



Fabián Consuegra,

Ph.D. Dir. División Estructuras INGETEC

RESILIENCIA DE LA INFRAESTRUCTURA NACIONAL  
EXPLORADA CON PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS  
DE PUENTES



# RESILIENCIA DE LA INFRAESTRUCTURA NACIONAL EXPLORADA CON PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS DE PUENTES

## INFRASTRUCTURE RESILIENCE INVESTIGATED BY MEANS OF NON-DESTRUCTIVE TESTS IN BRIDGES

*Fabián Consuegra*  
*INGETEC*

*fabianconsuegra@ingetec.com.co*

*Camilo Marulanda*  
*INGETEC*

*marulanda@ingetec.com.co*

*Wilson Valbuena*  
*INGETEC*

*victorvalbuena@ingetec.com.co*

### Resumen

En este artículo se presenta un caso de éxito de pruebas no destructivas en un puente antiguo de la infraestructura nacional, para establecer su resiliencia ante eventos como sismo y fatiga para los que no fue diseñado. En contraste con pruebas típicas en Colombia de sólo topografía convencional, se eligieron sensores de alta precisión con registros sincronizados y continuos para medir líneas de influencia y la no-linealidad del puente. Asimismo, la ubicación y el tipo de sensores permitió verificar mediciones entre sí, al comparar por ejemplo deformaciones medidas con aquellas inferidas de las fuerzas medidas, o viceversa, para no limitar la calidad del resultado al uso de un modelo con incertidumbres. Este estudio es aplicable a puentes de la infraestructura colombiana, cuya vida útil requiere extensión y que a menudo se estudian en oficina con escasa información de construcción limitando conocer su comportamiento ante el evento sísmico de interés. Una conclusión a presentar, es la necesidad de que la prueba sea desarrollada de principio a fin con una óptica técnica consistente, que permita identificar la información requerida y medirla con suficiente precisión para emitir un concepto estructural que contribuya a una evaluación más realista del puente.

**Palabras clave:** diseño y ejecución de pruebas de carga puentes; configuración sensores; mediciones de campo; no linealidad de un puente.

### Abstract

This article presents a successful case of non-destructive testing on an old bridge from the national infrastructure, aimed at establishing its resilience to events such as earthquakes and fatigue, for which it was not originally designed. In contrast to typical testing in Colombia, which often only employs conventional topography, high-precision sensors with

synchronized and continuous recordings were chosen to measure influence lines, allowing for a more robust model calibration than using point-based altimetry. This study outlines a rigorous methodology applicable to bridges in Colombia's infrastructure, whose service life needs to be extended, and which are often studied in office with limited construction information and therefore under restricted understanding of their behavior for seismic conditions. One conclusion presented is the need for the load tests to be developed consistently from start to finish, with previous design letting to identify information to be tested and then the test to be executed with enough accuracy to provide a structural assessment that contributes to a more realistic evaluation of the bridge.

**Keywords:** design and execution of load testing in bridges; sensor configuration; measuring nonlinear behavior of bridge.

