

APLICACIÓN DEL MONITOREO ESTRUCTURAL PARA ESTIMAR Y PREDECIR LA RESPUESTA Y EL ESTADO DE DAÑO DE ESTRUCTURAS SOMETIDAS A TERREMOTOS

*Application of structural monitoring to estimate and
predict the response and state of damage of structures
subjected to earthquakes*

KALIL ERAZO, PhD, PE¹

Recibido: 11/08/2025 • Aceptado: 11/12/2025

Cómo citar: Erazo, K. (2025). Aplicación del monitoreo estructural para estimar y predecir la respuesta y el estado de daño de estructuras sometidas a terremotos. *Ciencia, Ingenierías y Aplicaciones*, 8, 153-170. <https://doi.org/10.22206/cite.2025.v8.3631>

Resumen

Este artículo explora el desarrollo y la aplicación del monitoreo estructural (o monitoreo de la salud estructural) en la evaluación de la vulnerabilidad estructural de infraestructuras civiles. El monitoreo estructural consiste en la extracción de información del estado de integridad estructural en base a mediciones de la respuesta estructural obtenidas mediante sensores e instrumentación. Las mediciones son procesadas por algoritmos estadísticos para inferir el estado de daños bajo la premisa de que los cambios físicos en la estructura son detectables en los datos medidos. La metodología contribuye a minimizar errores en el análisis debido a simplificaciones en el modelado estructural y en la efectividad del proceso de evaluación debido a la posibilidad de ser automatizado. Se discuten dos estudios de caso, el primero consiste en el uso de mediciones de la respuesta estructural en la predicción de daños de un puente mediante curvas de fragilidad utilizando gemelos digitales (digital twins), y el segundo la aplicación de filtros bayesianos para estimar la respuesta y daños en una estructura de muro de corte sometida a movimientos de la base en una mesa vibratoria.

Palabras clave: Monitoreo estructural; acelerómetros; curvas de fragilidad; filtros bayesianos; daño estructural.

¹ Profesor investigador, Instituto Tecnológico de Santo Domingo (INTEC); Avenida de los Próceres 49, Santo Domingo, República Dominicana. Assistant Teaching Professor, Rice University; 6100 Main St, Houston TX 77005. ORCID: 0000-0002-5890-7073. Correo-e: Kalil.Erazo@intec.edu.do



Abstract

This article examines the development and application of structural monitoring (structural health monitoring) in assessing the structural vulnerability of civil infrastructure subjected to base motions induced by earthquakes. Structural monitoring consists of extracting information about the state of structural integrity from Vibration measurements obtained using sensing technologies. The measurements are processed by statistical algorithms to determine the state of damage. The methodology helps minimize errors in the analysis due to modeling simplifications and improves the efficiency of the evaluation by automating the process. Two case studies examine the use of response measurements to predict bridge damage using fragility curves, as well as the application in a shear wall structure to estimate the state of damage when the structure is subjected to base motions in a shaking table using Bayesian filters.

Keywords: Structural monitoring; accelerometers; fragility curves; Bayesian filters; structural damage.

1. Introducción

Los desastres naturales son el resultado de eventos naturales extremos que ocurren en regiones de alta vulnerabilidad, causando pérdidas humanas y económicas importantes. Ejemplos de desastres naturales abundan en la historia de la humanidad (Withington, 2013). La alta vulnerabilidad en zonas de alto riesgo se debe a varios factores, algunos de los cuales incluyen la falta de medidas de preparación y prevención, falta de actualización y seguimiento de códigos y normas de diseño y construcción, el crecimiento desproporcionado del ambiente construido sin un plan de urbanización adecuado, la lentitud en la toma de decisiones en infraestructuras de alta prioridad que ameritan ser intervenidas, entre otros factores geográficos, socioeconómicos y demográficos (Withington, 2013). Cabe resaltar que la reducción de la vulnerabilidad y el mejoramiento de la resiliencia de las infraestructuras civiles son un problema complejo y multidisciplinario, con distintos campos de la ciencia interactuando para resolver aspectos particulares del problema. Uno de estos aspectos consiste en identificar las infraestructuras que se encuentran en un estado crítico y, por lo tanto, requieren reparación e intervención inmediata, y la evaluación de daños luego de eventos extremos de manera rápida y eficiente. La importancia del diagnóstico, la predicción y mitigación de daños radica

en que los fondos económicos y el personal de emergencia disponibles son extremadamente limitados, y por lo tanto es necesario identificar cómo dirigir los esfuerzos en la toma de decisiones relacionadas con las tareas de reparación y rescate antes, durante, y después de eventos extremos.

