

Extensión de la vida útil de viaductos ferroviarios centenarios mediante monitorización estructural

Extension of the lifespan of centenary railway viaducts through structural monitoring

Medardo Alexander Hernández Rivera^a, Pedro Calderón Bofías^b, Juan Antonio García Cerezo^c, Pedro Antonio Calderón García^d

^aIngeniero Civil, Master en Ingeniería del hormigón. CALSENS S.L. Responsable de proyectos. mhernandez@cal-sens.com

^bGraduado en Ingeniería Mecánica. CALSENS S.L. Responsable I+D. pcalderonb@cal-sens.com ^cIngeniero de caminos, canales y puertos. Ferrocarriles de la Generalitat Valenciana (FGV). Unidad Técnica de Alicante y Proyectos. juanantonio.garcia@fgv.es ^dDoctor Ingeniero de caminos, canales y puertos. Universidad Politécnica de Valencia (UPV). Profesor titular. Catedrático. pcaldero@upv.es

RESUMEN

La monitorización estructural evalúa el estado de las infraestructuras mediante el seguimiento de deformaciones, vibraciones y condiciones meteorológicas. Es crucial en estructuras antiguas que requieren prolongar su vida útil antes de su rehabilitación o sustitución. Este artículo analiza la monitorización de los viaductos ferroviarios de Algar y Mascarat, en la línea 9 de FGV-TRAM Alicante-Denia, construidos entre 1913 y 1915. Debido a su antigüedad, se implementó un sistema de monitoreo en tiempo real con sensores convencionales y de fibra óptica. Esta tecnología permite obtener información continua y extender su vida útil de forma segura.

ABSTRACT

Structural monitoring assesses the condition of infrastructures by tracking deformations, vibrations, and weather conditions. It is crucial for aging structures that need to extend their service life before rehabilitation or replacement. This article analyzes the monitoring of the Algar and Mascarat railway viaducts on line 9 of FGV-TRAM Alicante-Denia, built between 1913 and 1915. Due to their age, a real-time monitoring system with conventional and fiber optic sensors was implemented. This technology provides continuous information and helps extend their service life safely.

PALABRAS CLAVE: viaducto ferroviario, monitorización, fibra óptica, vida útil.

KEYWORDS: railway viaduct, monitoring, fiber optic, service life.

1. Introducción

La monitorización estructural es un proceso fundamental para evaluar el comportamiento y la integridad de las infraestructuras a lo largo del tiempo, permitiendo detectar daños y predecir su evolución bajo diferentes condiciones de carga y entorno. En este contexto, los sensores de fibra óptica han emergido como una tecnología clave debido a su alta sensibilidad, inmunidad a interferencias electromagnéticas y capacidad

para medir múltiples parámetros simultáneamente.

La línea 9 ferroviaria de Benidorm – Denia, caracterizada por ser de vía estrecha y sin electrificar, pertenece a la red de FGV en la provincia de Alicante. Los viaductos metálicos de esta línea fueron construidos entre los años 1913 y 1915 con materiales de la época y de acuerdo con la normativa vigente en aquel momento, aprobada en 1902, que fue la primera

instrucción española para el cálculo de puentes ferroviarios.

Este artículo presenta la monitorización estructural en dos viaductos metálicos: el Viaducto sobre el río Algar y el Viaducto sobre el barranco de Mascarat, en él, se describen las características de cada estructura, las técnicas de monitorización empleadas y los resultados obtenidos a lo largo del período de observación. Además, se analiza la extensión de la vida útil de los viaductos con base en los datos recopilados mediante inspecciones, pruebas de carga e informes de seguimiento.

El propósito de este artículo es proporcionar una visión de las aplicaciones prácticas de la monitorización estructural mediante sensores de fibra óptica en infraestructuras ferroviarias, evaluando cómo esta tecnología contribuye a la gestión del mantenimiento y la prolongación de la vida útil de los viaductos.

2. Monitorización estructural

La monitorización de la salud estructural (SHM, por sus siglas en inglés) se puede describir como el proceso periódico, continuo o permanente de recolección de parámetros que reflejen de manera adecuada el comportamiento y desempeño estructural. Vijayan et al. [1] explican que SHM es un proceso que recopila datos de las estructuras y los utiliza para detectar y predecir daños en función de las condiciones actuales y futuras. Farrar et al. [2] lo definen como la medición in situ y no destructiva de los entornos de funcionamiento, carga y respuesta crítica de una estructura, a partir de la cual se extraen características sensibles a los daños analizándolos estadísticamente.

Domaneshi et al. [3] destacan la importancia del seguimiento y control para mejorar la resiliencia de las estructuras, específicamente en puentes.

