puesta de manifiesto en casos especiales como el que nos ocupa: el mantenimiento avanzado de una estructura singular como es el Puente del Alamillo.

Así IMESAPI S.A cuenta con los conocimientos del estado y evolución del Puente del Alamillo, generado a través de la experiencia de su conservación durante años, habiendo participado y estado presente en inspecciones, operaciones de mantenimiento, obras de mejora...y accediendo a la documentación técnica existente de la estructura, tanto original como generada en el tiempo. Además cuenta con una vasta experiencia de conservación y mantenimiento en Puentes atirantados, entre los que se encuentran además del propio Puente del Alamillo, el Puente del Centenario, Sevilla (1.997-2.019) y el Puente de la Constitución de 1.812, Cádiz (2.015-2.024). Todo lo anterior permite una visión sobre la estructura y sus necesidades que lo sitúa en un plano privilegiado para proponer un planteamiento general

del mantenimiento cooperando en ella con la Consejería de Fomento, Articulación del Territorio y Vivienda de la Junta de Andalucía.

En el presente artículo veremos la estrategia de conservación y seguimiento avanzado del estado del Puente del Alamillo, llevado a cabo conjuntamente con la Dirección General de Carreteras de la Consejería de Fomento, Articulación del Territorio y Vivienda, así como el conjunto de razones y justificación técnica que ha llevado a que esta se haya implementado.

En primer lugar se hará una breve descripción del Puente y su esquema de trabajo estructural, lo que ya nos dará una primera idea acerca de su singularidad, a continuación se expondrán una serie de razones técnicas, que sumadas a acontecimientos recientes en puentes similares a nuestro entender justifican la necesidad del empleo de técnicas avanzadas para la inspección y evaluación del estado del Puente, y por último se describirá la estrategia seguida, y las actividades que ha contenido ésta así como las conclusiones obtenidas.

Descripción de la estructura

El Puente fue construido con motivo Exposición Universal de Sevilla del año 1.992, con lo cual cuenta con una edad superior a los 30 años y constituye una de las actuaciones de

mayor envergadura y singularidad que haya acometido la Junta de Andalucía en materia de obra pública.

Para comprender la especial atención requerida por este Puente comenzaremos con una breve descripción del mismo, a partir de la cual se podrá asumir su especial singularidad.

Por sus dimensiones, luz de 200 m., pilono de 141 m. de longitud y formando 32 ° con la vertical, y su tipología estructural, atirantamiento central en arpa con cables paralelos anclados en un pilón con forma de mástil y en el centro del tablero, sin tirantes de retenida, constituyó en su momento un hito en lo que a diseño y construcción de puentes se refiere: trabaja como una balanza, equilibrando los pesos propios de pilono y tablero, con lo que los márgenes de seguridad para la estabilidad global de la estructura los tiene que aportar la rigidez que proporcione la cimentación del pilono, en la que se encuentran encastrados tanto pilono como tablero. (Figura 1)

Una construcción de esta envergadura y con este esquema resistente tan novedoso precisó de un control de ejecución muy preciso, por lo que fue instrumentado profusamente durante esta fase. Este sistema de auscultación una vez finalizadas las obras se abandonó y finalmente se perdió.

Como hemos dicho el Puente cuenta con una única luz libre de 200 m., y

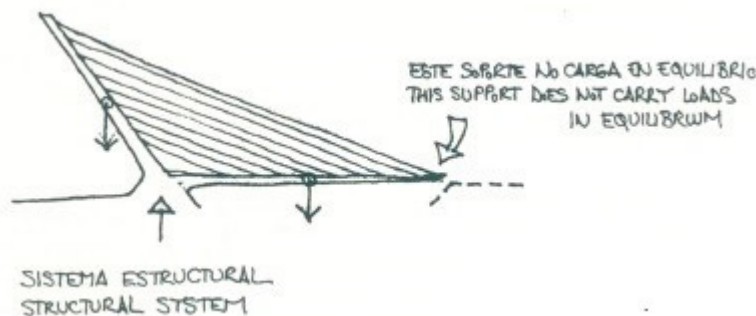


Figura 1. Esquema estructural Puente. Alberto Díaz Hermidas, 1.992

cuenta con un tablero que se caracteriza por dos elementos principales:

- Cajón central metálico sobre el que se sitúa la pasarela peatonal. Cuenta con sección constante y forma de hexágono regular, con un canto de 4,40 m., y se encuentra rigidizado tanto longitudinal como transversalmente mediante perfiles y chapas. Además existen diafragmas transversales coincidentes con las costillas de los voladizos.
- Dos voladizos laterales situados a una cota inferior a la de la pasarela peatonal, sobre los que circula el tráfico rodado. Estos voladizos, de 13,20 m. de anchura están resueltos mediante una prelosa de hormigón de 23 cm. de espesor, apoyada en costillas metálicas dispuestas cada 4 m. y conectadas al cajón central,

La pila principal y única está formada por un mástil de 141 m. de longitud, inclinada 32° con la vertical, lo que da una altura total de 132,25 m.

La sección transversal de este fuste, aunque inicialmente prevista en hormigón armado, está resuelta mediante una estructura mixta hormigón-acero de sección variable por condicionantes de construcción y plazo. La cara exterior del fuste es metálica de forma que ha servido de encofrado para el hormigón que se sitúa en su interior. En el centro de la sección se aloja un aligeramiento circular de 4 m. de diámetro hasta la cota 76,15, y de 2 m. de diámetro desde dicha cota hasta los 132,25 correspondiente con la coronación de la pila.

Para el empotramiento del tablero en la base de esta pila se dispone un gran plinto de hormigón armado sobre un encepado de hormigón armado de dimensiones $28 \times 28 \times 12$ m, recogiendo 54 pilotes de 2 m. de diá-

metro y 48 m. de longitud, con 24 m. empotrados en el estrato de las margas azules de Sevilla.

En el lado Sevilla la estructura se completa mediante un amplio estribo que realiza las funciones de apoyo del tablero y de contención de tierras del terraplén de la carretera. En condiciones de ausencia de sobrecargas de uso sobre el Puente este estribo no recibe cargas. Está formado por una gran viga transversal de hormigón armado en la que se empuja el tablero metálico y un encepado sobre pilotes sobre el que descansa la viga transversal descrita, apoyada mediante dos aparatos de apoyo tipo POT, uno libre y el otro con guíadera longitudinal para evitar movimientos transversales. La zona del apoyo se encuentra dentro de un recinto cerrado con muros laterales cimentados sobre zapatas mientras que el central posterior lo hace sobre el encepado, lo cual hace que sufran un cierto asiento diferencial con respecto al apoyo del tablero y el muro central.

Por último dentro de este apartado de descripción general de la

estructura encontramos el atirantamiento, materializado mediante trece parejas de cables, paralelos y dispuestos en arpa, con un ángulo de 28° con respecto a la horizontal, con una longitud máxima de 291 m. y mínima de 71 m. Los pares 5 al 13 están dotados de un sistema de amortiguamiento externo. Se cuenta en el Puente con 4.800 ml de tirantes.

Para un puente atirantado, y de esta envergadura, los tirantes son uno de los aspectos más sensibles, tanto por su misión estructural y vida útil, como por la dificultad de acceso para inspeccionarlos e incluso como por la dificultad de reparación cuando bajan de cierto umbral de servicio.

Necesidad de planteamiento de estrategia de inspección y mantenimiento avanzados

En las sucesivas versiones de la "Instrucción sobre las acciones a considerar para puentes de carretera", IAP, se ha establecido en su

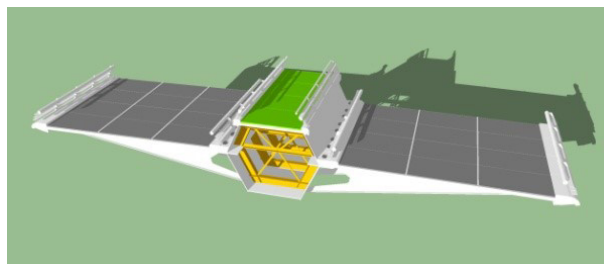


Figura 2. Corte transversal 3D del tablero. IMESAPI 2.020.

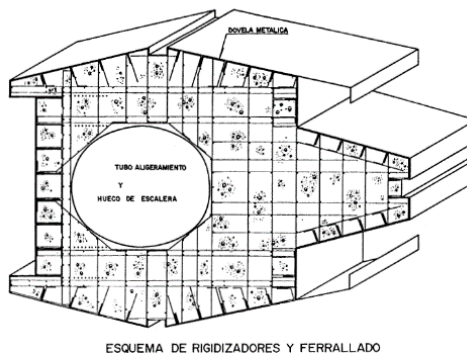


Figura 3. Corte transversal 3D de la pila. Puente del Alamillo. FCC 1.992

apartado 2.2 Vida útil, una vida útil para los puentes de 100 años, y en la medida en estos que contienen elementos con una vida útil inferior, es preciso mantenerlos o sustituirlos conforme su edad avanza.

En primer lugar es preciso identificar los diferentes puntos críticos y establecer el plan de control que garantice su mejor conservación en el tiempo, y para elementos tan cruciales en un puente atirantado como son los tirantes esto es fundamental, pues constituyen uno de estos elementos cuya vida útil es sensiblemente inferior a la vida del Puente, y sin su concurso y en plenas condiciones “no hay puente”.

Por tanto las estructuras atirantadas requieren inspecciones especializadas y un mantenimiento proactivo para poder garantizar su vida útil. Son estructuras esbeltas y deformables que para su correcto funcionamiento requieren la integridad de los tirantes. A esto debemos sumar la singularidad de funcionamiento del Puente que nos ocupa y la edad del mismo y de sus elementos constructivos, entre ellos por supuesto los tirantes.