Luego del devastador terremoto de San Fernando de 1971 en los Estados Unidos, investigadores notaron la necesidad de recolectar información de la respuesta de las infraestructuras y del suelo que las rodea de manera directa y cuantificable. Con este fin se establece el programa *California Strong Motion Instrumentation Program* (CSMIP) en 1972 en el estado de California. Este programa se encarga de recopilar información y mediciones de la respuesta estructural antes, durante y después de terremotos. Luego de un evento de gran magnitud, los registros de mediciones obtenidas son procesados y diseminados a ingenieros e investigadores, los cuales pueden obtenerlos desde cualquier parte del mundo y usarlos para estimar los daños (Huang & Shakal, 2002; Naeim, 2013).

El proceso de utilizar mediciones de la respuesta estructural para determinar el nivel de daños en una infraestructura civil se conoce como el *monitoreo estructural* o *monitoreo de la salud estructural* (Structural Health Monitoring o SHM por sus siglas en inglés). Los dos componentes fundamentales del monitoreo estructural son:

1. El desarrollo de instrumentos para capturar información en la forma de señales de la respuesta o vibración de la estructura. Debido a los avances tecnológicos en las últimas décadas, la obtención de mediciones de la respuesta estructural se puede realizar de manera confiable con sensores de última generación (Lynch & Loh, 2006).
2. El desarrollo de algoritmos computacionales que procesen la medición de la respuesta estructural y la transformen en información utilizable mediante indicadores de daños que puedan ser usados en la toma de decisiones y en la priorización del uso de recursos luego de eventos naturales extremos (Todorovska & Trifunac, 2007; Farrar et al., 2001; Bernal & Hernandez, 2006; Erazo & Hernandez, 2016a; Erazo & Hernandez, 2016b).

En las tres últimas décadas se han realizado grandes avances en el área del monitoreo estructural y en la instrumentación de infraestructuras civiles en regiones de alta vulnerabilidad sísmica. La Tabla 1 muestra los principales puentes instrumentados en los Estados Unidos. Esta instrumentación consiste principalmente en el uso de acelerógrafos y acelerómetros,

sensores de deformación y desplazamiento, sensores de corrosión y, en algunos casos, sistemas de posicionamiento global (GPS).

Los principales edificios instrumentados en los Estados Unidos se encuentran listados en la Tabla 2. Regularmente esta instrumentación consiste en acelerómetros colocados en el primer nivel, el techo y algunos niveles intermedios (Huang & Shakal, 2002). La mayoría de las infraestructuras civiles instrumentadas en los Estados Unidos forman

Tabla 1
Principales puentes instrumentados en los Estados Unidos

Nombre	Año Inaugurado	Ubicación	Tipo
Golden Gate Bridge	1937	San Francisco, CA	Colgante
Vincent Thomas Bridge	1964	Los Angeles, CA	Colgante
Commodore Barry Bridge	1974	Pennsylvania/New Jersey	Armadura
Sunshine Skyway Bridge	1987	Terra Ceia, FL	Atirantado
Fred Hartman Bridge	1995	La Porte, Tx	Atirantado
Bill Emerson Memorial Bridge	2003	Missouri/Illinois	Atirantado
Alfred Zampa Memorial Bridge	2003	Vallejo, CA	Colgante
Saint Anthony Falls I-35W Bridge	2008	Minneapolis, MN	Viga postensada

parte de la *National Center for Engineering Strong Motion Data* (CES-MD) y las mediciones de respuesta están disponibles al público mediante una página web. Esto permite a investigadores y profesionales realizar un diagnóstico de las infraestructuras incluidas con el fin de disminuir las pérdidas humanas y económicas luego de eventos naturales extremos.

En la actualidad, el principal método para diagnosticar y evaluar el estado de infraestructuras civiles es mediante inspecciones visuales realizadas por expertos. A pesar de los mejores esfuerzos de los inspectores, el diagnóstico de infraestructuras utilizando la inspección visual tiene varias limitantes debido a los complejos mecanismos que generan fallas

Tabla 2*Principales edificios instrumentados en los Estados Unidos*

Nombre	Ubicación	Niveles	Sensores*
One Rincon Hill Tower	San Francisco, CA	62	72
Transamerica Tower	San Francisco, CA	60	21
Office Building (CSMIP 24629)	Los Angeles, CA	54	20
Office Building (CSMIP 24602)	Los Angeles, CA	52	20
Century City, 2029 CPE	Los Angeles, CA	44	42
One Bell Center	St Louis, MO	43	24
Chevron Building	San Francisco, CA	40	24
Crowne Plaza Hotel	Seattle, WA	34	15
Los Angeles City Hall	Los Angeles, CA	32	27
Pacific Park Plaza	Emeryville, CA	30	30
Federal Deposit Insurance Corporation	San Francisco, CA	22	30
Hilton Hotel	Anchorage, AK	20	15
Robert B Atwood Bldg	Anchorage, AK	20	53
New Federal building	San Francisco, CA	18	36
Frontier Building	Anchorage, AK	14	36
Caltech Millikan Library	Pasadena, CA	9	36

*Acelerógrafos uni/bi-direccionales.

estructurales catastróficas, los cuales no se pueden apreciar a la vista. En particular, se han registrado casos de estructuras que han colapsado a pesar de haber pasado por rigurosas inspecciones, como es el caso del puente en la autopista I-35 en Minneapolis, mostrado en la Figura 1, el cual a pesar de ser inspeccionado en un intervalo de tiempo mas frecuente que el sugerido para puentes de este tipo y en su estado antes de colapsar de manera súbita (National Transportation Safety Board, 2008).

