

Evaluación de sensores de bajo coste LARA para la monitorización de deformaciones en puentes durante pruebas de carga estática

Assessment of low-cost LARA sensors for monitoring bridge deformations during static load testing

Erika Delgado Zhagui ^a, Seyedmilad Komarizadehasl ^b, Giorgio Ballati ^c,
Juan Victor Tirado Gascón ^d y José Turmo ^e.

^a Máster en Ingeniería Estructural. Tunnel and Bridge Technologies. Ingeniera de Estructuras. erika.delgado@tbtechno.com

^b Dr Ingeniero Civil. Universitat Politècnica de Catalunya. Profesor Lector. milad.komary@upc.edu

^c Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. COMSA. Ingeniero de Puentes y Estructuras. giorgio.ballati@comsa.com

^d Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. COMSA. Jefe Departamento Técnico. juan.tirado@comsa.com

^e Dr Ingeniero de Caminos. Universitat Politècnica de Catalunya. Catedrático de Universidad. jose.turmo@upc.edu

RESUMEN

El uso de instrumentación de bajo coste, como los sensores LARA (Low-cost Adaptable Reliable Accelerometer/Inclinometer), es clave para hacer el monitoreo estructural más accesible y eficiente. Este artículo valida su aplicación en pruebas de carga estática en el puente de acceso ferroviario a la Terminal T1 del Aeropuerto Josep Tarradellas BCN-El Prat, construido por COMSA, comparando su eficacia con los sensores comerciales. Se propone medir las deformaciones verticales mediante la rotación de los apoyos como una alternativa más eficiente a los métodos tradicionales. Este estudio sienta las bases para futuros avances en evaluación estructural, mejorando la seguridad y durabilidad de infraestructuras.

ABSTRACT

The use of low-cost instrumentation, such as LARA (Low-cost Adaptable Reliable Accelerometer/Inclinometer) sensors, is key to make structural monitoring more accessible and efficient. This paper validates their application in static load tests on the railway access bridge to Terminal T1 of Josep Tarradellas BCN-El Prat Airport, built by COMSA, comparing their efficiency with commercial sensors. It is proposed to measure vertical deformations through support rotation as a more efficient alternative to traditional methods. This study sets the stage for future advances in structural evaluation, improving the safety and durability of infrastructures.

PALABRAS CLAVE: pruebas de carga, monitorización, bajo coste, estático, puentes, deformaciones.

KEYWORDS: load testing, monitoring, low cost, static, bridges, deformations.

1. Introducción

Las pruebas estáticas en puentes son clave para evaluar su comportamiento estructural, tanto antes de su puesta en servicio como durante su

vida útil. Estas pruebas validan las especificaciones de diseño y ayudan a identificar posibles desviaciones en el desempeño

estructural, proporcionando datos fundamentales para el diagnóstico, rehabilitaciones y mantenimiento [1].

Tradicionalmente, se están utilizando equipos topográficos que miden ópticamente los desplazamientos verticales en puntos específicos de la estructura. Sin embargo, este enfoque presenta varias limitaciones, como la necesidad de visibilidad directa entre los puntos de referencia, el elevado costo de los equipos y la complejidad logística asociada a su instalación y operación [1].

Otra alternativa común es el uso de galgas extensométricas o transductores de desplazamiento, los cuales permiten medir deformaciones y desplazamientos de forma directa. No obstante, estos dispositivos también enfrentan desafíos significativos, como la necesidad de una instalación precisa, la dependencia de condiciones ambientales y la complejidad en su mantenimiento y calibración, lo que puede restringir su aplicabilidad en ciertos contextos [2][3].

En respuesta a estos desafíos, surge la necesidad de adoptar soluciones más accesibles y eficientes para la medición de deformaciones en pruebas estáticas. Una alternativa prometedora es el uso de sensores de bajo costo, como los inclinómetros, que permiten calcular de manera indirecta las deformaciones verticales a partir de las rotaciones registradas en puntos estratégicos de la estructura.

Este trabajo presenta la implementación y evaluación de LARA (Low-cost Adaptable Reliable Accelerometer/Inclinometer), un sensor de bajo costo que combina características destacables, como conectividad inalámbrica, autonomía operativa, almacenamiento local y adquisición remota de datos [4][5]. Su capacidad para medir inclinaciones facilita la evaluación indirecta de deformaciones verticales, eliminando no solo la dependencia de métodos ópticos tradicionales, sino también la necesidad de mediciones directas que requieren una instalación precisa, dependiente de condiciones

ambientales y que a menudo presentan complejidades logísticas.