Los tirantes como componentes estructural principal (conectan tablero y pilono) requieren un control exhaustivo debido a:

- Estar en contacto con los agentes atmosféricos (sol, viento, lluvia...)
- Estar sometidos a fenómenos de vibración y fatiga
- Ser técnicas que han experimentado un gran avance en los últimos 30 años

Las principales recomendaciones internacionales ACHE (española), PTI (americana), fib(internacional) y CIP (francesa) resaltan la importancia de la durabilidad.

En la colección “Recomendaciones y Manuales Técnicos” del Colegio de Caminos, Canales y Puertos, se recoge en su manual “E-12 Manual de Tirantes”, ACHE 2.007., en la tabla “Tabla II.8. Criterios de Durabilidad y Mantenimiento” la siguiente vida útil de elementos y periodos de inspección para los tirantes.

Atendiendo a esta tabla nos encontraríamos ahora habiendo consumido el 60 % de la vida útil de los tirantes. Además hay que añadir que las técnicas usadas en los años 80 y primeros 90 para la ejecución de tirantes se han mostrado generalmente incapaces de dotar de una vida útil a estos elementos, no ya de 50 años como se exige en la actual normativa, sino de periodos mucho más cortos que se cifran entre los 25 y 30 años por la bibliografía especializada.

Recordaremos que no es hasta mediados de los años 90 cuando comienza a utilizarse la técnica de los tendones autoprotegidos, que generan tirantes mucho más resistentes a los agentes externos y en base a los cuales se determina la vida útil de 50 años (técnicas como la inyección de vainas por medio de lechadas, profusamente utilizadas en los 80 y primeros 90, se han mostrado incapaces de garantizar a largo plazo el come-

tido para el que estaban destinadas- se quedaban zonas sin rellenar dejando los cordones desprotegidos, la elevada presión a usar para llegar a cubrir tirantes largos podían generar fisuras en la vaina por las que penetraba agua y el ambiente...).

A lo largo de la vida de la estructura se han venido llevando a cabo inspecciones principales periódicamente por parte de personal cualificado (González Barcina, ALEPH, 1.999, 2.002, 2.009 y 2.016), además de las básicas anuales realizadas por los técnicos de la conservación integral, e incluso en 2.004 y 2.009 se han llevado pruebas dinámicas sobre los tirantes (Casas y Aparicio, UPC, 2.004 y 2.009) , arrojando todas ellas buenos resultados, pero tras casi 30 años de vida se venía echando en falta una inspección especial para los tirantes, detallada y usando medios y técnicas avanzadas para determinar con certezas la salud de los mismos dadas las dudas razonables existentes acerca de la vida útil real de estos elementos diseñados antes de la aparición de la normativa vigente actual.

A la justificación de necesidad de llevar a cabo una inspección especial de tirantes, y una evaluación global del comportamiento estructu-

Tabla II.8. Criterios de Durabilidad y Mantenimiento

Acceso, capacidad sustitución	Vida útil estructura	Vida útil tirante sin pérdida capacidad	Durabilidad protección corrosión, vibración,...	Vida útil protección corrosión, vibración,...	Periodo inspección/ mantenimiento
Tirante sustituible	100 años	50 años	Partes accesibles: 10 años mínimo, Partes no accesibles: 50 años.	Partes accesibles: 10 años mínimo, Partes no accesibles: 50 años.	1era inspección: 3años mínimo Sigüientes inspecciones: cada 5años
Tirante no sustituible Accesible	100 años	100 años	100 años	Partes accesibles: 10 años Partes no accesibles: 100 años	1era inspección: 3años mínimo Sigüientes inspecciones: cada 5años
Tirante no sustituible No accesible	100 años	100 años	100 años	100años	100años

ral del Puente, relacionada anteriormente, tenemos que añadir el especial momento de atención por parte de la opinión pública que viven este tipo de estructuras después de los últimos acontecimientos vividos en puentes atirantados y especialmente el acontecido en Génova (Italia) el cercano verano de 2.018.

Pero también en España hemos tenido precedentes negativos para puentes atirantados de la misma edad que el Puente del Alamillo, tal es el caso del Fernando Reig en Alcoy que data de 1.988, puente perteneciente a la Red de Carreteras del Estado y gestionado por el Ministerio de Transportes, que sufrió la rotura de un tirante el pasado 28 de julio de 2.016 lo cual obligó a cerrar al tráfico la estructura. Tras una importante labor de inspección y auscultación motivada por este hecho se llegó a la conclusión de que para abrir nuevamente al tráfico en el contexto reglamentario vigente (mucho más estricto que el existente en el momento de la ejecución de estos puentes), tanto para la situación actual como para el horizonte temporal al que hacen referencia los códigos, era preciso sustituir el 100 % de los tirantes.

Añadiremos además que estas situaciones han provocado una inspección especial muy intensa sobre otro Puente vecino al Puente del Alamillo y de su misma edad, el Puente del Centenario (también competen-

cia del Ministerio de Transportes), que entre 2.016 y la actualidad ha sufrido de numerosas actuaciones de inspección y auscultación, y para el que ya incluso se encuentran en marcha las obras para la sustitución de todos los tirantes, dadas las incertidumbres a efectos de durabilidad que se plantean para unos tirantes de 30 años y concebidos a primeros de los años 90.

Adicionalmente a todo lo anterior el Puente del Alamillo desde su construcción vino sufriendo esporádicamente y ante la combinación de lluvia y fuerte viento del Sur-Suroeste el fenómeno que se conoce como "rain vibration", lo que se manifiesta como vibraciones de amplitud importante en determinados tirantes.

Este fenómeno en ocasiones ha llegado a causar alarma social dada su aparatosidad, máxime cuando los tirantes se disponen junto a la pasarela peatonal del Puente; además de tratarse de un efecto no deseable de cara a la durabilidad de los tirantes por cuanto que afecta a la resistencia por fatiga de los mismos.

Entre el año 1.999 y el 2.003 se llevó a cabo la redacción de varios informes de consultoras especializadas acerca de este fenómeno y en el que en todos los casos se aconsejaba la disposición de amortiguadores para disipar la energía de vibración de los tirantes.

Esta circunstancia provocó que en 2.004 ya se realizara una campaña de ensayos dinámicos sobre los tirantes, realizada por la Universidad Politécnica de Cataluña a petición de la Dirección General de Carreteras de la Junta de Andalucía, el cual si bien ponía de manifiesto el buen estado de conservación del Puente sí confirmó la necesidad del amortiguamiento adicional entre los pares de tirantes 5 y 13.

Amortiguamiento que se definió en el "Proyecto de amortiguamiento de los tirantes del Puente del Alamillo", de clave 05-SE-1744-0.0-0.0-PC y fecha septiembre de 2.005, con Alonso Cobo Estudio de Ingeniería como autor, y que fue posteriormente implantado en 2.007 mediante la ejecución del citado proyecto.

Los amortiguadores dispuestos son del tipo dinámico, es decir, adecúan la capacidad de amortiguamiento en función de la sollicitación requerida por el tirante.

A continuación se puede observar una gráfica en la que se observa la capacidad de adecuación del amortiguamiento de estos elementos, además de un esquema de funcionamiento del amortiguador. (Figura 4 y 5)

Así pues entre los años 1.992, de puesta en servicio, y 2.007, de instalación de los amortiguadores, transcurrieron 15 años durante los cuales

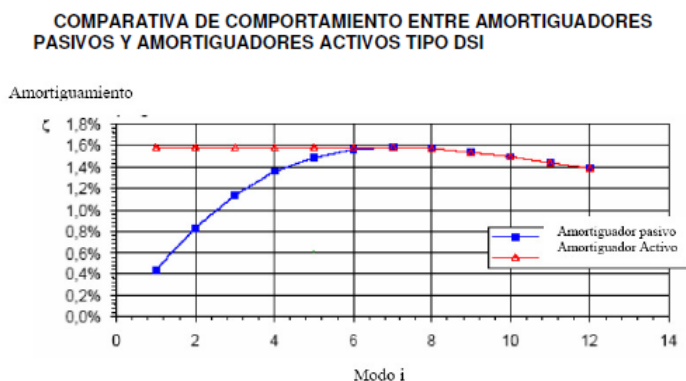


Figura 4. Amortiguamiento dinámico vs estático. Maurer Shöne 2.007

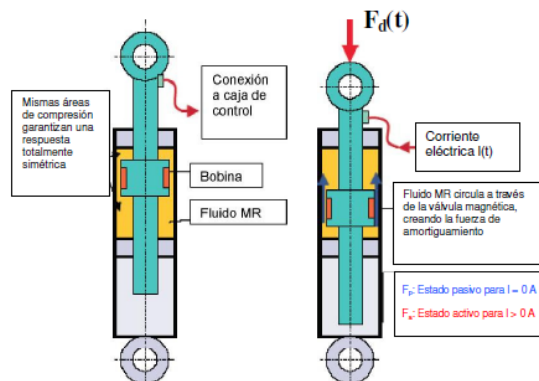


Figura 5. Funcionamiento amortiguador dinámico. MS 2.007

el Puente estuvo sujeto a episodios, esporádicos eso sí, en los que se provocaban vibraciones con amplitudes muy importantes y que han podido estar afectando a la resistencia a fatiga de los tirantes.

Después de casi 30 años de vida, y a partir de argumentos expuestos en este apartado se desprende la necesidad de establecer una pauta de inspección y seguimiento más ambiciosa que la ordinaria que se estaba llevando a cabo para el Puente, con atención prioritaria a la inspección especial de los tirantes, así como un planteamiento para el seguimiento que nos mostrara el actual comportamiento estructural del Puente y que nos permitiera adelantarnos a la evolución de éste en el tiempo.