## Introducción

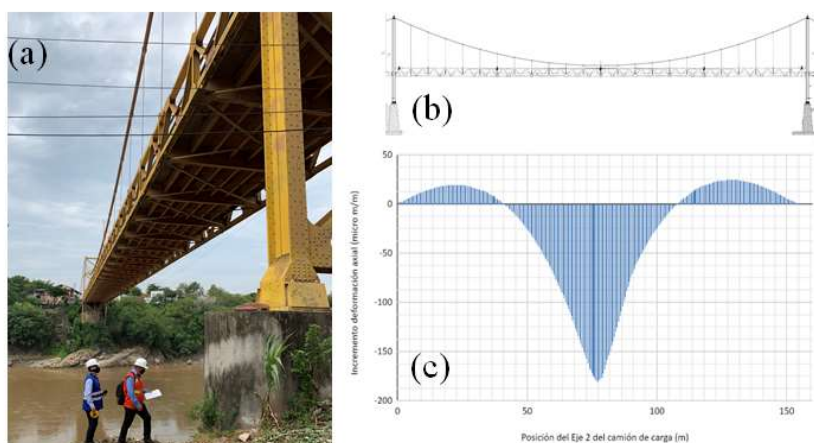
La evaluación estructural de puentes existentes de la infraestructura colombiana con herramientas más precisas y confiables, es una necesidad creciente tanto por el envejecimiento de la red nacional y el aumento de las cargas que transitan, como por la baja periodicidad en la inspección y mantenimiento de los puentes. Las pruebas de carga comúnmente usadas en Colombia consisten en la aplicación de una carga conocida y la medición de la respectiva deflexión causada mediante equipos de altimetría tradicional. Este esquema de prueba de carga sólo permite hacer evaluaciones generales de rigidez, con las que no es práctico identificar el comportamiento de elementos estructurales principales de forma directa. Tal esquema puede producir un resultado de amplias diferencias con el estimado del ingeniero diseñador, las cuales acaban por ser conciliadas con un ajuste del modelo numérico pero no llevan a identificar una falencia específica del puente. Es así como la prueba tradicional mencionada, carece de redundancia que permita al ingeniero confirmar resultados mediante comparación directa entre mediciones de diferente naturaleza, para evitar depender de la interpretación del modelo de oficina, que como se ha dicho, siempre indica resultados distintos a los reales. Una reflexión importante acerca de la ejecución de una prueba de carga, es la disponibilidad de un diseño específico previo para la selección de la instrumentación y su instalación, que permita de forma consistente con la motivación de la prueba, evaluar el parámetro o los parámetros específicos que lleven a una interpretación concisa de la condición estructural del puente [1].

Este artículo presenta una prueba de carga ejecutada en un puente colgante antiguo de la red nacional para evaluar su resiliencia que viabilice extender su vida útil. Dadas sus condiciones de incertidumbre asociadas al deterioro natural, a la falta de planos de construcción y al desconocimiento de su metodología de diseño original, entre otros, la prueba fue diseñada para aplicar carga en magnitud considerable para causar deformación apreciable y libre de interpretación, pero que al mismo tiempo no causara daño adicional en el puente. Asimismo, la configuración electrónica y de sensores implementada fue tal que, con las mediciones se rastreara no linealidad en el puente para lograr una comprensión estructural libre de la típica imprecisión del modelo matemático de oficina y de la suposición lineal-elástica. Puesto en

perspectiva del contexto colombiano, estos son los mismos aspectos que caracterizan la condición actual de los puentes de Colombia.

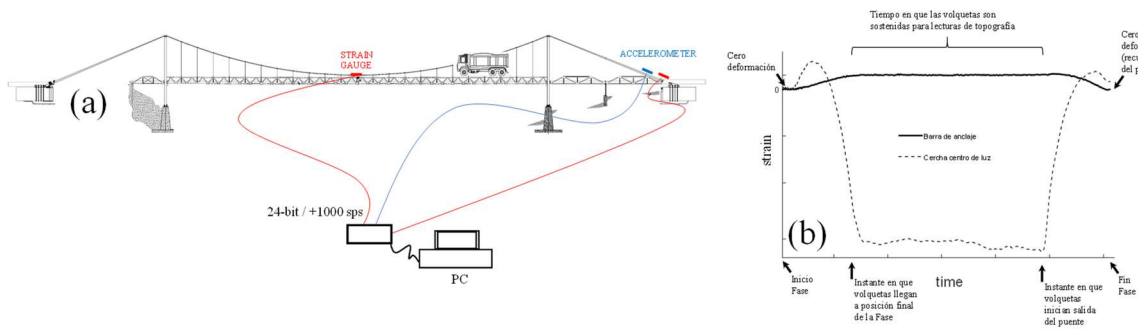
### Descripción del puente y resultados de la prueba

El puente colgante que fue evaluado y mostrado en la Figura 1(a), tiene una longitud total de 240 m y más de 70 años de antigüedad, y fue sometido a una serie de pruebas pseudoestáticas mediante camiones con pesos calibrados y colocados en diferentes posiciones a lo largo de la luz principal de la Figura 1(b) para generar diferentes estados de esfuerzos y deformaciones en sus elementos, como por ejemplo el calculado con un modelo matemático [2] mostrado en la Figura 1(c) que fue usado para comparación con las mediciones reales.