Para evaluar la fiabilidad de los datos registrados por los sensores LARA, se compararon las rotaciones obtenidas en los extremos del puente con las medidas por el sensor comercial IOLITEI-3XMEMS-ACC-8G de DEWESoft. A partir de estas rotaciones, un modelo de elementos finitos permitió estimar las deformaciones verticales en el centro del vano, las cuales se contrastaron con las mediciones experimentales realizadas por INDAICO, empresa experta en auscultación y control de estructuras, mediante el uso de un transductor de desplazamiento potenciométrico TR-0100 de Novotechnik. El estudio se llevó a cabo durante la prueba de carga estática en uno de los vanos del puente del nuevo acceso ferroviario a la Terminal T1 del Aeropuerto Josep Tarradellas Barcelona-El Prat, encargada por COMSA. Este análisis permitió evaluar la precisión de LARA en comparación con sistemas de referencia de alta precisión, proporcionando un marco integral para la caracterización estructural en pruebas estáticas de puentes. Además, se desarrollaron algoritmos en MATLAB para procesar y analizar los datos, eliminando la dependencia de software comercial y mejorando la precisión de las mediciones.

Con este enfoque, el presente trabajo propone avanzar en la adopción de soluciones más económicas y eficientes para el monitoreo estructural de puentes, fomentando el uso de tecnologías de código abierto y metodologías reproducibles en la ingeniería civil. La implementación de LARA en pruebas estáticas representa un avance significativo al reducir costos, simplificar la instrumentación y democratizar el acceso a herramientas de monitorización estructural, haciendo viable su aplicación en infraestructuras con recursos limitados.

Este documento aborda los siguientes capítulos: primero, la metodología, que incluye la descripción del puente analizado, la

instrumentación utilizada y el desarrollo de la prueba de carga estática; segundo, el diseño de algoritmos en MATLAB, creados específicamente para calcular las rotaciones a partir de los datos obtenidos durante las pruebas; a continuación, los resultados, que comprenden el análisis de los giros y las deformaciones verticales en el vano del puente, así como la evaluación de la precisión y viabilidad de los sensores LARA; y, finalmente, las conclusiones, que validan el uso de estos sensores como una alternativa eficiente y económica a los métodos tradicionales.

2. Metodología

2.1 Descripción del puente

El puente objeto de estudio forma parte del nuevo acceso ferroviario a la Terminal T1 del Aeropuerto Josep Tarradellas Barcelona-El Prat construido por COMSA. La estructura está

SECCIÓN TRANSVERSAL VANOS 1, 2 Y 13

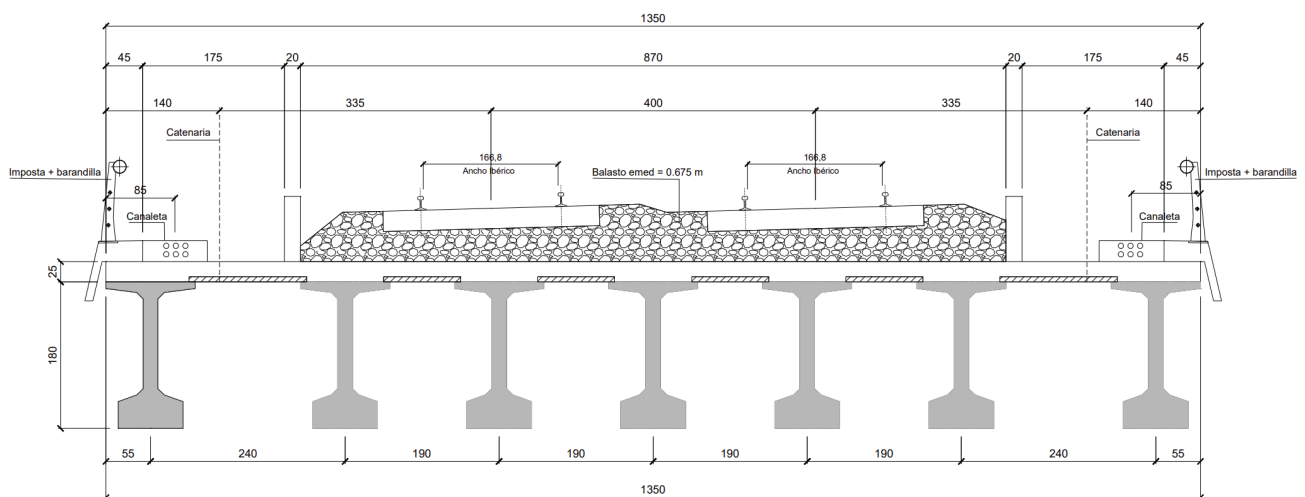


Figura 1. Sección transversal del vano ensayado.