Estrategia avanzada de inspección y seguimiento del puente

Como hemos visto en el apartado anterior se hace preciso llevar a cabo el planteamiento de una estrategia de inspección y seguimiento del Puente, para la cual se debería hacer uso del actual estado de la técnica y de los avances tecnológicos disponibles en aras de conseguir su máxima eficacia

Este planteamiento se hace en base a los cuatro puntos relacionados a continuación:

- Inspección especial detallada de tirantes. Realizada entre septiembre y diciembre de 2.019

En la que se plantea la inspección de manera muy detallada de los distintos elementos de los que se componen los tirantes y se evalúa su estado y comportamiento, de manera que podamos establecer un informe de partida o “cero” que permita conocer con la mayor exactitud posible su estado

de conservación y sirva de guía para acometer reparaciones o mejoras.

- Elaboración de modelo digital de comportamiento del Puente. Desarrollado entre enero y octubre de 2.021

Se lleva a cabo la modelización parametrizada del puente con el fin de evaluar la respuesta estructural general en hipotéticos escenarios de variación de las fuerzas de los tirantes. Al cabo de todos estos años de servicio del puente, próximos a los 30, cuando las curvas de comportamiento podrían haber iniciado una fase de descenso en prestaciones con gradiente más acentuado, se hace necesario tratar de extrapolar hacia atrás y hacia adelante en el tiempo a partir de los datos de la auscultación.

Este modelo paramétrico de control permite aplicar automáticamente los cambios en las propiedades de los materiales del puente, muy especialmente las de los tirantes, para el control de la fuerza de los mismos.

- Auscultación del Puente y retroalimentación del modelo. Realizado entre los meses de enero y octubre de 2.021.

Las técnicas de monitorización de salud estructural son imprescindibles para la evaluación del estado de las infraestructuras como la que nos ocupa, tanto para tener una visión en tiempo real del estado de esta, como para tener un método de determinación de eventos críticos.

Adicionalmente con las medidas obtenidas se retroalimenta el modelo con lo cual nos permite realizar una calibración muy fina de este y ajustar su comportamiento de manera muy fiel al de la estructura.

Este sistema de monitorización se vale de una plataforma web para la visualización y consulta de los datos tomados arrojados por el sistema, los cuales compara de manera continua con los valores límites que llevarían al Puente a consumir su capacidad resistente, constituyendo una herramienta fabulosa para la vigilancia estructural en tiempo real.

- Actualización del manual de conservación. Realizado en diciembre de 2.019

Es asimismo necesario a partir de todo lo anterior actualizar el manual de conservación del Puente, adaptando las inspecciones a realizar al estado de la técnica, planteando unas prioridades, periodicidad e intensidad de inspecciones acorde al estado de los distintos elementos del Puente, especialmente los tirantes y establecer unas normas de buena práctica a observar que ayuden a extender la vida útil de estos.

En cada fase de la estrategia se cuenta con empresas especialistas, de primer nivel y reconocido prestigio, primando además el conocimiento previo y la experiencia sobre la estructura, siendo la relación más destacada la siguiente:

- Dywidag Systems International, para las actuaciones en la inspección de tirantes, como instaladora en su día de los mismos y mejor conocedora de la tecnología instalada y sus posibles debilidades.
- Alpin Technik Leipzig como empresa especialista en trabajos verticales en estructuras singulares (filial de Dywidag).
- DMT GmbH, como empresa que cuenta con la tecnología del ensayo MRT (magnetic rope testing).

- Maurer Shöne, empresa propietaria de la tecnología de los amortiguadores dinámicos instalados.
- IDVIA Ingeniería, spin off de la Universidad politécnica de Valencia para la instrumentación del Puente y desarrollo del modelo digital de comportamiento estructural del Puente.
- ALEPH Consultores, como seguimiento especializado de todos los trabajos y la actualización del manual de conservación.

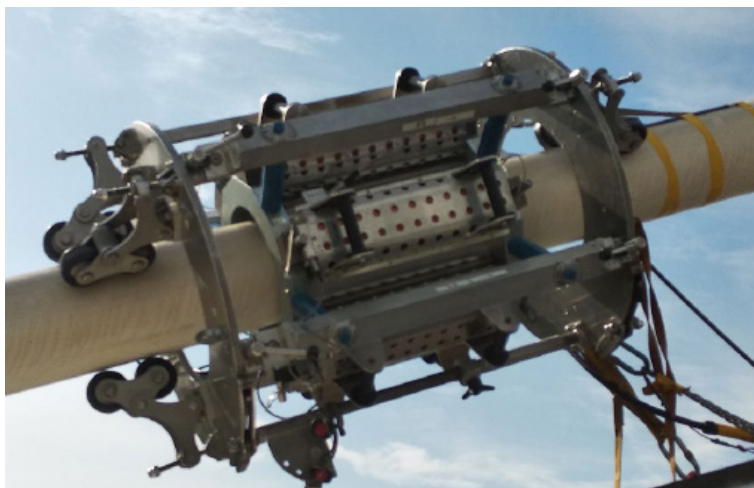


Figura 6. Robot trepador inspección tirantes Alamillo. IMESAPI 2.019

Inspección especial detallada de tirantes

Las distintas operaciones de inspección realizadas han tenido como objetivo verificar el estado actual de conservación de los tirantes, valorar las implicaciones estructurales y definir las necesidades de reparación en el corto, medio y largo plazo.

En la inspección realizada se han usado técnicas hasta en ese momento no usadas en España en el marco de la inspección de tirantes de Puentes, como es el uso de robots trepadores que han permitido la monitorización continua de determinados parámetros, así como el uso de la técnica de auscultación magneto inductiva, especie de resonancia magnética realizada al tirante de forma continua gracias al concurso de los robots.

El uso de estos robots en la inspección cuenta con las siguientes ventajas:

- Permite la toma de datos en continuo
- Ejecución de los trabajos, de forma más limpia y rápida, ya que no hay que montar andamios voluminosos, ni cestas de gran capacidad.
- Se limita al mínimo tener que descolgar operarios a grandes alturas

- Se garantiza una recogida de datos de mayor calidad al estar sincronizada la captación de datos con el movimiento ascendente del robot.

- Baja afección al tráfico

Para el uso de los robots fue necesario el retirar previamente los anillos de PVC que cubrían las soldaduras de los tramos de vaina exterior de los tirantes, y su sustitución por bandas de reparación en base de goma de butilo coextrusionado y aplicado en dos capas, trabajos que fueron llevados a cabo mediante técnicas de trabajos verticales

Recordaremos algunas características de los tirantes inspeccionados:

- 13 pares de tirantes, con longitudes comprendidas entre los 71 y 291 ml., comprendiendo una longitud total de tirantes sobre el Puente de 4.800 ml. lo que da idea de la envergadura del trabajo.
- Formados por 60 cordones de 0,6" (cordones de 7 alambres paralelos conformados en frío sin soldadura, ASTM A 416-80, Grado 270), excepto el par 13 que cuenta con 45 cordones de 0,6". Autoprotectidos con revestimiento de resina epoxi, dentro de vaina



Figura 7. Trabajos en altura. IMESAPI 2.019

de 200 mm. de diámetro en PEAD, esta vaina a su vez se reviste de una exterior en color blanco por motivos estéticos.

- Anclaje inferior activo en tablero y superior pasivo en pilono

Relacionamos a continuación las actuaciones de inspección planteadas y llevadas a cabo:

- Inspección visual de la longitud libre de los tirantes
- Inspección visual de los anclajes en el pilono y en el tablero

- Retirada de caperuzas de anclaje del pilono y tablero
- Ensayos de vibración de tirantes
- Ensayo magneto- inductivo
- Nivelación del tablero
- Revisión completa de amortiguadores y sistema de control de los mismos

Inspección visual de la longitud libre de los tirantes

Se lleva a cabo un análisis visual continuo de la longitud libre de los 4.800 ml de tirantes existentes en el Puente, para verificar el estado de la vaina y la posible existencia de daños que pudieran estar permitiendo la entrada de agua y del ambiente en su interior.

Esta operación se realizó mediante robots automotrices dotados con cámaras de alta resolución, que filman la superficie exterior de las vainas de los tirantes desde cuatro ángulos, deslizándose a lo largo de todos los tirantes y obteniendo una imagen continua de alta resolución del desarrollo de la vaina. Posteriormente se analizan las imágenes mediante un software específico, que detecta las irregularidades y defectos de las vainas, permitiendo este sistema detectar fisuras de 0,1 mm.

En todos los cables se han encontrado defectos superficiales en la vaina blanca, con algunos rasguños que alcanzan a la vaina negra interior, pero ninguno de los defectos supone una amenaza para la integridad de la vaina.

Inspección visual de los anclajes en el tablero

Se inspeccionan los 26 anclajes inferiores para detectar corrosión y signos de agua dentro de la zona de anclaje. Esta inspección es visual, en primera instancia y de forma directa la zona accesible, y en segunda con la participación de un endoscopio. Para poder realizarla se retira el guardapolvos elevándolo sobre la vaina, se lleva a cabo la inspección visual y la endoscopia y se comprueba el estado de conservación del filtro de flexiones situado más abajo, determinando en todos los casos su buen estado y su centrado.

Se detectaron humedades generalizadas y restos de lechada y de material de sellado de color rojizo en el interior del tubo de transición en la mayoría de los tirantes junto con oxidación en el interior del tubo, que proviene probablemente del lavado con agua de filtraciones del relleno de mortero del tirante en esa zona, por lo que insistimos en la recomendación anterior de mantener estanca

la parte inferior del tirante, además de aplicar un tratamiento de saneo y protección anticorrosión a las zonas afectadas.

Se detectó la presencia de agua en 4 casos, que fueron debidamente drenados.

Con esta inspección verificamos también el tramo de tirante situado justo por encima del anclaje inferior, en especial la situación del “Bond socket” del anclaje, resultando en buen estado en todos los casos.

Para los trabajos de endoscopia se emplea el video endoscópico Olympus IPLLES LX.