El monitoreo estructural ha sido identificado como una de las principales tecnologías que podrán ser utilizadas en el futuro para diagnosticar infraestructuras civiles antes y después de desastres naturales de manera rápida y efectiva. Sin embargo, para la aplicación de esta tecnología en infraestructuras civiles complejas, varios aspectos requieren investigación

Figura 1

Colapso súbito del puente I-35 en Minneapolis, Estados Unidos (Wills, 2007)

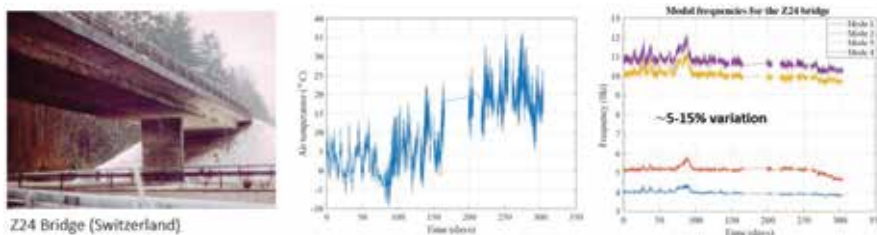


(Nagarajaiah & Erazo, 2016). Las tendencias actuales en materia de investigación en el monitoreo estructural se encuentran enfocadas en resolver las siguientes problemáticas:

- i) *Efecto de cambios ambientales en la efectividad del monitoreo estructural*: Se ha demostrado que la efectividad del monitoreo estructural es afectada por cambios ambientales, debido a la sensibilidad de los indicadores de daños a los mismos (Peeters & De Roeck, 2001). La Figura 2 muestra la variación de las primeras cuatro frecuencias de vibración de un puente debido a cambios de temperatura durante un año. Como se observa, las frecuencias varían entre 5 y 15 % y, presumiblemente, el puente se encuentra en un estado aceptable (sin daños). Si se utilizan las frecuencias de vibración como indicador de daños, esto presenta una problemática, debido a que se debe poder diferenciar entre cambios debidos a daños y cambios debidos a variaciones ambientales. Recientemente se han desarrollado métodos que tienen la habilidad de desacoplar ambas fuentes para poder determinar si un cambio de propiedades dinámicas realmente está relacionado con daños (Yan et al., 2005; Erazo et al., 2019).
- ii) *Desarrollo de algoritmos robustos a errores debidos al modelamiento de la estructura*: En particular, un conjunto importante de métodos

Figura 2

Variación de las frecuencias de vibración de un puente en Suiza durante un año debido a cambios ambientales (variaciones de entre 5 y 15 %)



utiliza modelos estructurales computacionales para evaluar y estimar daños estructurales. Estos modelos analíticos son una aproximación del sistema y, por lo tanto, los algoritmos deben ser robustos a errores debidos al modelamiento.

- iii) *Aplicación utilizando experimentos de gran escala:* Los resultados de la aplicación de métodos de estimación de daños en infraestructuras a escala real son limitados debido a la falta de experimentos de gran escala. Recientemente, mediante el financiamiento de este tipo de experimentos se han generado resultados que podrán ser utilizados para validar la eficacia del monitoreo estructural en infraestructuras civiles.

2. Monitoreo Estructural

La obtención de señales o mediciones que describen de manera directa la respuesta de infraestructuras civiles es el primer paso para la aplicación del monitoreo estructural. Estas mediciones presumiblemente contienen información sobre el estado de daño y pueden estar relacionadas con indicadores utilizados para realizar el diagnóstico estructural. Es decir, se opera bajo la asunción de que el daño estructural impacta de manera significativa la respuesta estructural y que, por lo tanto, las mediciones de la respuesta contienen información sobre el estado estructural. Esta información debe ser extraída de los datos medidos.