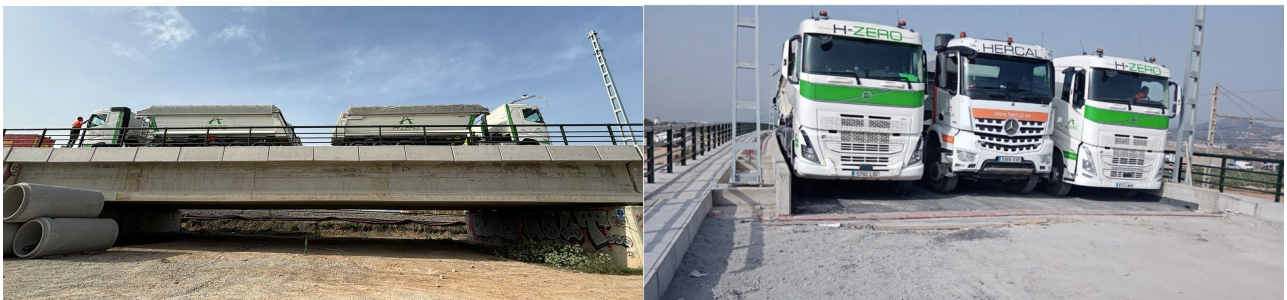


Figura 2. Realización de prueba estática en el puente de acceso ferroviario a la Terminal T1 del Aeropuerto Josep Tarradellas Barcelona-El Prat.

conformada por 13 vanos isostáticos de los cuales el vano 1 será evaluado en el presente informe. El tablero del vano 1 tiene una longitud de 27,61m y ancho total de 13,5m. La sección transversal está compuesta por una losa “in situ” con un canto constante de 0,25 m y por 7 vigas prefabricadas de hormigón pretensado de tipo HIPERTIGRE-180.18 con una anchura inferior de 0,80 m, una anchura superior de 1,10 m y un canto de 1,80 m. Las 5 vigas interiores están separadas 1,90 m entre sí y la distancia entre vigas de borde y las siguientes es de 2,40 m. Para mayor detalle, ver la Figura 1 la cual ilustra la sección transversal correspondiente al vano evaluado.

Debido a que las pruebas estáticas se llevaron a cabo durante una etapa de construcción en la que el balasto y las vías de acceso aún no estaban instalados (ver Figura 2), su contribución no se ha tomado en cuenta para la evaluación de su comportamiento estructural.

2.2 Instrumentación

La instrumentación incluyó el acelerómetro comercial IOLITEI-3XMEMS-ACC-8G el cual se nombrará como DEWE1 y sensores de bajo costo LARA nombrados como LARA1 y LARA2 dependiendo de su ubicación en el tablero. Las características de los sensores se detallan en la Tabla 1.

Tabla 1. Características de la instrumentación.

Sensor	Rango de medición	Precisión estática	Tasa de muestreo (Hz)
IOLITEI-3XMEMS-ACC-8G (DEWE1) [6]	$\pm 15^\circ$	0.001°	1000
LARA [5]	$0^\circ - 4^\circ$	0.002°	333

Además, se utilizó un transductor de desplazamiento potenciómetro TR-100, instalado por la empresa INDAICO, que se destaca por su diseño compacto de 18 x 18 mm y su alta precisión en la medición de deformaciones (ver Figura 3). Entre sus características sobresalientes se incluyen una linealidad de hasta $\pm 0.05\%$, una repetibilidad de ± 0.002 mm, y una vida útil de hasta 100 millones de movimientos [7].



Figura 3. Instalación del transductor potenciométrico de desplazamiento en el puente de estudio.

El acelerómetro comercial IOLITEI-3xMEMS-ACC-8g se alberga en la carcasa mostrada en la Figura 4. Se encuentra conectado mediante un cable LAN, permitiendo la

transmisión eficiente de datos sin necesidad de cables adicionales para la alimentación [6].

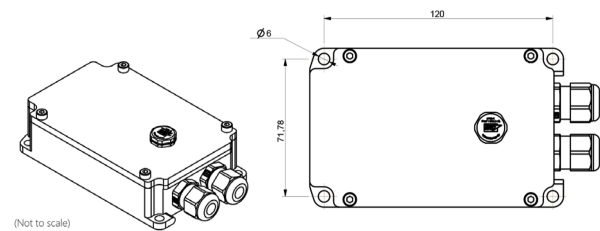


Figura 4. Caja de acelerómetros de IOLITEI-3xMEMS-ACC. Dimensiones en mm.

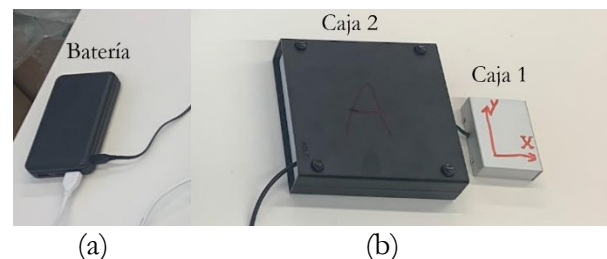


Figura 5. a) Batería, b) Caja de aluminio (Caja 1) y caja de color negro (Caja 2).