Para las caperuzas y al encontrarse estas rellenas de lechada de cemento, no se puede verificar su estado con estos medios y serán objeto una inspección específica descrita más adelante, aunque previamente se lleva a cabo una inspección visual exterior para detectar posibles restos de circulación de agua desde el interior, circunstancia que no se da en ningún caso.

En las recomendaciones de reparación arrojadas por esta inspección se encuentra la reposición del tratamiento anticorrosivo en el interior de los tubos donde se aloja el anclaje, así como la sustitución de los guardapolvos.

Inspección visual de anclajes en pilono

Se inspeccionan todos los anclajes superiores para detectar la posible existencia de corrosión y signos de agua dentro de la zona de anclaje. Al igual que en los anclajes inferiores, se realizará una endoscopia, en este caso de abajo a arriba, desde la entrada del tirante en el pilono. Con esta inspección se comprobará el estado del filtro de flexiones y del bond socket del anclaje.



Figura 8. Ejemplo de raspadura encontrada en una vaina (5 cm x 5 cm). Dywidag-Systems International. 2.019



Figura 9. Interior tubo anclaje inferior. IMESAPI 2.019



Figura 10. Cara interior de pilono: tubos encofrado paso tirantes. IMESAPI 2.019



Figura 11. Tubos encofrado paso tirantes. Anclajes superiores. Alpin 2.019



Figura 12. Recolocación anillo centrador. Anclaje Superior. Alpin .2019.

La inspección se ha realizado mediante técnicas de trabajos verticales.

Como era de esperar por su posición y orientación no se han encontrado problemas de humedades y acumulación de agua en el interior del tubo donde se aloja el anclaje.

Las inspecciones no han detectado ningún defecto importante en la parte de los telescópicos superiores, salvo una fisura entre el anillo de unión y el tubo telescópico, en tirante 3 sur. Asimismo y dado que en los anillos de conexión, los tornillos muestran signos de corrosión evidente, su sustitución está planteada, más un tratamiento anti corrosivo en las superficies a unir.

En las caperuzas superiores tan solo se han encontrado restos de suciedad, provenientes en su mayoría de excrementos de pájaros.

Retirada de caperuzas de anclaje del pilono y tablero

Se lleva a cabo la retirada de 8 caperuzas de protección de los anclajes, 6 en anclajes inferiores y 2 en anclajes superiores, para verificar el estado de los elementos del mismo tras la placa de reparto y comprobar en el caso de los anclajes inferiores (activos) la longitud libre de los “rabo” en base a posibles futuras labores de retesado.



Figura 13. Anclaje inferior tras retirada de capot y lechada de protección. Alpin Technik Leipzig. 2.019



Figura 14. Trabajos verticales sobre el Rio. Alpin 2.019

Después de la retirada de las caperuzas, se eliminó mecánicamente la lechada de cemento, con cuidado para no dañar la parte saliente de los cordones. Tras la inspección, se colocaron unas nuevas caperuzas, inyectando un gel anticorrosivo en el interior.

En todos los casos el estado de los anclajes y del material de protección es excelente, incluso en aquellos en que se detectó la presencia de agua en el tubo.

Ensayos de vibración de tirantes

Se lleva a cabo para los 26 tirantes existentes y en este ensayo se mide la fuerza en los tirantes de manera indirecta, mediante la medida de su vibración, y su correlación con los parámetros geométricos y mecánicos (longitud, masa, rigidez, fuerza) bien conocidos. Se procede instalando un acelerómetro en el tirante y analizando su registro, previa excitación del mismo para conseguir que vibre. La señal del tirante se aproxima linealmente, obteniéndose una transformada rápida de Fourier de ella. Filtrando la señal se selecciona el primer modo de vibración, para estimar la fuerza en el tirante mediante la fórmula de la teoría de la cuerda vibrante.

En segundo lugar, se calcula el coeficiente de amortiguamiento, en-

cajando una curva exponencial del límite superior de la envolvente de la señal. Se muestran los resultados de este análisis para uno de los tirantes. (Figura 16)

Se han realizado dos series de medidas, con los amortiguadores activados y sin activar, para comprobar también el funcionamiento de estos elementos, para la totalidad de los tirantes. Los resultados obtenidos son en general muy buenos, encajando perfectamente con los obtenidos en las campañas realizadas en 1.992 (tras la puesta en servicio del Puente), 2.004 y 2.008 (tras la instalación de amortiguadores). Tan solo el tirante nº 7 norte presenta una ligera discordancia con respecto a las medidas anteriores (del 3,8 % cuando el resto de tirantes se encuentra por debajo del 2%) aunque dentro del margen de error del proceso de obtención de las frecuencias de los modos propios de los tirantes y de las variaciones debidas a la diferencia de temperaturas y el paso del tráfico

En cuanto a la amortiguación, de los resultados de los ensayos con los amortiguadores activos, y su comparación con los de los no amortiguados, cabe concluir que los niveles de amortiguación son aceptables, excepto en el par de tirantes 7, en los que no hay cambios apreciables entre ambas situaciones, aunque por otra parte su amortiguación inherente

es alta. Para los tirantes más cortos, pares 1 a 4, se da la situación inversa, ya que su amortiguación propia es baja. Dado que no se han observado episodios de vibración en estos tirantes, la situación general en este aspecto es buena, sobre todo teniendo en cuenta la coincidencia de resultados con los de los ensayos de años anteriores.

Ensayo magneto inductivo (MRT, Magnetic Rope Test)

Realizado también mediante un robot autopropulsado midiendo en continuo, y por primera vez en España, el ensayo se basa en la creación de un campo magnético mediante electro-ímanes, que es analizado mediante sensores incluidos también en el propio robot.

Permite detectar anomalías en el campo magnético, que se corresponderían con roturas no ya en los cordones, o alambres que lo conforman, sino llegando a detectar incluso pérdidas de sección en estos últimos, que podrían venir motivadas por corrosión. Para hacernos cargo de su precisión diremos que en las pruebas en campo realizadas para la calibración del robot se detectaba la discontinuidad de un cable de cobre de 1,5 mm² colocado sobre la vaina.

Los tirantes a ensayar se eligieron en función de la mayor probabilidad



Figura 15. Ejecución ensayo "cuerda vibrante". DMT GmbH & Co. KG. 2.019

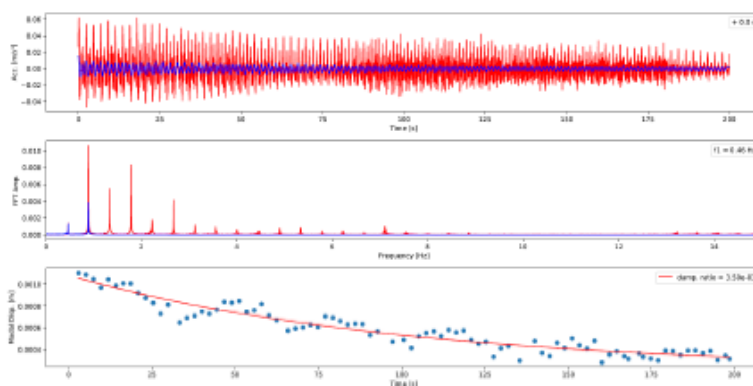


Figura 16. Tirante 12 norte: Señal lineal y filtrada, transformada y frecuencia del primer modo, y amortiguamiento

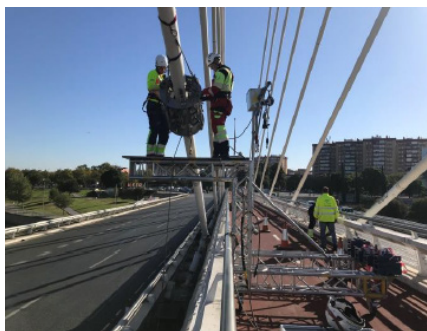


Figura 17. Ensayo MRT. Dywidag-Systems International. 2.019

de encontrar defectos en los mismos, que en principio fueron los más largos, afectados por los episodios de vibraciones, que son los pares 11 a 13. Adicionalmente se inspeccionaron el par 7 y el tirante 6 sur, lo que da un total de 9 tirantes. Estos últimos tirantes se eligieron una vez conocidos los avances de resultados de inspecciones realizadas, concretamente por la presencia de agua en el interior de las caperuzas inferiores, además de ofrecer el tirante 7 norte una discordancia mayor que el resto en el ensayo de la cuerda vibrante como se comentó en el punto anterior.

En todos los casos los resultados arrojados han sido excelentes.

Nivelación del tablero

Se ha realizado una nivelación de la plataforma del puente tomando los bordes de las dos calzadas cada tres costillas (12 m), y realizando con estas medidas unos gráficos que se comparan entre tableros y con los de medidas anteriores tomadas en cada una de las inspecciones principales realizadas al Puente. La nivelación actual se ha realizado mediante estación total, dispuesta fuera de la estructura.

Este ensayo y su comparación con resultados anteriores permite valorar la correcta evolución de la estructura (fenómenos térmicos y reológicos), así como detectar fallos en el atirantamiento, que se manifiestan

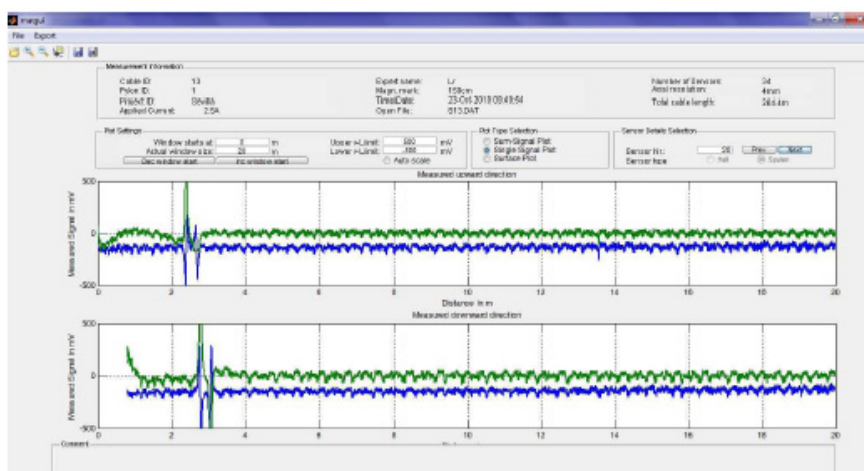


Figura 18. Ejemplo de gráfica obtenida. Tirante 13 Sur. Se aprecia a los 2,2 m. la introducción de cable para comprobar la calibración del sistema

en defectos apreciables en la nivelación.