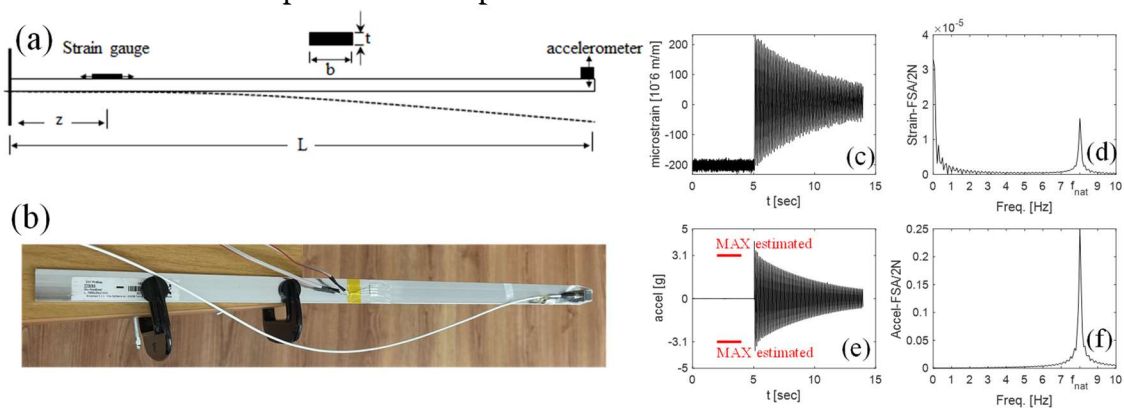
**Figura 1.** (a) vista general del puente; (b) plano estructural y (c) línea de influencia calculada con modelo matemático. **Fuente:** Propia.

En la prueba de carga se ejecutaron diferentes fases consistentes en diferentes configuraciones de camiones cargados, es decir el uso de uno o varios camiones posicionados a lo largo de la luz principal del puente. La Figura 2(a) muestra la configuración general de los sensores en el puente, que consiste en medir microdeformaciones en la viga de rigidez a través de strain gauges o galgas de deformación, mientras de forma simultánea y sincronizada se mide microdeformación y carga en los puntos de anclaje de los cables. Esta medición redundante de carga y deformación para un mismo cable, permite confirmar resultados de campo sin interpretaciones del modelo numérico. La Figura 2(b) muestra el esquema de carga, indicando sobre la escala horizontal de tiempo, cómo evoluciona la deformación en el centro de la viga de rigidez y en los cables, desde el instante en que circulan los camiones hasta que salen del puente. El cambio de signo de la microdeformación medida en el punto central de la cercha, desde que el vehículo está en el inicio de la luz cargada hasta que llega al centro de la luz, es la misma naturaleza cambiante de las deformaciones estimadas con el modelo matemático que se muestran en la Figura 1(c). Dado que la totalidad de la prueba requirió de ininterrumpida medición de forma sincrónica durante horas, un paso de tiempo adecuado debió ser seleccionado para digitalizar datos de forma suficiente acorde con el balance entre tiempo y frecuencia [3]. Dicha selección se basó en la identificación de las frecuencias de interés del cable y el puente, así como la duración de cada fase específica de la prueba de carga, asociado a aspectos de procesamiento de datos como la frecuencia de Nyquist [4].