Los sensores LARA están alojados en una estructura diseñada para proteger y asegurar su funcionamiento en condiciones de prueba. La Figura 5.a muestra la batería que proporciona la energía necesaria para su funcionamiento autónomo. En la Figura 5.b, se muestra una carcasa de aluminio que alberga el acelerómetro la cual va fija a la estructura del puente y fue diseñada para ser ligera y resistente, facilitando su instalación y garantizando la protección del sensor contra factores externos. En la misma figura, se muestra la Caja 2 de color negro, que contiene el microprocesador y el sistema de adquisición de datos.

La instalación de los sensores se realizó mediante la fijación a la estructura del puente utilizando resina epoxi y tornillos, de manera que se asegure la estabilidad de los sensores y la precisión de las mediciones obtenidas.

2.3 Ubicación y distribución de sensores

Se instalaron los equipos de medida sobre los ejes de apoyo para registrar la inclinación durante la prueba de carga y con ello calcular la deflexión

vertical. El sensor DEWE1 fue ubicado en uno de los ejes de soporte del puente. El sensor LARA 1 fue instalado cerca de los soportes, operando junto con el sensor DEWE1. Y el sensor LARA 2 fue instalado cerca de los soportes en el extremo opuesto del vano. En la

Figura 6 se ilustra la ubicación de los sensores en la vista en planta del puente.

El transductor TR-0100 fue situado en el punto medio de la luz del vano para obtener las deflexiones durante la medición en campo.



PLANTA PRUEBA DE CARGA ESTÁTICA PROVISIONAL VANOS 1 Y 2

DEWE1	●	LARA1	■	LARA2	■	TR-0100	●
-------	---	-------	---	-------	---	---------	---

Figura 6. Ubicación de los sensores y camiones durante prueba de carga estática.

2.4 Prueba de carga estática

Según lo establecido en la normativa ADIF NAP 2-4-2.0 [8], en la fase de obra nueva se llevan a cabo dos tipos de ensayos de carga: uno con camiones y otro con vehículos ferroviarios. La prueba de carga estática corresponde al ensayo con camiones. La ejecución de la prueba de carga se llevará a cabo conforme a las directrices establecidas en el documento titulado "Recomendaciones para la realización de pruebas de carga de recepción en puentes de carretera" (Dirección General de Carreteras, Ministerio de Fomento, 1999) [9].

Las pruebas de carga estáticas fueron realizadas el 21 de marzo de 2024. Consistieron en la aplicación de cargas forzadas, simuladas mediante camiones de peso conocido, para observar la respuesta de la estructura.

Durante la prueba estática la hipótesis de carga considerada fue la colocación de 6 camiones sin movimiento en el vano 1 del puente. En la Figura 6 se indica la posición de los 6 camiones sobre el tablero del puente. La Figura 7 muestra las dimensiones y los pesos por eje correspondientes al camión empleado en las pruebas de carga.

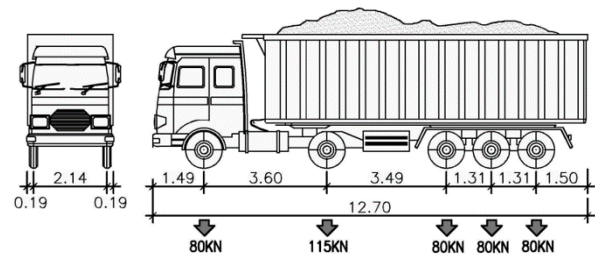


Figura 7. Croquis del camión utilizado para las pruebas.

3. Desarrollo de algoritmos en MATLAB

En este capítulo se describe el procedimiento para calcular las rotaciones estructurales usando datos de sensores y MATLAB como herramienta principal.

3.1 Cálculo de rotaciones

A partir del registro de aceleraciones para los tres ejes (a_x , a_y , a_z) se procesan estos datos para obtener la inclinación [4]. El ángulo de rotación alrededor del eje transversal "y" (α_y) se calcula mediante la relación trigonométrica definida en la ecuación (1).

$$\alpha_y = \arctan\left(\frac{a_x}{\sqrt{a_z^2 + a_y^2}}\right) \quad (1)$$

3.2 Aplicación del filtro Kalman

Estas inclinaciones son procesadas por medio del filtro de Kalman para obtener una estimación más precisa, para ello el filtro utiliza un modelo de estados, que considera tanto las mediciones registradas como el modelo del sistema.

- **Modelo del sistema:**

El modelo del sistema está definido en la ecuación 2.

$$x = [\theta; \dot{\theta}] \quad (2)$$

Donde θ es el ángulo de rotación y $\dot{\theta}$ es la velocidad angular. La evolución de estos estados se modela mediante la ecuación 3.

$$x_k = Ax_{k-1} + w \quad (3)$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & dt \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

En la ecuación 4, $dt = \frac{1}{F_s}$ es el paso temporal, y w es el ruido del proceso con varianza Q .