Los resultados de la nivelación efectuada, comparada con las de la serie de medidas homologables anteriores, encuentran diferencias que en todo caso se encuentran dentro del nivel aceptable de variación entre ellas: debidas a la precisión de los aparatos de medida y variaciones de temperatura y estado del tráfico sobre las plataformas del puente.

El hecho de que en ambos extremos de las calzadas las cotas sean ahora superiores a las anteriores, y en una magnitud similar en los dos lados, respalda la hipótesis de diferencia de temperatura entre mediciones o de carga vertical sobre la calzada e, indirectamente, son una señal de la buena respuesta de la

estructura en su conjunto, ya que no se observan giros transversales de torsión que serían un indicio de problemas en algún tirante.

Revisión de sistema de amortiguamiento de tirantes

Como elemento integrante del atirantamiento y garante de la seguridad del mismo ante los efectos indeseados de vibraciones excesivas sobre los tirantes se ha llevado a cabo una inspección profunda del amortiguamiento, comprendiendo esta:

- Revisión física de los amortiguadores en sí
- Comprobación de funcionamiento de los sensores de desplazamiento colocados sobre ellos



Figura 19. Revisión control sistema amortiguamiento dinámico. IMESAPI 2.021

- Comprobación de continuidad de circuitos entre cuadro de mando y bobinas alojadas en amortiguadores
- Actualización de software de control, y revisión completa al cuadro de mando y control : tarjetas electrónicas, generadores de intensidad...
- Comprobación de la función de autochequeo del sistema de control, y renovación del sistema de generación de avisos tras éste.

De esta inspección ha resultado necesario el sustituir el amortiguador inicialmente situado en el tirante 12 S por pérdidas excesivas de líquido hidráulico.

Asimismo se ha llevado a cabo la instalación de router sobre el cuadro de mando del sistema para envío de avisos de forma remota al centro de conservación, así como también de los eventos generados por entrada en servicio del sistema ante episodios de vibración. Esta mejora permite llevar un seguimiento diario y a distancia del sistema, además de tener conocimiento puntual y de detalle de los episodios de vibración, su magnitud (amplitud y frecuencia) y su duración.



Figura 20. Amortiguador dinámico dañado. IMESAPI 2.021

Elaboración de modelo digital de comportamiento del puente

Para elaborar esta modelización previamente se ha realizado una campaña de catas y mediciones para confirmar la geometría del Puente y el espesor de las chapas utilizadas, partiendo inicialmente de la colección de planos "Liquidación Provisional. Modificado Nº 2 Paso del Alamillo", con clave del proyecto 1-SE-182- M2 y posteriormente, tras la confirmación y/o corrección de medidas se ha llevado a cabo la elaboración de la colección definitiva de planos en CAD, los cuales se han utilizado para la confección definitiva del modelo.

La campaña para la confirmación de medidas que permitieran la elaboración de los planos definitivos en CAD con todas las garantías supuso un importante consumo de medios, en los que destacaron medios topográficos de alto rendimiento y el uso de equipos de ultrasonidos (confirmación espesores de chapa).

Además, se han extraído y ensayado una serie de testigos del hormigón de la pila, con objeto de conocer las características mecánicas de este hormigón: módulo de Young, módulo de rigidez, coeficiente de Poisson y resistencia a compresión.

Con estos datos iniciales: geometría y características de materiales se ha llevado a cabo la confección del modelo numérico para la simulación de la estructura, en el entorno de los elementos finitos, mediante el software ANSYS APDL v19.2.

El resultado de este modelo, en combinación con los diferentes datos obtenidos de la instrumentación, servirá para verificar que dicho modelo está calibrado.

El objetivo de la calibración es obtener un modelo 'gemelo' de la estructura. Es decir, un modelo que

reproduzca la respuesta estática y dinámica de la misma, atendiendo a los parámetros medidos durante la campaña de inspección o periodo de monitoreo, según corresponda.

Así, una vez obtenido el modelo digital y en base a las mediciones obtenidas directamente por la instrumentación, se modifican ligeramente determinados parámetros en el modelo hasta hacerlo comportarse de la misma manera que lo está haciendo la estructura real, en determinados puntos o secciones considerados como críticos y que se encuentran instrumentados.

Contamos entonces con un modelo "calibrado" que se comporta de manera prácticamente idéntica al modelo real y sobre él podemos implementar numerosos escenarios que nos ayudarán a predecir desde el comportamiento del Puente ante determinados eventos (fallo de un tirante, de un transporte especial, paso de una maratón...) como prever la evolución de su comportamiento en el tiempo mediante la adición de algoritmos avanzados para la predicción de evolución de daños o deterioros (algoritmos probabilísticos de prognosis).

A partir de la elaboración de este modelo calibrado se ha llevado a cabo un informe (Informe Estructural Avanzado) que tiene por objeto la determinación del estado, a efectos de comportamiento estructural, del puente Alamillo frente a la actuación de diferentes acciones conforme se especifica en la normativa vigente.

Para ello se ha procedido a la simulación numérica de diferentes escenarios en el modelo calibrado. A partir de los resultados de esta simulación se han establecido los límites resistentes o de servicio de cada uno de los elementos que componen el Puente ante las distintas acciones que pueden solicitarlo, evaluando los márgenes resistentes con los

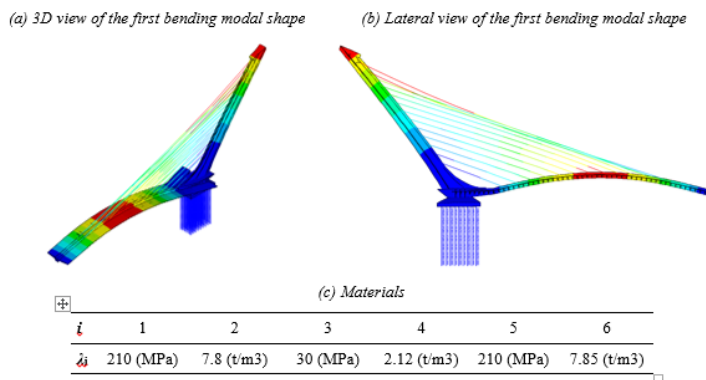


Fig. 14. Numerical model obtained from the calibration (Twin Model).

Figura 21. Modelización Puente (primer modo). IDVIA (UPV) 2.022

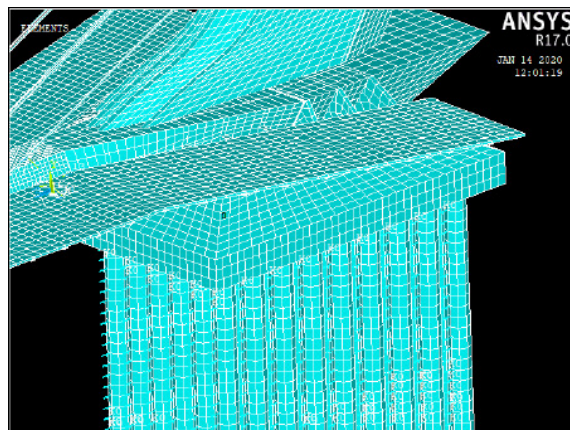


Figura 22. Detalle modelo. IDVIA (UPV) 2.021

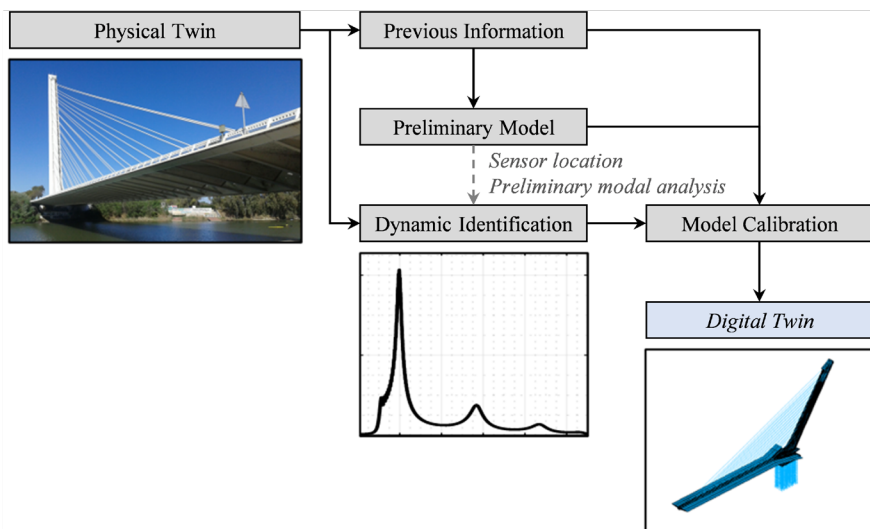


Figura 23. Proceso generación modelo digital. IDVIA (UPV) 2.022

que cuenta la estructura ante estas combinaciones de acciones, lo cual ha arrojado resultados muy satisfactorios en cuanto a la salud estructural del Puente.