3. Fibra Óptica

Los Sensores de Fibra Óptica (FOS, por sus siglas en inglés) son herramientas que emplean fibras ópticas como medio de detección para medir diversos parámetros, como deformación, temperatura, vibración, corrosión, entre otros. Su principio de funcionamiento se basa en la modulación de propiedades de la luz, como intensidad, longitud de onda, fase o polarización, en respuesta a los cambios en el entorno o la estructura monitoreada.

En las últimas décadas, el uso de sensores ópticos ha suscitado un creciente interés en múltiples campos del conocimiento [4].

Gracias a su inmunidad a interferencias electromagnéticas, su capacidad de sensorización no invasiva, su alta sensibilidad y su habilidad para la multiplexación, que permite la medición de múltiples magnitudes a través de un único canal, estos sensores se han consolidado como tecnologías esenciales, con aplicaciones destacadas en el campo de la ingeniería civil [5] [6].

4. Viaducto sobre el río Algar

El Viaducto sobre el río Algar (Ver Figura 1), situado en el PK 54+640, se encuentra sobre el Camí l'Algar en el término municipal de Altea. La estructura pertenece a la línea 9 tramo Benidorm-Denia, entre las estaciones de Garganes y Cap Negret. El viaducto está incluido en el catálogo de bienes y espacios protegidos de la Generalitat Valenciana, siendo su nivel de protección de Bien de Relevancia Local (BRL), con categoría de Monumento de Interés Local, de titularidad pública. La estructura está formada por 8 vanos isostáticos iguales de 21,48 m de luz cada uno.

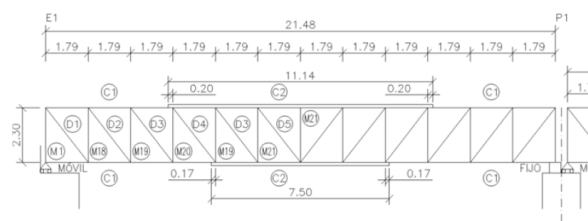


Figura 1. Viaducto sobre el río Algar

Cada vano tipo está formado por dos celosías trianguladas paralelas tipo Pratt, formadas por un cordón superior, un cordón inferior, montantes y diagonales, resueltas con barras de acero y uniones roblonadas (Ver Figura 2).

Las dos celosías o cuchillos están separadas entre sí 3,60 m, quedando vinculadas en el plano inferior mediante elementos denominados viguetas y de un arriostramiento inferior mediante cruces de San Andrés, formando una sección en “U” (Ver Figura 3). El canto total de la estructura principal es de 2,30 m. La disposición de las viguetas acompaña a los montantes, generando un total de 12 módulos iguales de 1,79 m entre ejes de montantes y viguetas.

Debido a sus años en servicio el viaducto no cumple los estados límites para acciones definidas en la IAPF. Adicional a esto, en base a estudio realizado para el tráfico real considerado durante el historial de cargas se observa que las viguetas y largueros presentan un daño acumulado superior a la unidad (Ver Tabla 1), por tanto, se consideran elementos agotados a fatiga.



**Figura 2. Alzado esquemático del puente.
Dimensiones geométricas de uno de los vanos**

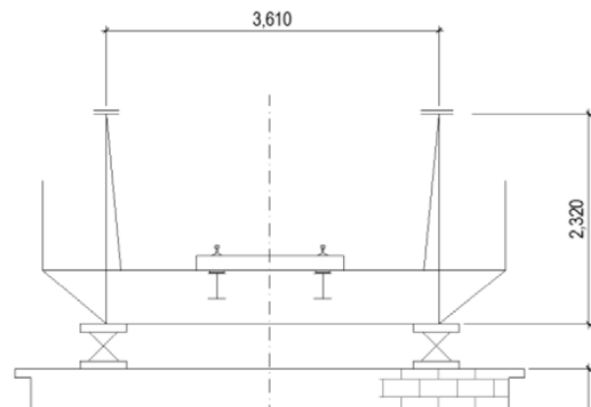


Figura 3. Esquema de la sección transversal del puente

Tabla 1. Daño acumulado para los diferentes perfiles hasta el 2019 del viaducto de Algar

Elemento	Daño acumulado estimado hasta 2019
Cordón sin reforzar C1	0,76
Cordón reforzado C2	0,39
Vigueta V4	2,32
Largueros L1	2,75
Diagonales D1	0,10
Diagonales D2	0,12
Diagonales D3	0,12
Diagonales D4	0,09
Diagonales D5	0,36
Montante M1	0,29
Montante M18	0,07
Montante M19	0,07
Montante M20	0,01
Montante M21	0,01
Arriostramiento A1	0,16

4.1 Monitorización durante la explotación del viaducto de Algar

Tras unas profundas inspecciones previas, en las que no se detectaron síntomas de daños por fatiga, se propuso mantener la estructura en servicio controlando su comportamiento con un seguimiento exhaustivo, que incluía una monitorización en continuo. A pesar de que las estimaciones teóricas no coinciden con lo encontrado en las inspecciones, el diseño de la monitorización se llevó a cabo teniendo en consideración el análisis de fatiga descrito por Bertolesi et al. [7] los cuales realizan un análisis de fatiga analítico y experimental.