- **Modelo de predicción**

La relación entre la inclinación medida α_y y el estado del sistema está dada por la ecuación 5. Donde v es el ruido con varianza R . Siendo C definida por la ecuación 6.

$$\alpha_y = Cx + v \quad (5)$$

$$C = [1 \quad 0] \quad (6)$$

- **Predicción y corrección**

La predicción está determinada por las ecuaciones 7 y 8. Siendo P , la covarianza de error del estado estimado, que indica la incertidumbre en la estimación del sistema.

$$x_{pred} = Ax, P_{pred} = APA^T + Q \quad (7)$$

$$P_{pred} = APA^T + Q \quad (8)$$

Para el cálculo de la ganancia de Kalman, se emplea la ecuación 9.

$$K = P_{pred}C^T(CP_{pred}C^T + R)^{-1} \quad (9)$$

Y el cálculo de la actualización del estado y su covarianza está dado por las ecuaciones 10 y 11.

$$x = x_{pred} + K(\alpha_y - Cx_{pred}) \quad (10)$$

$$P = (I - KC)P_{pred} \quad (11)$$

Siendo I la matriz identidad.

Mayor detalle de las ecuaciones descritas anteriormente pueden encontrarse en Welch y Bishop [10].

- **Almacenamiento del ángulo estimado**

El valor estimado $x(1)$ que corresponde al primer valor de la matriz resultante, se almacena como θ_y que representa a la estimación de las inclinaciones aplicando el filtro de Kalman.

3.3 Cálculo de la rotación durante la prueba estática

La rotación que se genera durante la prueba estática se obtiene restando la rotación inicial.

$$\theta_{prueba\ est.} = \theta_{medida} - \theta_{inicial} \quad (12)$$

En la ecuación 12, la rotación inicial $\theta_{inicial}$ se refiere al registro de datos tomados antes de iniciar la prueba estática, es decir, antes de ubicar los camiones sobre el puente. Y la rotación medida θ_{medida} se refiere al promedio de los valores del ángulo estimado en el intervalo de tiempo correspondiente a la ejecución de la prueba estática.

4. Resultados

4.1 Giros en los apoyos medidos con LARA

Con los sensores ubicados cerca de cada soporte, específicamente los sensores LARA1 y LARA2, se midió el ángulo inducido del vano debido al peso de los camiones. Esto se logró comparando los ángulos medidos mientras los camiones estaban sobre el puente con los ángulos

registrados cuando el puente no estaba cargado. Los intervalos de tiempo de uso de datos fueron, para la situación de “Puente sin cargas”: 16:00:00 a 16:04:00 y para “Puente cargado”: 16:20:00 a 16:24:00.

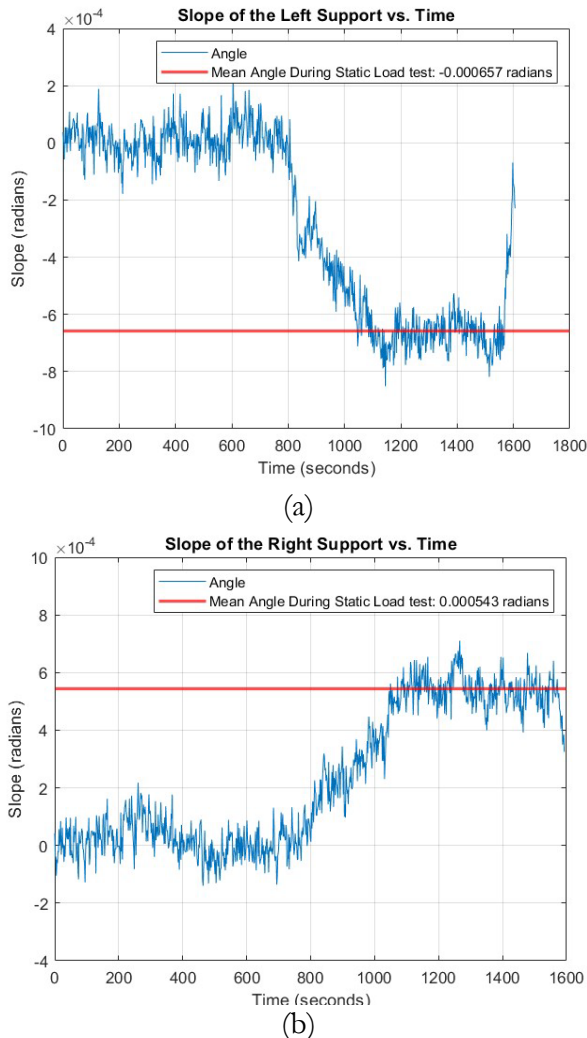


Figura 8.(a) Giro del apoyo izquierdo vs. tiempo calculado para LARA1. (b) Giro del apoyo derecho vs. tiempo calculado para LARA 2.