Auscultación del puente

Otro de los pilares fundamentales de la estrategia seguida es la monitorización del Puente mediante un sistema de auscultación, basado en la disposición de instrumentos de medida de determinados parámetros sobre el Puente, equipos de adquisición de datos y un software de registro, tratamiento y almacenamiento de datos que permita su visualización, consulta de registros e históricos, genere gráficas, etc...

Con esta monitorización del Puente se han pretendido abarcar dos objetivos complementarios:

- Mejorar el conocimiento del estado del puente de forma directa a partir de las medidas recogidas en los distintos instrumentos, generar conocimiento y establecer históricos de medidas fiables y comparables a futuro para determinar la evolución del comportamiento del Puente.
- Conocer en tiempo real el comportamiento de la estructura contrastando las mediciones obtenidas con los modelos numéricos correspondientes, como hemos descrito en el apartado anterior

Para el planteamiento de auscultación de la estructura se han tenido

en cuenta los siguientes factores: eficiencia económica, representatividad de la información y estabilidad de la medida. Esta última condición es importante, ya que plantear una instrumentación con el objetivo de controlar el estado de una estructura a lo largo de un amplio periodo de tiempo, implica la necesidad de que las diferentes medidas sean repetitivas, y en la medida de lo posible absolutas. La comparación de los datos adquiridos en un periodo, con los de otro posterior debe permitir el conocimiento de la evolución de la estructura, como puede comprobarse por ejemplo en los ensayos de vibración de tirantes realizada y su comparación con los ensayos anteriores.

De acuerdo con la tipología estructural del Puente y su esquema resistente se han considerado relevantes para la caracterización de la respuesta de la estructura el control de los siguientes parámetros:

- Inclinación longitudinal del pilono.
- Inclinación transversal del pilono.
- Frecuencias propias del pilono.
- Tensión en los cables.
- Vibración y frecuencias de vibración de los cables.
- Aceleración en cimentación para detección de acción sísmica.
- Frecuencias propias del tablero.

- Aceleraciones en el tablero.
- Temperatura.
- Velocidad y dirección del viento.
- Amplitud de desplazamiento de amortiguadores.
- Inclinación longitudinal del pilono

Dado que el plano resistente principal de la estructura corresponde con su plano longitudinal medio, resulta de gran interés conocer la variación en la inclinación del pilono en dicha dirección. La variación en la tensión de los cables se encuentra íntimamente relacionada con la inclinación del pilono en este plano, de ahí su interés. Es por ello que se medirán las inclinaciones longitudinales en la cabeza del pilono.

Se trata de un parámetro de lectura directa que servirá de indicador, junto con otros parámetros que se detallan a continuación, de variación en la rigidez de la estructura.

Inclinación transversal del pilono

Como se mencionó anteriormente, en una estructura de semejante envergadura – más de 130 metros de altura del pilono y dos planos de tirantes que sostienen una luz de tablero próxima a los 200 metros - es esperable que las acciones horizontales en sentido transversal al puente tengan una gran relevancia en la respuesta de la estructura.

Para comprobar que dichas acciones no ponen en riesgo la integridad de la estructura se controlarán las inclinaciones transversales en la cabeza del pilono.

Se trata de un parámetro de lectura directa que servirá de indicador acerca de la deformabilidad lateral de la estructura y para el control de la integridad del pilono.

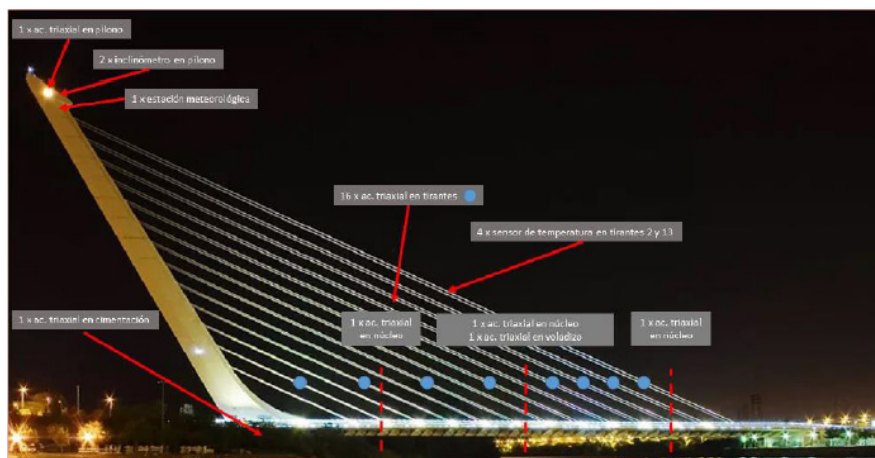


Figura 24. Situación instrumentación instalada. IDVIA (UPV) 2.021

Frecuencias propias del pilono

El pilono es elemento muy masivo cuya rigidez está, en parte, íntimamente relacionada con el estado de los tirantes.

La variación en la rigidez del mismo se controlará mediante el estudio de la variación de sus frecuencias propias, las cuales, serán obtenidas mediante el análisis en el dominio de la frecuencia de sus aceleraciones (análisis modal operacional)

Se trata, por lo tanto, de un parámetro conocido de forma indirecta, a través del tratamiento matemático de los registros de las aceleraciones de la estructura.

Tensión en los cables

De igual modo que para el estudio de la rigidez del pilono se obtienen sus frecuencias propias, existe una estrecha relación entre las frecuencias propias de vibración de un cable y su tensión.

Debido a la gran importancia que tiene el estado tensional de los cables para la respuesta global de la estructura, se ha decidido controlar la tensión en los mismos mediante la aplicación del análisis modal operacional a las aceleraciones registradas en cada uno de los cables.

Se trata, por lo tanto, de una medida indirecta de la tensión de los mismos.

Aceleración en cimentación para detección de la acción sísmica

La propuesta de instrumentación realizada se basa, en muchos puntos, en el estudio de la respuesta de la estructura en condiciones normales de operación (análisis modal operacional). una importante fuente de excitación puede ser, puntualmente, la acción sísmica.

Resulta importante conocer qué registros del resto de parámetros se han visto influenciados por la acción de las aceleraciones sísmicas así como la respuesta estructural frente a este tipo de eventos.

Por ello, la medida de las aceleraciones sísmicas en la base del pilono supone un indicador de lectura directa que permite complementar el estudio dinámico de la estructura frente a una acción intermitente y de intensidad variable.

Frecuencias propias del tablero

De modo similar al control de la rigidez del pilono, el análisis frecuencial de las aceleraciones verticales en distintos puntos del tablero permiten conocer sus frecuencias propias

y, de forma indirecta, obtener variaciones significativas en su rigidez.

Aceleraciones en el tablero

Conocer las aceleraciones horizontales en el tablero tiene un doble objetivo. Por un lado, verificar la acción sísmica detectada en la base del pilono y, por el otro, obtener las frecuencias propias asociadas a los modos que impliquen desplazamiento lateral del tablero – para el control también de posibles variaciones de rigidez significativas de forma indirecta.

Temperatura, velocidad y dirección del viento

Las condiciones ambientales a las que se encuentra el puente expuesto en todo momento son determinantes para la correcta interpretación del resto de parámetros. En estructuras atirantadas es especialmente relevante el control de la temperatura, ya que se encuentra íntimamente relacionada con la tensión en los tirantes.

La presión ejercida por el impacto del viento a una determinada velocidad y dirección influye también en la lectura del resto de parámetros.

Mediante la disposición de una estación meteorológica es posible obtener, de forma directa, estos parámetros complementarios.

Además se dispondrá un sensor de temperatura en varios tirantes representativos de forma que sea posible correlacionar el estado tensional con la temperatura a la que se encuentran.

De acuerdo a lo anterior, se ha dispuesto la siguiente distribución de sensores:

- (1x) acelerómetro triaxial en cabeza de pilono
- (2x) inclinómetros en cabeza de pilono

- (1x) acelerómetro triaxial en cimentación del lado oeste (base del pilono)
- (16x) acelerómetro triaxial en tirantes
- (3x) acelerómetro triaxial a $\frac{1}{4}$ de vano, $\frac{1}{2}$ de vano y $\frac{3}{4}$ de vano en el interior del núcleo metálico dispuestos verticalmente
- (2x) acelerómetro Triaxial vertical dispuesto en $\frac{1}{2}$ de vano en el extremo de los voladizos laterales
- (1x) estación meteorológica
- (4x) sonda de temperatura en parejas de tirantes 2 y 13

Plataforma web monitorización. Vigilancia estructural del Puente del Alamillo

Todo sistema de monitorización de una estructura requiere no solo de la toma de datos, sino del registro, almacenamiento y tratamiento de los mismos, por supuesto con la conversión a magnitud ingenieril de las medidas, y debe contar con algún medio para la visualización y consulta de los mismos.

En este caso se ha ido más allá, porque además estas mediciones se han relacionado en tiempo real con la respuesta de la estructura en el límite de sus capacidades resistentes, aportada por el modelo digital, llevando a cabo una interpretación automática y representando por ello un elemento muy importante de la gestión del puente.

Durante los 9 meses, de enero a octubre de 2021, que ha venido funcionando la monitorización del Puente se ha mantenido esta herramienta tan potente y fácil de interpretar: Para el Puente del Alamillo se ha elaborado una plataforma web, que ha trabajado 24 horas al día 365 días al año, donde se han recogido de manera continua todas las señales de

todos los instrumentos instalados en el Puente, donde se han procesado para obtener la magnitud ingenieril de las medidas, se han registrado y almacenado generando un archivo histórico, y donde se han venido comparando también de manera continua con los límites establecidos en el Informe avanzado generado a partir del modelo para cada uno de ellos, permitiendo seguir directamente y en tiempo real a partir de unos indicadores muy sencillos el comportamiento de la estructura en diferentes planos.