La Figura 3 muestra instrumentos de medición de la respuesta estructural instalados en una estructura ensayada en la Universidad de California San Diego. Los instrumentos utilizados en este caso son tradicionales

por cableado, pero existen instrumentos similares que operan de manera inalámbrica (Panagiotou et al., 2007). El sistema inalámbrico de monitoreo estructural tiene la ventaja de que puede ser utilizado en múltiples estructuras debido a su fácil instalación-desinstalación. Este no es el caso en los sistemas alámbricos existentes, los cuales generalmente deben permanecer de manera fija en la estructura. En el caso de sistemas inalámbricos, los nodos o sensores envían las mediciones a un coordinador mediante un protocolo inalámbrico similar al utilizado en las redes “Wi-Fi”. El coordinador transmite las señales obtenidas a un computador para el análisis y procesamiento de las mismas, generando los indicadores de daños. El sistema inalámbrico no requiere el cableado que necesitan los sistemas actuales, lo cual resulta en un sistema de monitoreo con significativos ahorros económicos. Una de las ventajas más importantes de este sistema es que, como se mencionó anteriormente, gracias a la facilidad de su instalación y desinstalación, el sistema puede ser reutilizado para tomar mediciones en distintas estructuras. Esto es importante ya que el sistema puede ser almacenado en un laboratorio bajo condiciones óptimas, lo cual extiende su vida útil y su capacidad de producir un mayor impacto.

Figura 3

Sensores instalados en una estructura de muro de cortante

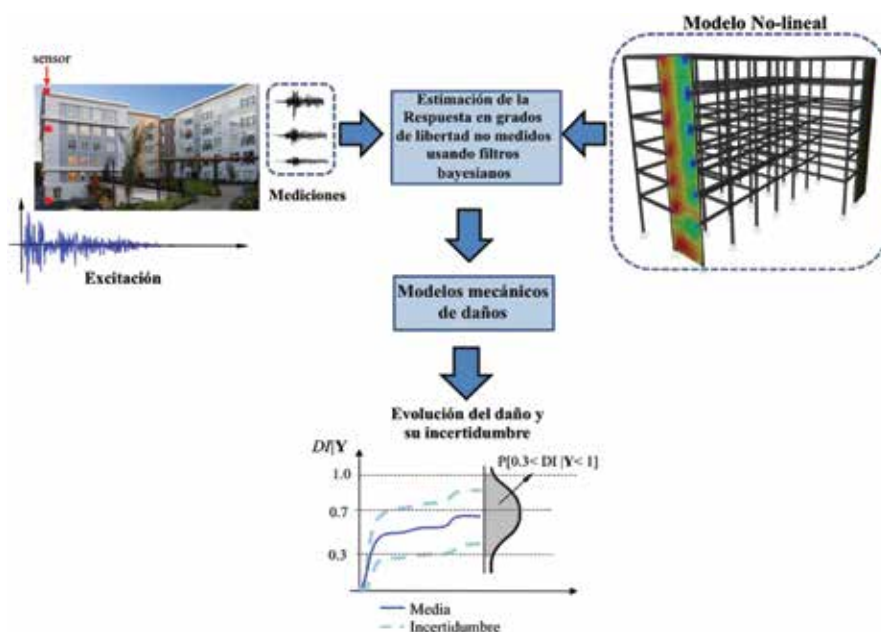


Como se mencionó anteriormente, la obtención de mediciones es solo el primer paso para la implementación del monitoreo estructural. Las mediciones deben ser procesadas con el fin de extraer información relacionada con daños. En general, existen dos metodologías para realizar esta

tarea: métodos que operan de manera directa en las mediciones o transformaciones de las mediciones como frecuencias de vibración y formas modales (Farrar et al., 2001), y métodos que combinan las mediciones con un modelo computacional de la estructura (Erazo & Hernandez 2016a; Erazo & Hernandez 2016b; Erazo & Hernandez 2016c). Este artículo se enfoca en el segundo grupo de métodos. En particular, se exploran métodos que integran las mediciones con un modelo computacional de elementos finitos usando estimación bayesiana. El proceso se ilustra en la Figura 4.

Figura 4

Marco de trabajo para el diagnóstico de infraestructuras basado en filtros bayesianos (Erazo & Hernandez, 2016b)



En este marco de trabajo se utilizan mediciones en localidades limitadas junto con un modelo computacional para estimar la respuesta en toda la estructura (localidades no medidas) utilizando un filtro bayesiano (Erazo & Hernandez, 2016b). Los filtros bayesianos estiman de forma recursiva la variable de estado del sistema usando métodos probabilísticos, resultando en una función de densidad de probabilidad condicional en las mediciones obtenidas por el sistema de monitoreo estructural. En

este contexto la incertidumbre de la variable de estado se incorpora en el análisis, y la información de las mediciones es incorporada mediante el teorema de Bayes

$$p(\mathbf{x}_i | \mathbf{Y}_i, \Phi) = \frac{p(\mathbf{x}_i | \mathbf{Y}_{i-1}, \Phi) p(y_i | \mathbf{x}_i, \Phi)}{p(y_i | \mathbf{Y}_{i-1}, \Phi)} \quad (1)$$

donde $\mathbf{x}$ es la variable de estado y la matriz $\mathbf{Y}$ contiene las mediciones obtenidas mediante sensores. Las respuestas estimadas por los filtros bayesianos se utilizan como entrada para calcular indicadores de daños basados en principios mecánicos, lo cual resulta en un indicador de la forma (Erazo & Hernandez, 2016b)

$$DI = g(x(t) | \mathbf{Y}_n; \alpha) \quad (2)$$

donde g es una función de daños. En adición a los indicadores existentes se estudiarán y desarrollarán nuevos indicadores robustos a cambios ambientales. Se ha demostrado que las variaciones normales en el medio ambiente condicionan de manera adversa la efectividad de los métodos de diagnóstico estructural existentes (Peeters & De Roeck, 2001). Por esta razón es necesario desarrollar métodos con reducida sensibilidad a los cambios ambientales (principalmente cambios de temperatura), que registren únicamente variaciones en las propiedades intrínsecas de la estructura de manera robusta.