Los resultados obtenidos fueron los siguientes: un giro de **0,000657 radianes** medido por el sensor del soporte izquierdo (LARA 1). (Ver Figura 8.a.). Un giro de **-0,000543 radianes** medido por el sensor del soporte derecho (LARA 2). (Ver Figura 8.b.)

4.2 Evaluación de sensores LARA: comparación de giros en los apoyos.

Siguiendo el mismo proceso de cálculo de rotaciones que realiza LARA, la medición

obtenida por el sensor del soporte izquierdo DEWE 1 fue de un giro de **0,000602 radianes** (ver Figura 9). La comparación de las mediciones entre LARA1 y DEWE1, los cuales se encuentran en la misma ubicación, muestra una diferencia de 0.000055 rad equivalente a aproximadamente 0.003 grados. Esto demuestra la cercanía de los datos obtenidos por ambos sensores, destacando su alta precisión.

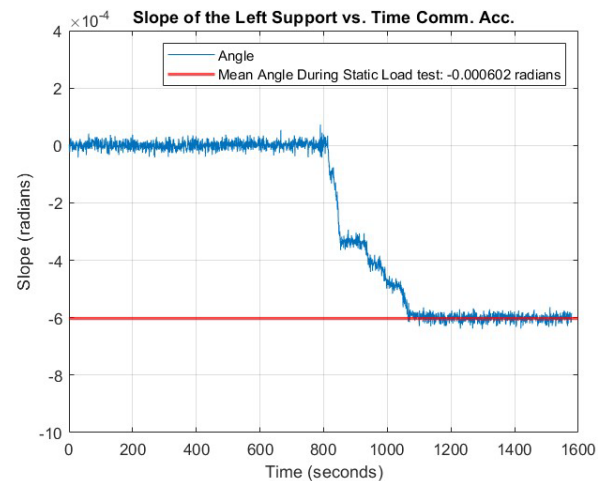


Figura 9. Giro del Apoyo Izquierda vs. Tiempo calculado por DEWE1.

4.3 Modelo analítico para evaluación de deformaciones verticales

En este capítulo se detalla el uso de un modelo de elementos finitos del puente en estudio, desarrollado en SAP2000 mediante el método de emparillado plano, como una herramienta para estimar las deformaciones verticales teóricas del puente.

4.3.1 Construcción del modelo inicial

Para la construcción del modelo se consideraron los siguientes puntos.

Geometría del puente: se definió la geometría del puente en función de sus dimensiones reales. Las vigas longitudinales se modelaron como elementos de barra que representan los componentes estructurales que soportan las cargas principales. Las vigas transversales y la losa superior se consideraron para distribuir las cargas y garantizar un comportamiento estructural realista [11].

Propiedades de los materiales: las propiedades mecánicas de los materiales, como el módulo de elasticidad y el peso específico del hormigón, fueron incorporadas en el modelo para reflejar las condiciones reales del puente. Las propiedades se tomaron de acuerdo con las especificaciones del diseño y están indicadas en la Tabla 2.

Tabla 2. Propiedades de los materiales.

Elemento	Materiales	Peso específico (kN/m ³)	Módulo de elasticidad (MPa)
Vigas	HP-55	25	33822
Losas	HA-35	25	29779

Condiciones de apoyo: en el modelado estructural de puentes, las condiciones de apoyo son clave para simular el comportamiento real del sistema [12]. Las vigas del puente descansan en aparatos tipo POT fijo y unidireccional (FX3780-640 y GG3780-200.90, respectivamente), definidos con restricciones traslacionales en el modelo. En el apoyo POT fijo, los desplazamientos en las tres direcciones están completamente restringidos. En el apoyo POT unidireccional, el desplazamiento longitudinal es libre, mientras que en las otras dos direcciones están totalmente restringidos.

Cargas aplicadas: se consideró la carga muerta correspondiente al peso propio de la estructura, incluida automáticamente en el modelo al introducir la geometría y material correspondiente a cada elemento, y las cargas estáticas generadas por los camiones durante la prueba.

4.3.2 Deformaciones verticales teóricas a partir de modelo inicial vs deformaciones máximas medidas

Como resultado de las mediciones de la prueba de carga estática en el vano 1 del puente, realizadas en campo por la empresa INDAICO, se registró una flecha máxima de 4,86 mm.

A partir del modelo analítico se obtuvieron las flechas teóricas a mitad del vano 1 del puente para la prueba estática (ver Figura 10). Se obtuvo como máxima deformación un

valor de 6,68 mm en la mitad del vano del puente.