Para cada parámetro analizado se muestra no solo el dato medido por el aparato y los límites entre los que se debería mover para un correcto funcionamiento de la estructura, sino que se ha implementado una presentación gráfica con colores para hacerla más evidente: en color verde un comportamiento adecuado, en amarillo un comportamiento cercano a los límites establecidos y que nos deben hacer tomar medidas y en rojo un comportamiento fuera de lo deseable. Si se superaran los valores expuestos como límite la plataforma además de mostrarlo genera un mensaje de alerta.

La plataforma asimismo permite consultar el histórico de medidas y generar gráficas, con lo que se pueden comparar resultados de medidas entre sensores (por ejemplo en el caso de vibración de tirantes con las medidas de viento) desde donde poder obtener conclusiones.

Constituye esta plataforma como podemos observar un elemento muy intuitivo de seguir, incluso para los no versados en estructuras, y muy útil a efectos de vigilancia estructural por un lado y de mantenimiento por otro, por cuanto en función de la evolución del comportamiento de determinados elementos se pueden planificar y programar las revisiones y las acciones de mantenimiento que procedan.

En la plataforma una vez accedemos nos encontramos con el siguiente esquema del Puente con la situación de grupos de instrumentos, sobre los que picando podemos acceder a los registros de medición realizados.

La plataforma cuenta con una escala de colores para indicar el estado de “salud” de cada uno de los nodos. También se permite una visualización en modo de tabla para comprobar que los valores se encuentran dentro de los intervalos predefinidos.

En el menú evolución de los parámetros se nos permite ver las gráficas de las señales de los sensores empleados y su evolución en el tiempo

En “descargas” podemos obtener los listados con los valores medidos, entre otros en formato excell o texto , para poder trabajar con ellos

En el apartado “alertas” permite una breve recopilación de los históricos de daños detectados en toda la estructura.

Se muestran también los resultados de la estación meteorológica instalada, importante para correlacionar con las mediciones aportadas por el resto de instrumentos.

Manual de mantenimiento

Como último punto de la estrategia seguida se ha procedido a la revisión del manual de mantenimiento actualmente existente, ya que es fundamental para recuperar su función el actualizarlo a la realidad de lo construido, inspeccionado y medido. La inspección especial realizada (de estado cero) habrá de servir de referencia para las siguientes inspecciones y para programar también las actividades de mantenimiento.

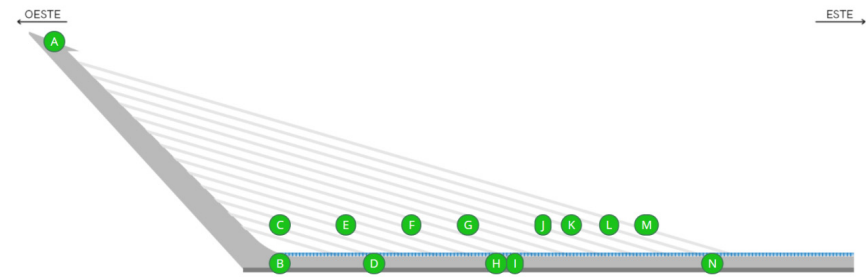


Figura 25. Situación instrumentos plataforma web auscultación Alamillo. IDVIA (UPV) 2.021

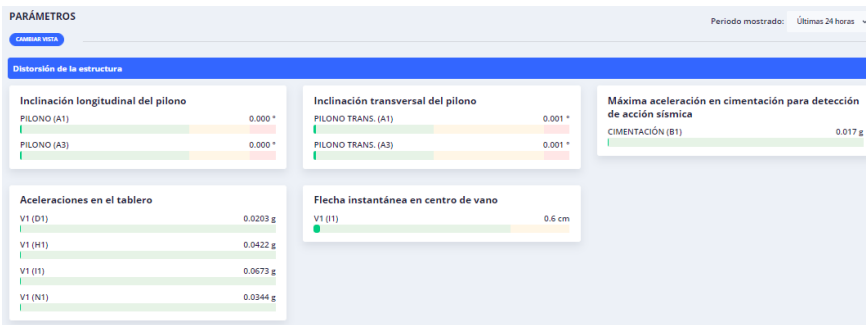


Figura 26. Salidas plataforma web auscultación Alamillo. Parámetros. IDVIA (UPV) 2.021

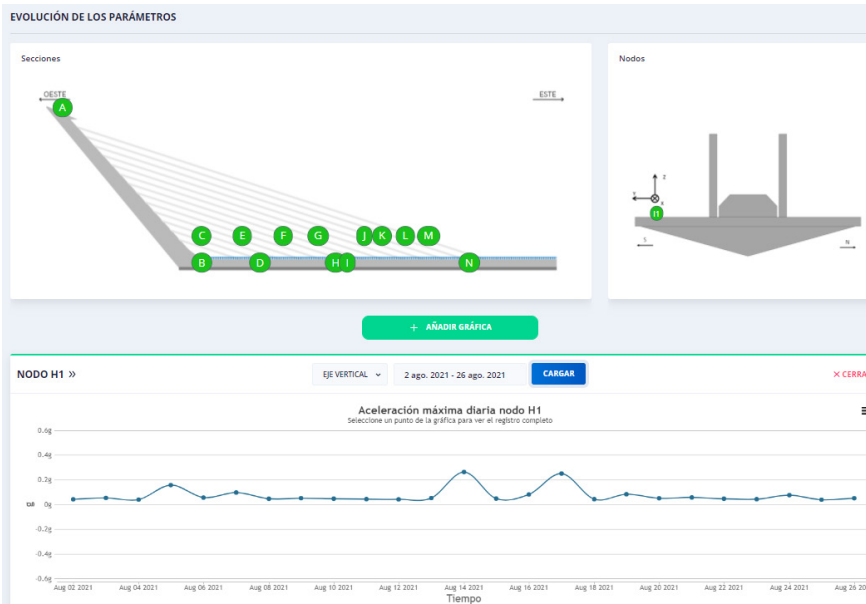


Figura 27. Salidas plataforma web auscultación Alamillo. Acelerómetro H1. IDVIA (UPV) 2.021

Registros Alamillo										
Fecha/hora inicio: 01-09-2021 08:00					Fecha/hora fin: 01-09-2021 21:00					
Sección A										
Nodo A1			Nodo A2			Nodo A3			Nodo B1	
Inclinación			Aceleración			Inclinación			Aceleración	
Fecha	Eje Longitudinal (g)	Eje Transversal (g)	Fecha	Eje Longitudinal (g)	Eje Transversal (g)	Fecha	Eje Longitudinal (g)	Eje Transversal (g)	Fecha	Eje Longitudinal (g)
01/09/21	0	0	01/09/21	0.00036	0.00036	01/09/21	0.03334	0.03334	01/09/21	0.03334
02/09/21	0	0	02/09/21	0.00035	0.00035	02/09/21	0.03457	0.03457	02/09/21	0.03457
03/09/21	0	0	03/09/21	0.00035	0.00037	03/09/21	0.03531	0.03531	03/09/21	0.03531
04/09/21	0	0	04/09/21	0.00034	0.00037	04/09/21	0.03587	0.03587	04/09/21	0.03587
05/09/21	0	0	05/09/21	0.00035	0.00036	05/09/21	0.03705	0.03705	05/09/21	0.03705
06/09/21	0	0	06/09/21	0.00034	0.00036	06/09/21	0.03705	0.03705	06/09/21	0.03705
07/09/21	0	0	07/09/21	0.00034	0.00036	07/09/21	0.03705	0.03705	07/09/21	0.03705
08/09/21	0	0	08/09/21	0.00034	0.00036	08/09/21	0.03705	0.03705	08/09/21	0.03705
09/09/21	0	0	09/09/21	0.00034	0.00036	09/09/21	0.03705	0.03705	09/09/21	0.03705
10/09/21	0	0	10/09/21	0.00034	0.00036	10/09/21	0.03705	0.03705	10/09/21	0.03705
11/09/21	0	0	11/09/21	0.00034	0.00036	11/09/21	0.03705	0.03705	11/09/21	0.03705
12/09/21	0	0	12/09/21	0.00034	0.00036	12/09/21	0.03705	0.03705	12/09/21	0.03705
13/09/21	0	0	13/09/21	0.00034	0.00036	13/09/21	0.03705	0.03705	13/09/21	0.03705
14/09/21	0	0	14/09/21	0.00034	0.00036	14/09/21	0.03705	0.03705	14/09/21	0.03705
15/09/21	0	0	15/09/21	0.00034	0.00036	15/09/21	0.03705	0.03705	15/09/21	0.03705
16/09/21	0	0	16/09/21	0.00034	0.00036	16/09/21	0.03705	0.03705	16/09/21	0.03705
17/09/21	0	0	17/09/21	0.00034	0.00036	17/09/21	0.03705	0.03705	17/09/21	0.03705
18/09/21	0	0	18/09/21	0.00034	0.00036	18/09/21	0.03705	0.03705	18/09/21	0.03705
19/09/21	0	0	19/09/21	0.00034	0.00036	19/09/21	0.03705	0.03705	19/09/21	0.03705
20/09/21	0	0	20/09/21	0.00034	0.00036	20/09/21	0.03705	0.03705	20/09/21	0.03705
21/09/21	0	0	21/09/21	0.00034	0.00036	21/09/21	0.03705	0.03705	21/09/21	0.03705

Figura 28. Salidas plataforma web auscultación Alamillo. Registros exportar. IDVIA (UPV) 2.021

Se plantea así una programación de las futuras inspecciones y operaciones de mantenimiento periódicas y programables, recogiendo en ellas el uso de medios técnicos disponibles a la fecha. En este documento se presta especial atención a los tirantes, puesto que hay que tener en