para estimar las propiedades de modelos de estructuras es la inferencia bayesiana (Erazo & Hernandez, 2016b). Este método tiene la ventaja de que aplica de manera directa en casos donde un modelo no-lineal es preferido para estimar la respuesta del sistema. En el método bayesiano el vector de parámetros Φ (el cual puede incluir propiedades modales o parámetros de modelos no-lineales) es estimado usando el teorema de Bayes

$$p(\Phi | \mathbf{Y}_T) = \frac{p(\mathbf{Y}_T | \Phi) p(\Phi)}{p(\mathbf{Y}_T)} \quad (3)$$

donde $p(\Phi | \mathbf{Y}_T)$ es la función de densidad de probabilidad calculada en base a la matriz de mediciones $\mathbf{Y}_T$ (mediciones obtenidas mediante sensores). Las funciones $p(\Phi)$ y $p(\mathbf{Y}_T | \Phi)$ son, respectivamente, la distribución

a priori y la función de verosimilitud. El escalar $p(\mathbf{Y}_T)$ es una constante de normalización. La incertidumbre en los parámetros se puede calcular directamente utilizando intervalos de confianza, los cuales están dados por

$$P(\Phi_i \in CI_i | \mathbf{Y}_T) = \int_{\phi_i^a}^{\phi_i^b} p(\Phi_i | \mathbf{Y}_T) d\Phi_i \quad (4)$$

donde el intervalo que contiene el 95% de probabilidad del parámetro es usualmente utilizado en la práctica.

3. Caso de Estudio: Puente de vigas presforzadas de hormigón armado

El primer caso de estudio consiste en un puente de vigas presforzadas mostrado en la Figura 5. El puente se encuentra en una zona de alta amenaza sísmica debido a su cercanía a la Falla Septentrional en la región norte de la República Dominicana; en particular el puente se encuentra en la Comunidad El Cacique a 8km de la falla, una zona de alto peligro sísmico (Erazo, 2023).

Figura 5

Foto de puente El Cacique (Moca, República Dominicana)

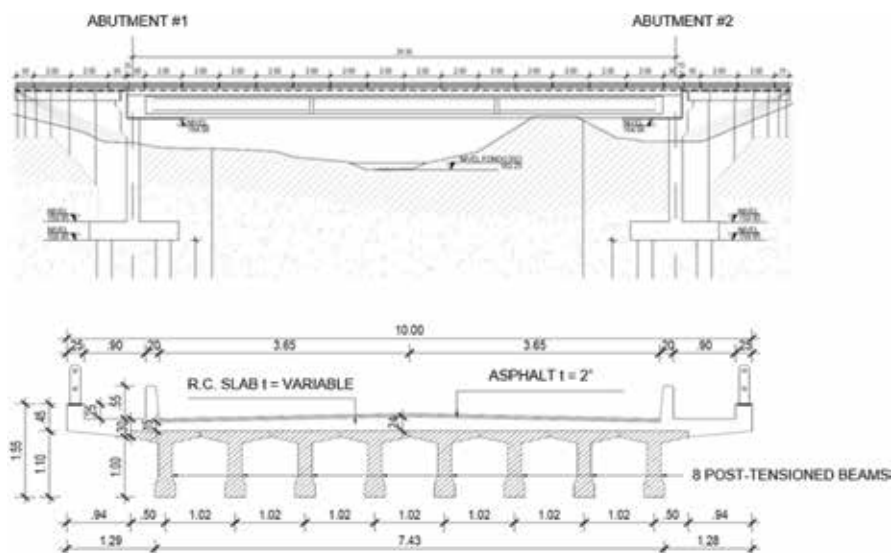


El puente consiste en 8 vigas tipo AASHTO-IV con una luz de 30m. Los estribos del puente se encuentran cimentados en una fundación

profunda que consiste de 8 pilotes de 0.80m de diámetro y 18m de longitud vaciados in-situ. La Figura 6 muestra el esquema del puente.