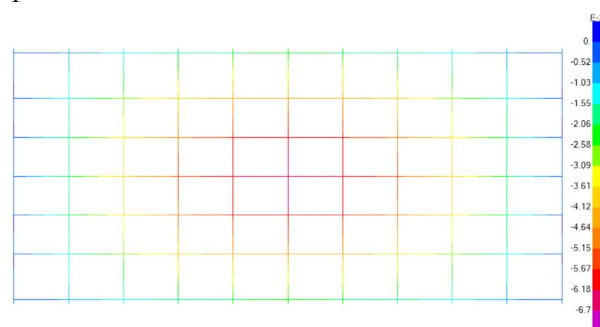


Figura 10. Deformación vertical teórica del puente para la prueba estática. Unidades: milímetros.

Tabla 3. Comparación de flechas teóricas vs flechas máximas medidas

$f_{teórica}$ (mm)	$f_{max.medida}$ (mm)	$f_{max.medida}/f_{teórica}$ (mm)
-6,68	-4,86	72,75%

De los resultados expuestos en la Tabla 3, se observa que existe una similitud del 72.75% de lo medido en campo. Según los criterios de validación de la prueba de carga estática, el porcentaje de flechas máximas obtenidas respecto de las previstas en el proyecto debe ser menor de 110%, dando por válida la prueba [13].

4.4 Validación del método alternativo para obtención de deformaciones verticales durante prueba estática

La medición de los giros de los apoyos se presenta como una alternativa más eficiente a la medición de la deflexión en la mitad del vano durante las pruebas de carga estática, ya que permite calcular la deformación de manera indirecta, sin necesidad de instalar un equipo de medición directa como un transductor de desplazamiento.

Al calibrar el modelo, considerando los giros medidos en campo, se puede obtener una estimación de la deformación vertical semejante a la medida en campo, tal y como se demuestra en los siguientes capítulos.

4.4.1 Calibración del modelo

Basándose en estudios que analizan la rigidez rotacional de los apoyos en puentes de carretera

[14], el proceso de calibración consistió en ajustar los apoyos en SAP2000 mediante resortes rotacionales para modelar la rigidez a rotación en el plano transversal del puente. Partiendo del cálculo de la rigidez rotacional según el “Código australiano”[15], estos valores fueron calibrados hasta reproducir los giros medidos por los sensores LARA durante la prueba de carga estática. Como resultado, se obtuvo una rigidez rotacional estimada de $R_y = 6,25e05 \text{ kN}\cdot\text{m/rad}$, garantizando que las rotaciones simuladas coincidieran con las mediciones experimentales.

4.4.2. Deformaciones verticales del modelo calibrado vs deformaciones máximas medidas

En la Figura 11 se muestra la deformación vertical obtenida tras la calibración del modelo analítico, con una flecha máxima de 5,11 mm.

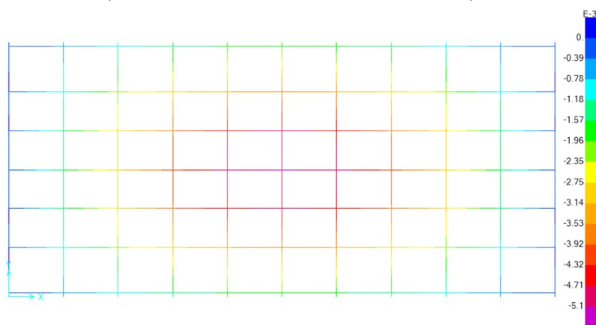


Figura 11. Deformación vertical del modelo calibrado del puente para la prueba estática.
Unidades: milímetros.

Tabla 4. Comparación de flecha del modelo calibrado vs flecha máxima medida

$f_{\text{modelo calibrado}}$ (mm)	$f_{\text{max.medida}}$ (mm)	$f_{\text{max.medida}}/f_{\text{modelo calibrado}}$ (mm)
-5,11	-4,86	95,11%

La comparación entre la deflexión del modelo calibrado (5,11 mm) y la flecha máxima medida en la prueba (-4,86 mm) muestra una similitud del 95,11%, lo que valida la precisión del método basado en el registro de rotaciones para estimar deflexiones en la mitad del vano.

Este método alternativo, basado en la medición de giros en los apoyos, permite estimar deformaciones verticales sin necesidad de una medición directa en el centro del vano, lo que

podría eliminar el uso de transductores de desplazamiento en esa ubicación.

En este sentido, el valor de flecha obtenido del modelo calibrado no solo representa con alta precisión la realidad estructural del puente, sino que también puede adoptarse como referencia para la validación de la prueba estática. Este enfoque optimiza el proceso de medición, reduciendo la necesidad de instrumentación adicional y simplificando la evaluación estructural.