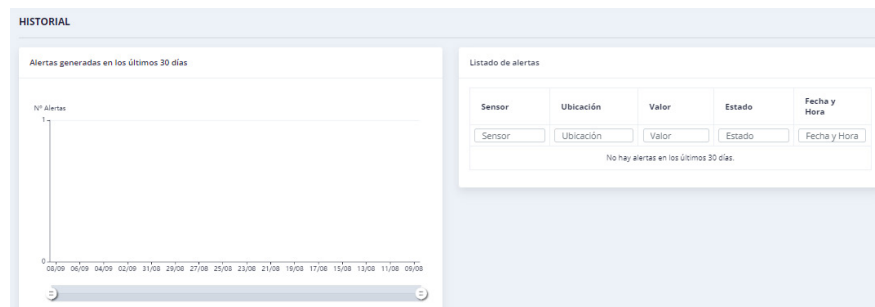


Figura 29. Salidas plataforma web auscultación Alamillo. Alertas. IDVIA (UPV) 2.021

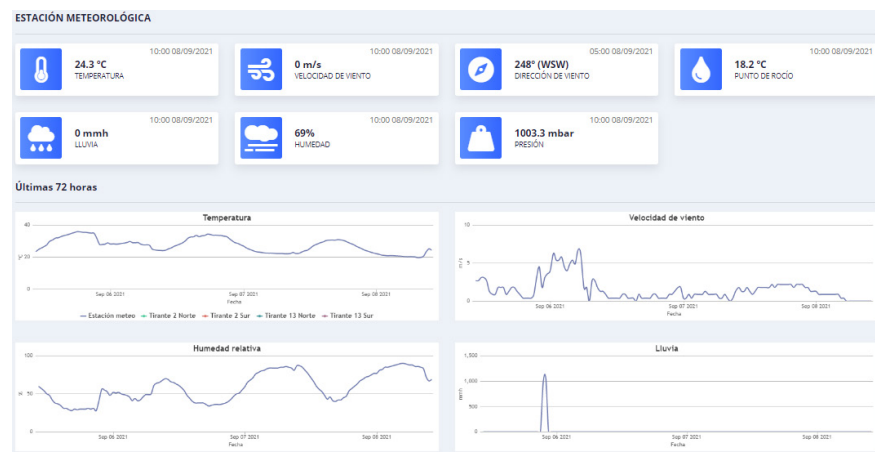


Figura 30. Salidas plataforma web auscultación Alamillo. Meteorología. IDVIA (UPV) 2.021

cuenta que son los elementos más vulnerables de la estructura, y que cuentan con una vida útil sensiblemente inferior a la vida útil del conjunto de la estructura.

El Manual de Mantenimiento es la herramienta que permite llevar a la práctica las actividades necesarias para que el nivel de prestaciones para el que ha sido proyectado el

Puente no baje durante la vida útil por debajo de cierto umbral, vinculado a las características de resistencia, durabilidad, funcionalidad y, en su caso, estéticas. El mantenimiento es una actividad de carácter preventivo, que evita o retrasa la aparición de problemas que, de lo contrario, tendrían una resolución más complicada y un coste económico muy superior. Durante toda la fase de conservación

y explotación, se irán incorporando los resultados de las inspecciones y de las mejoras realizadas, para poder realizar un seguimiento del estado de la estructura y, a partir de esta práctica, planificar la estrategia de mantenimiento preventiva. Por lo tanto, este Manual se plantea como lo suficientemente abierto y flexible como para poder agrupar estas actuaciones que se desarrollarán a lo largo del tiempo.

En la figura siguiente se muestra un diagrama que, en abscisas, presenta el tiempo transcurrido desde el final de la construcción y, en ordenadas, de forma genérica, las prestaciones R que ofrece la estructura y las solicitaciones S que actúan sobre ella, en forma de cargas, agresión ambiental, etc. Las curvas que concluyen en el punto D corresponden con una situación “normal”.

La capacidad resistente R (de trazo continuo) decae como consecuencia del inexorable deterioro de los materiales (carbonatación del hormigón, ingreso de cloruros, etc.). Tal degradación es lenta al principio pero se acelera más adelante. Así por ejemplo, la corrosión de las armaduras y la pérdida de recubrimiento se manifiesta bastante tiempo después de concluida la construcción, y los deterioros y la pérdida de capacidad resistente se aceleran a partir de entonces.

Las solicitaciones S (de trazo discontinuo) crecen porque los tráfico, cargas muertas, etc. han ido aumentando y la agresión ambiental también. Cuando ambas curvas se cortan (punto D) es que se ha llegado al umbral de aceptación (se ha omitido, por claridad, el margen de seguridad) y, por consiguiente, se habrá alcanzado la vida útil.

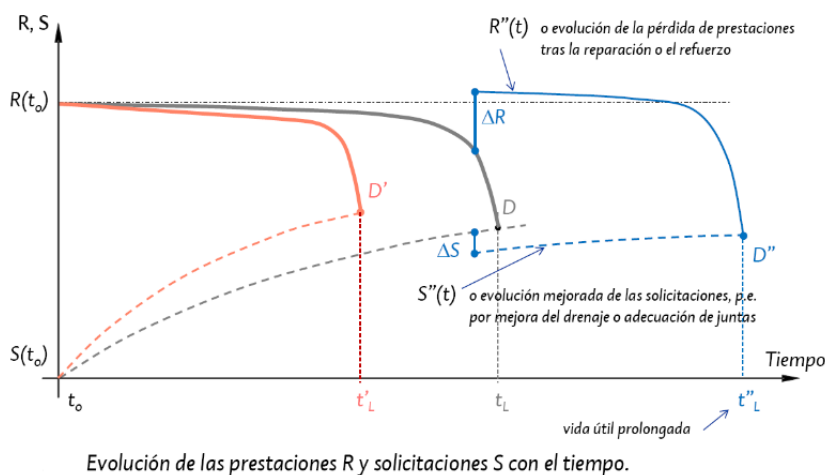
Evolución de las prestaciones R y solicitaciones S con el tiempo.

Figura 31. Evolución de prestaciones y solicitaciones sobre estructura con el tiempo. Fhecor Ingenieros Consultores

Conclusiones

De la relación de actividades, estudios e inspecciones llevadas a cabo sobre el Puente en el marco de esta estrategia avanzada de inspección y seguimiento podemos concluir que el estado del Puente es satisfactorio desde el punto de vista de su conservación, y asimismo en lo relativo a la seguridad estructural, que no se ha visto mermada con el paso de los años.

También hemos podido observar a partir de todos las consideraciones previas y estudios realizados la importancia de mantener viva la estrategia desarrollada, con especial atención sobre el estado del Puente y sus elementos, ejecutando aquellas actividades de conservación que vayan apareciendo como necesarias, las inspecciones periódicas precisas y detalladas en el Manual de Conservación y llevando a cabo la auscultación y valoración del comportamiento del Puente de manera continua.

Bibliografía

- [1] "Puente del Alamillo. Sevilla. Informe técnico 205". FCC Construcción S.A. Enero 1.992
- [2] "Propuesta del paso Alamillo (Camas-San Lázaro II). Sevilla" .III Premio internacional Puente de Alcántara .Fundación San Benito de Alcántara. 1.992
- [3] "Construcción del Puente del Alamillo". Alberto Díaz Hermidas. 1992
- [4] "Puente del Alamillo. Manual de Conservación". ALEPH Consultores. José M. González Barcina. 1.998
- [5] "Dywidag stay cable. Versión 2. Technical report for Puente del Alamillo". Marzo 1.990. Dywidag Systems International
- [6] "Campaña experimental de toma de datos para el análisis de la amortiguación de los tirantes del Puente del Alamillo. Informe". Cátedra de Puentes. ETS Ingenieros Caminos, Canales y Puertos. UPC. Joan R. Casas Rius y Ángel C. Aparicio. Julio 2.004
- [7] "Proyecto de amortiguamiento de los tirantes del Puente del Alamillo (Sevilla)". Carlos Alonso Cobo, septiembre de 2.005
- [8] "Instruction for maintenance of the hardware of Maurer Adaptive Cable Dampers (ACD). Alamillo Bridge .Sevilla". Maurer Shöne. Mayo 2.008
- [9] "Informe sobre ensayos experimentales realizados en el Puente del Alamillo después de la instalación de los amortiguadores" . Joan R. Casas Rius y Ángel C. Aparicio. Mayo 2.008
- [10] "Rain-wind-induced cable vibrations in the Alamillo cable-stayed bridge (Sevilla, Spain). Assessment and remedial action" Joan R. Casas Rius y Ángel C. Aparicio. Mayo 2.009
- [11] "Control de funcionamiento de sistemas de amortiguadores del Puente del Alamillo". Ecocivil-Cauchil. Marzo 2.019
- [12] "Inspection of Magnetorheological Cable Dampers of Alamillo Bridge, Seville, Spain", Maurer Shöne. Mayo 2.019
- [13] "Actuación de emergencia para la inspección especial y evaluación del nivel de seguridad del Puente del Alamillo, situado en la A-8083, Sevilla". API Movilidad, S.A. Diciembre de 2.019
- [14] "Puente Alamillo. Inspección de tirantes". Dywidag Systems International. Octubre/Noviembre 2.019
- [15] "Manual de conservación del Puente del Alamillo". ALEPH Consultores. Diciembre 2.019
- [16] "Propuesta de instrumentación para el Puente del Alamillo". IDVIA ingeniería (Universidad Politécnica de Valencia), septiembre 2.020
- [17] "Puente del Alamillo. Informe estructural primigenio. 001-IEA-ALM. V.02". IDVIA ingeniería (Universidad Politécnica de Valencia), marzo 2.021
- [18] "Puente del Alamillo. Informe estructural avanzado. 001-IEA-PA. V.01". IDVIA ingeniería (Universidad Politécnica de Valencia), marzo 2.021
- [19] "Inspección especial de tirantes y evaluación del nivel de seguridad del Puente del Alamillo, situado en la carretera A-8083. Sevilla". Diciembre 2.019. IMESAPI, S.A. ♦