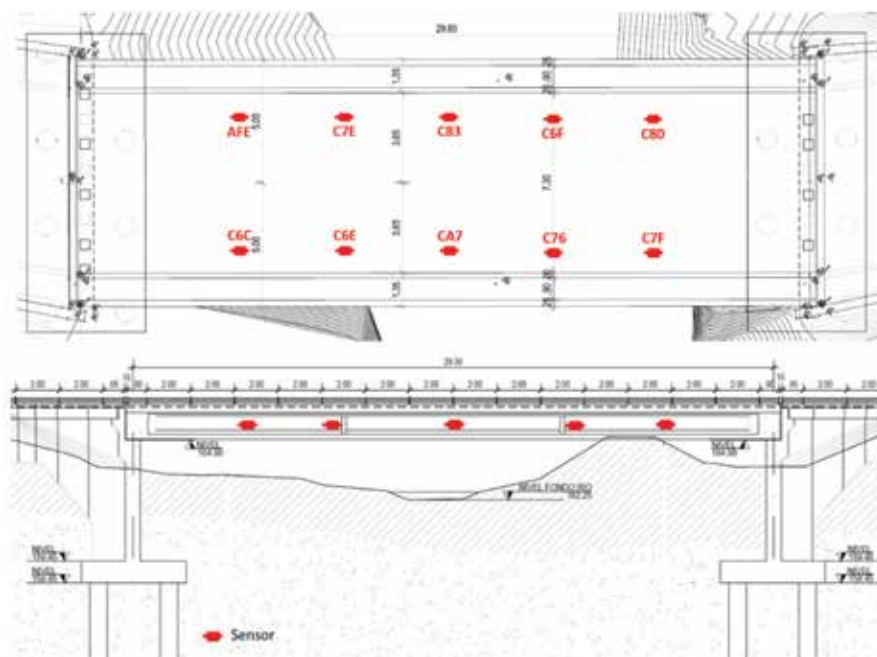
Figura 6

Esquema estructural del puente El Cacique



Debido al alto peligro sísmico en la zona y la importancia del puente para la población, ya que proporciona el único medio de comunicación terrestre en un radio de más de 30km, se decidió realizar un estudio profundo de la vulnerabilidad del puente mediante un estudio de monitoreo estructural. Con este fin se instaló una red de acelerómetros inalámbricos de la marca BeanAir y se tomaron mediciones en un periodo de 24 horas. Los sensores y el esquema de instrumentación se muestran en la Figura 7. La Figura 8 muestra el esquema de instrumentación de la estructura.

Las vibraciones ambientales del Puente fueron utilizadas para estimar las propiedades modales (frecuencias, formas modales, y amortiguamiento), y las propiedades estimadas se usaron para calibrar un modelo computacional de elementos finitos del Puente utilizando métodos de identificación de subespacios (Stochastic Subspace Identification – SSID por sus siglas en inglés). El modelo calibrado se utilizó para desarrollar curvas de fragilidad del Puente, y se demostró que las curvas presentan

Figura 7*Sensor inalámbrico triaxial y esquema de instrumentación estructural***Figura 8***Esquema de instrumentación estructural*

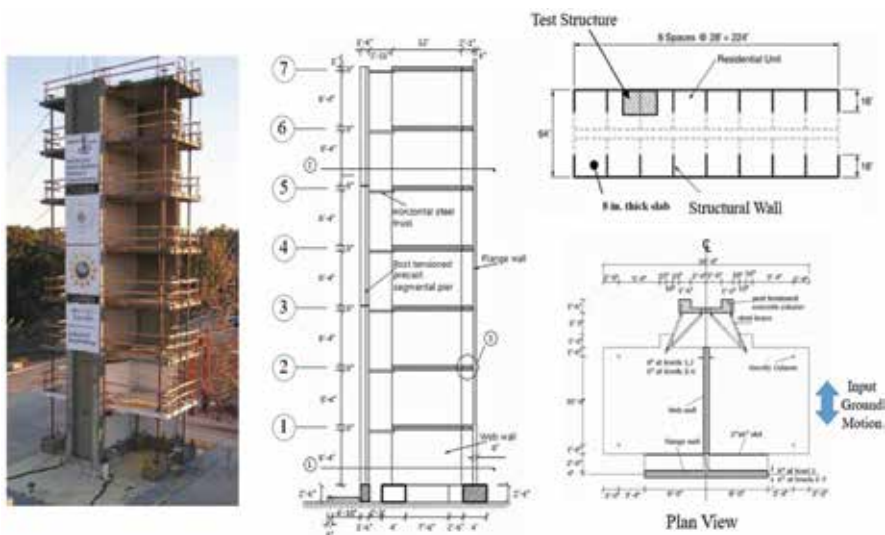
alta sensibilidad a los parámetros del modelo (original versus calibrado) (Rojas-Mercedes et al., 2022). En Erazo (2023) se demuestra la importancia de aplicar el monitoreo estructural en la evaluación de estructuras existentes y la importancia de calibrar los modelos estructurales con base en las mediciones.