Para ello se controlaron magnitudes como las flechas en centro de vano, deformaciones en perfiles, aceleraciones de la estructura, temperaturas y velocidad de viento. También fue requerido controlar el comportamiento de los apoyos, especialmente de los apoyos móviles (en este caso en los apoyos del estribo Alicante).

Para obtener los valores de estos parámetros en el viaducto se utilizaron las técnicas que se recogen en la Tabla 2.

El sistema de monitorización estuvo operativo durante 982 días entre el 01 de enero de 2022 y el 09 de septiembre del 2024.

Tabla 2. Parámetros y técnicas empleadas en la monitorización

Parámetro a monitorizar	Técnica empleada
Flecha en centro de vano	Nivelación mediante topografía convencional
Deformaciones en perfiles	Sensores Strain FBG
Aceleraciones	Acelerómetros piezoeléctricos
Temperatura ambiente y temperatura en estructura	Termopares FBG
Movimientos en apoyos en estribos	Sensores de desplazamiento FBG
Velocidad de viento	Anemómetro ultrasónico

4.1.1 Extensión de vida útil del viaducto de Algar

En conjunto con la monitorización durante la explotación en el viaducto se realizaban inspecciones quincenales con el objetivo de obtener información sobre el estado funcional y resistente del puente. Adicional a esto, se realizaban pruebas de cargas estáticas y dinámicas, informes de extensión de servicio, realizados cada dos meses, informes de mantenimiento, e informes de seguimiento mensuales y semanales. Todo esto permitía tener un análisis integral del estado de la estructura logrando dictaminar la prolongación del servicio. Logrando extender la vida útil del viaducto durante todo el periodo de monitorización.

5. Viaducto sobre el barranco de Mascarat

El viaducto de Mascarat (Ver Figura 4), situado en el PK 60+974, se encuentra sobre el barranco de Salat, perteneciente al municipio de Calp, Alicante. El viaducto se encuentra situado entre dos túneles excavados en la montaña, y está formado por un único tramo metálico de aproximadamente, 43,20 m de longitud, cuyos estribos apoyan directamente sobre los macizos rocosos del Barranco, con un tablero recto que soportando una vía en curva cerrada.



Figura 4. Puente sobre el barranco de Mascarat

La estructura está formada por un único vano isostático de 43,20 m. El vano está formado por dos celosías trianguladas paralelas tipo Pratt, formadas por un cordón superior, un cordón inferior, montantes y diagonales, resueltas con barras de acero y uniones

roblonadas. La sección transversal del presente viaducto alberga una única vía de tren, que presenta un trazado curvo en planta (Ver Figura 5).

Las dos celosías o cuchillos están separadas entre sí 4,00 m, quedando vinculadas en el plano superior mediante elementos denominados viguetas, y de un doble arriostramiento en el plano inferior y en la sección transversal mediante cruces de San Andrés, formando una sección en cajón cerrado (Ver Figura 6). El canto total de la estructura principal es de 4,20 m. La disposición de las viguetas acompaña a los montantes, generando un total de 12 módulos iguales de 3,60 m entre ejes de montantes y viguetas.

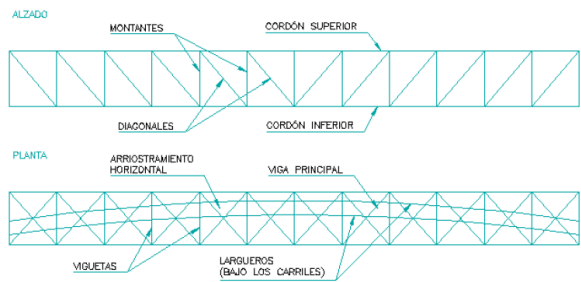


Figura 5. Esquemas del alzado y planta del viaducto sobre el Mascarat

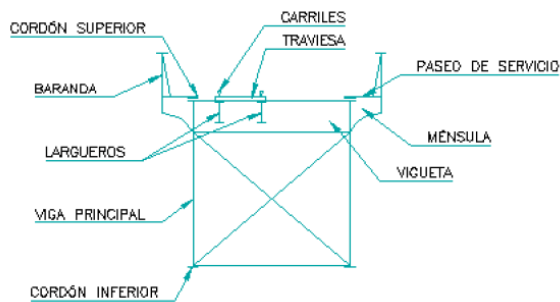


Figura 6. Sección transversal del tablero del viaducto sobre barranco Mascarat

Al igual que en el viaducto de Algar, el viaducto de Mascarat, debido a sus años en servicio, contaba con elementos críticos cuya vida útil debido a la fatiga ya habían sido superado (Ver Tabla 3).