5. Conclusiones

Este estudio ha demostrado la viabilidad y efectividad de los sensores de bajo costo LARA para medir giros y estimar deformaciones en pruebas estáticas de puentes. Comparando sus resultados con los obtenidos por un acelerómetro comercial y un transductor de desplazamiento (instrumentado por INDAICO) en la prueba solicitada por COMSA, se ha validado su capacidad para registrar de manera fiable las rotaciones en la estructura, permitiendo calcular las deformaciones verticales de forma indirecta pero precisa.

El uso de rotaciones para estimar deflexiones presenta ventajas significativas sobre los métodos tradicionales, entre ellas: (1) Facilidad de implementación: Los sensores LARA pueden instalarse fácilmente en puntos estratégicos sin modificar la estructura, reduciendo tiempos de instalación y afectaciones operativas. (2) Monitoreo continuo: LARA ofrece monitoreo en tiempo real, permitiendo evaluar la evolución de las deformaciones durante la prueba estática. (3) Mejor correlación con modelos estructurales: La medición de rotaciones en puntos clave mejora el ajuste con los modelos existentes, permitiendo un análisis más detallado del comportamiento estructural.

En conclusión, los sensores LARA representan una alternativa eficiente, económica y menos invasiva para la medición de inclinaciones en pruebas de carga estática,

proporcionando datos fiables para el monitoreo de la salud estructural de los puentes.

Referencias

- [1] J. Shieh, J.E. Huber, N.A. Fleck, M.F. Ashby, The selection of sensors, *Prog Mater Sci* 46 (2001) 461–504. [https://doi.org/10.1016/S0079-6425\(00\)00011-6](https://doi.org/10.1016/S0079-6425(00)00011-6).
- [2] B. Kovačič, R. Kamnik, A. Štrukelj, N. Vatin, Processing of signals produced by strain gauges in testing measurements of the bridges, *Procedia Eng* 117 (2015) 795–801. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.249>.
- [3] H.S. Moon, P.J. Chun, M.K. Kim, Y.M. Lim, Artificial neural network for vertical displacement prediction of a bridge from strains (part 2): Optimization of strain-measurement points by a genetic algorithm under dynamic loading, *Applied Sciences (Switzerland)* 10 (2020). <https://doi.org/10.3390/app10030777>.
- [4] S. Komarizadehasl, M. Komary, A. Alahmad, J.A. Lozano-Galant, G. Ramos, J. Turmo, A Novel Wireless Low-Cost Inclinometer Made from Combining the Measurements of Multiple MEMS Gyroscopes and Accelerometers, *Sensors* 22 (2022) 5605. <https://doi.org/10.3390/S22155605>.
- [5] S. Komarizadehasl, F. Lozano, J.A. Lozano-Galant, G. Ramos, J. Turmo, Low-Cost Wireless Structural Health Monitoring of Bridges, *Sensors* 22 (2022). <https://doi.org/10.3390/s22155725>.
- [6] DEWESoft, IOLITEi 3xMEMS-ACC, (n.d.). www.dewesoft.com (accessed March 3, 2025).
- [7] Mapro Ingeniería S.A., Series TR-TRS, (n.d.). <https://maprosensor.com/es/producto/potenciometros-lineales-resistivos/series-tr-trs.html> (accessed March 3, 2025).
- [8] NAP 2-4-2.0 Pruebas de carga ferroviarias en puentes de ferrocarril, Madrid, 2021.
- [9] Instrucciones de construcción: Recomendaciones para la realización de pruebas de carga de recepción en puentes de carretera, Madrid, 1999.
- [10] G. Welch, G. Bishop, An Introduction to the Kalman Filter, 2006. <http://www.cs.unc.edu/~gb>.
- [11] R. West, Recommendations on the use of grillage analysis for slab and pseudo-slab bridge decks, First, Cement and Concrete Association, London, 1973.
- [12] J. Zhan, F. Zhang, M. Siahkouhi, X. Kong, H. Xia, A damage identification method for connections of adjacent box-beam bridges using vehicle–bridge interaction analysis and model updating, *Eng Struct* 228 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111551>.
- [13] Orden TMA/698/2023, de 27 de junio, por la que se aprueba la instrucción sobre los registros de la actividad de vigilancia de infraestructuras ferroviarias, REVINFE-23, Madrid, 2023. <https://www.boe.es/eli/es/o/2023/06/27/tma698> (accessed March 6, 2025).
- [14] K. Feng, M. Casero, A. González, Characterization of the road profile and the rotational stiffness of supports in a bridge based on axle accelerations of a crossing vehicle, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* 38 (2023) 1935–1954. <https://doi.org/10.1111/mice.12974>.
- [15] Standards Australia Committee, Bridge design, Part 4: Bearings and deck joints, 2017. www.standards.org.au.