4. Caso de estudio: Muro de corte de hormigón armado

La estructura consiste en un muro de corte de concreto armado de siete niveles y una altura de 20m construido a una escala 1:1 (ver Figura 9) y ensayado en la Universidad de California San Diego. La estructura fue diseñada por desempeño utilizando un diseño basado en desplazamientos e instrumentada con una densa colección de sensores colocados en todos los niveles (Panagiotou et al., 2007). Durante el programa de pruebas, la estructura fue sometida a un conjunto de terremotos históricos utilizando una mesa vibratoria, lo que ocasionó daños en la misma. Las mediciones de la respuesta fueron tomadas antes, durante y después de cada prueba.

Figura 9

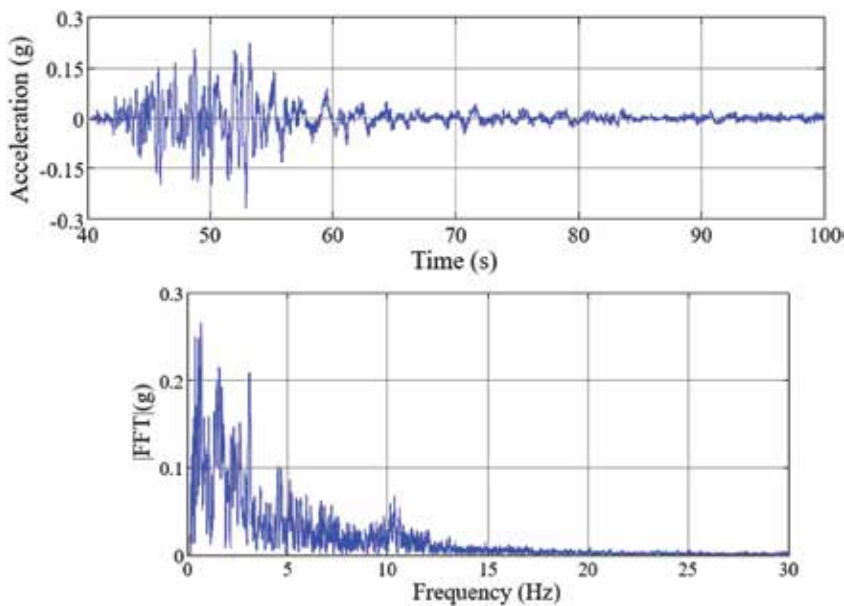
Estructura de muro de corte de concreto reforzado ensayado en la Universidad de California San Diego (Panagiotou et al., 2007)



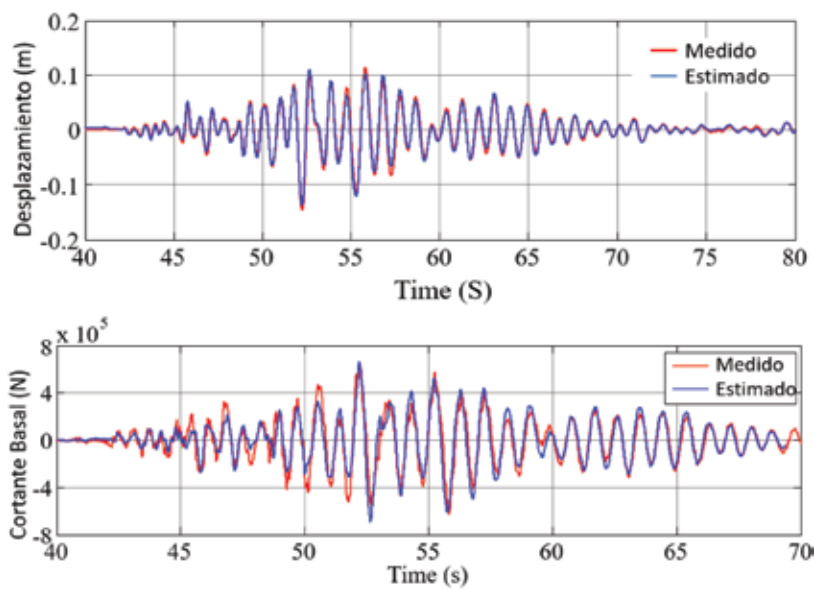
La estructura fue sometida a registros de terremotos históricos y la respuesta estructural (aceleración y desplazamiento) fue medida en los distintos niveles. La Figura 10 muestra el registro de aceleración de la base de uno de los ensayos, correspondiente a un registro del terremoto de Northridge de 1994. La figura muestra la transformada de Fourier del registro mostrando el contenido energético en el dominio de la frecuencia. La Figura 11 muestra la estimación del desplazamiento lateral

Figura 10

Aceleración de la base correspondiente a registro del terremoto de Northridge de 1994 y transformada de Fourier del registro (FFT)

**Figura 11**

Estimación del desplazamiento del techo y el cortante basal



del nivel superior de la estructura y su cortante basal, comparando las estimaciones con los parámetros correspondientes obtenidos mediante instrumentación. Como se observa, la metodología aplicada tiene el potencial de estimar la respuesta estructural con alto nivel de precisión.