Tabla 3. Daño acumulado para los diferentes perfiles hasta el 2019 del viaducto de Mascarat

Elemento	Daño acumulado estimado hasta 2019
Cordón sin reforzar C7	0,17
Cordón reforzado 1 C8	0,13
Cordón reforzado 2 C9	0,12
Vigueta	1,24
Larguero	2,05
Diagonal D7	0,09
Diagonal D11	0,06
Diagonal D12	0,01
Diagonal D15	0,11
Diagonal D16	0,01
Montante M14	0,57
Montante M16	0,17
Montante M17	0,21
Arriostramiento Superior	0,00
Arriostramiento Inferior	0,00
Arriostramiento Transversal	0,00

5.1 Monitorización durante la explotación de viaducto de Mascarat

De igual forma para el control del comportamiento de la estructura se utilizaron los mismos parámetros y técnicas realizadas en el viaducto de Algar y mencionadas en la Tabla 2.

En el viaducto se instalaron un total de 35 sensores de los cuales 31 fueron de fibra óptica y 3 piezoeléctricos. El sistema estuvo operativo durante 829 días entre el 01 de enero de 2022 y el 09 de abril de 2024.

5.1.1 Extensión de vida útil del viaducto de Mascarat

Nuevamente para un análisis integral de la información con el objetivo de dictaminar la prolongación de del servicio en el viaducto, la metodología seguida es la misma que se utilizó en el viaducto sobre de Algar. Se realizaron inspecciones quincenales, pruebas de cargas estáticas y dinámicas, informes de extensión de servicio, realizados cada dos meses, informes de

mantenimiento e informes de seguimiento mensuales y semanales.

En total en el periodo de la monitorización se realizaron 59 inspecciones, 14 pruebas de carga, 27 informes de seguimiento mensual, 109 informes de seguimiento semanal y 15 informes de extensión de servicio. Logrando extender la vida útil del viaducto durante todo el periodo de monitorización.

Agradecimientos

Los autores desean expresar su agradecimiento a FGV (Ferrocarrils de la Generalitat Valenciana) por darnos la oportunidad de llevar a cabo estos trabajos. También queremos mostrar nuestro agradecimiento por el magnífico trabajo en el puente de Eduardo Luengo, Salvador Ivorra, Benjamín Torres, Daniel Tasquer y Jesús Martínez.

Referencias

- [1] D. S. Vijayan et al., “Development of Intelligent Technologies in SHM on the Innovative Diagnosis in Civil Engineering—A Comprehensive Review,” Aug. 01, 2023, Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). doi: 10.3390/buildings13081903.
- [2] C. R. Farrar and K. Worden, “An introduction to structural health monitoring,” *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 365, no. 1851, pp. 303–315, Feb. 2007, doi: 10.1098/rsta.2006.1928.
- [3] M. Domaneschi, L. Martinelli, R. Cucuzza, M. Noori, and G. C. Marano, “Structural Control and Health Monitoring Contributions to Service-life Extension of Bridges,” *ce/papers*, vol. 6, no. 5, pp. 741–745, Sep. 2023, doi: 10.1002/cepa.2104.
- [4] M. Elsherif et al., “Optical Fiber Sensors: Working Principle, Applications, and Limitations,” *Adv Photonics Res*, vol. 3, no. 11, Nov. 2022, doi: 10.1002/adpr.202100371.
- [5] T. Wu, G. Liu, S. Fu, and F. Xing, “Recent progress of fiber-optic sensors for the structural health monitoring of civil infrastructure,” Aug. 02, 2020, MDPI AG. doi: 10.3390/s20164517.
- [6] V. M. Rădulescu, G. M. T. Rădulescu, S. M. Naş, A. T. Rădulescu, and C. M. Rădulescu, “Structural Health Monitoring of Bridges under the Influence of Natural Environmental Factors and Geomatic Technologies: A Literature Review and Bibliometric Analysis,” *Buildings*, vol. 14, no. 9, p. 2811, Sep. 2024, doi: 10.3390/buildings14092811.
- [7] E. Bertolesi, M. Buitrago, J.M. Adam, P.A. Calderón, “Fatigue assessment of steel riveted railway bridges: Full-scale tests and analytical approach”. Feb. 07, 2021, doi: 10.1016/j.jcsr.2021.106664