5. Conclusiones

En este artículo se discutió el desarrollo y la aplicación del monitoreo estructural (o monitoreo de la salud estructural) en la evaluación de la vulnerabilidad estructural de infraestructuras civiles. El monitoreo estructural consiste en la extracción de información del estado de integridad estructural en base a mediciones de la respuesta estructural obtenidas mediante sensores e instrumentación. Las mediciones son procesadas por algoritmos estadísticos para inferir el estado de daños bajo la premisa de que los cambios físicos en la estructura son detectables en los datos medidos. La metodología contribuye a minimizar errores en el análisis debido a simplificaciones en el modelado estructural y en la efectividad del proceso de evaluación debido a la posibilidad de ser automatizado. Se discutieron dos estudios de casos: la instrumentación de un puente de concreto reforzado de vigas postensadas y una estructura de muro de corte. En ambos casos se instrumentaron las estructuras para extraer información de la respuesta estructural y el estado de integridad estructural, y se usaron las mediciones para calibrar modelos estructurales de elementos finitos, desarrollar curvas de fragilidad, y calcular índices de daños. El artículo demuestra aplicaciones de cómo aplicar el monitoreo estructural para estimar y predecir el comportamiento y el estado de daños de infraestructuras civiles.

Referencias

- Bernal, D., & Hernandez, E. (2006). A data driven methodology for assessing impact of earthquakes on the health of building structural systems. *Journal of Structural Design of Tall Buildings*, 15, 21–34.

- Erazo, K. (2023). Updated seismic hazard curves, maps, and spectra for the northern Dominican Republic using a probabilistic seismic hazard analysis. *Journal of Seismology*, 27(3), 409-428.
- Erazo, K., & Hernandez, E. (2016a). High-resolution seismic monitoring of instrumented buildings using model-based state observers. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. <https://doi.org/10.1002/eqe.2781>
- Erazo, K., & Hernandez, E. (2016b). Bayesian Model-Data Fusion for Mechanistic Post-earthquake Damage Assessment of Building Structures. *ASCE Journal of Engineering Mechanics*, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EM.1943-7889.0001114](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0001114), 04016062.
- Erazo, K., & Hernandez, E. (2016c). A model-based observer for state and stress estimation in structural and mechanical systems: Experimental validation. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 43(1-2): 141-152.
- Erazo, K., Sen, D., Nagarajaiah, S., & Sun, L. (2019). Vibration-based structural health monitoring under changing environmental conditions using Kalman filtering. *Mechanical systems and signal processing*, 117, 1-15.
- Farrar, C., Doebling, S., & Nix, D. (2001). Vibration-based structural damage identification. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 359, 131-149.
- Huang, M.-J., & Shakal, A. F. (2002). Building instrumentation objectives and models. Boston, Massachusetts: 7th U.S. *National Conference of Earthquake Engineering*.
- Lynch, J., & Loh, K. (2006). A Summary Review of Wireless Sensors and Sensor Networks for Structural Health Monitoring. *The Shock and Vibration Digest*, 38(2), 91-128.
- Naeim, F. (2013). Real-Time Damage Detection and Performance Evaluation for Buildings. *Springer Environmental Science and Engineering*.
- Nagarajaiah, S., & Erazo, K. (2016). Structural Monitoring and Identification of Civil Infrastructure in the United States. *Structural Monitoring and Maintenance - An International Journal*, 3(1), 1-30.

- National Transportation Safety Board (2008). *Collapse of I-35W Highway Bridge, Minneapolis, Minnesota, August 1, 2007*. Washington, DC: Highway Accident Report NTSB/HAR-08/03.
- Panagiotou, M., Restrepo, J., & Conte, J. (2007). *Shake table test of a 7-story full scale reinforced concrete structural wall building slice phase i: Rectangular wall section*. UCSD Report No. SSRP-07-07.
- Peeters, B., & De Roeck, G. (2001). One-year monitoring of the Z24-bridge: environmental effects versus damage events. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 30, 149–171.
- Rojas-Mercedes, N., Erazo, K., & Di Sarno, L. (2022). Seismic fragility curves for a concrete bridge using structural health monitoring and digital twins. *Earthquake and Structures*, 22(5), 503-515.
- Todorovska, M., & Trifunac, M. (2007). Impulse response analysis of the Van Nuys 7-storey hotel during 11 earthquakes and earthquake damage detection. *Structural Control and Health Monitoring*, 15, 90–116.
- Wills, M. (2007). *I-35W Mississippi River Bridge*. Wikipedia, Flickr, Photograph distributed under a cc-by 2.0 license.
- Withington, J. (2013). *Historia mundial de los desastres*. Turner.
- Yan, A. M., Kerschen, G., De Boe, P., & Golinval, J. C. (2005). Structural damage diagnosis under varying environmental conditions—Part I: A linear analysis. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 19(4), 847-864.