**Figura 2.** (a) configuración sensores puente; (b) mediciones en esquema de carga y descarga.  
Fuente: Propia.

Como parte del diseño previo de la prueba, se hizo una simulación en oficina para configurar el esquema de instrumentación de campo (Figura 2a) con una viga en voladizo en escala reducida, con el fin de confirmar la simultaneidad y la consistencia entre parámetros físicos diferentes que representan el mismo fenómeno mecánico. Esto es, la deformación medida transformada en fuerza o viceversa, a través de consideraciones de elasticidad del material y sincronía de sensores. En las Figuras 3(a) y (b) se muestra el esquema de escala reducida y en las Figuras 3(c), (d), (e) y (f), se muestran los registros de microdeformación y aceleración en los dominios de tiempo y frecuencia, de los sensores instalados en la punta y la base del voladizo. Entre los aspectos que ilustran la consistencia esperada y que permitió después en el puente confirmar mediciones independientemente del modelo numérico, está la similitud de la frecuencia de vibración “ $f_{nat}$ ” identificada en las figuras (d) y (f), así como también la relación entre deformación medida y la microdeformación calculada (“ $MAX_{estimated}$ ”) de la figura (e), la cual fue estimada a través de relaciones estáticas y dinámicas en función de la geometría y el material. El esquema así verificado permitió entre otros, confirmar que, para los niveles de deformaciones y aceleraciones esperados para el puente real en campo, la configuración electrónica del sistema era adecuada para superar niveles de ruido y obtener mediciones libres de interpretación en el procesamiento de señales.



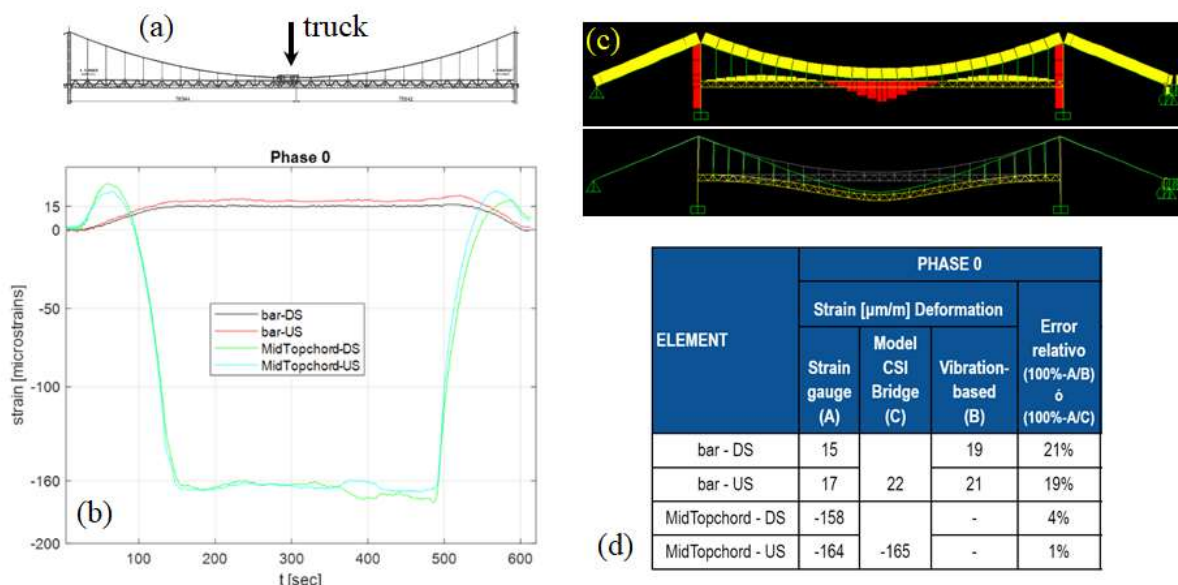
**Figura 3.** (a) y (b) viga a escala reducida con sensores instalados; (c) y (d) microdeformaciones en tiempo y frecuencia; (e) y (f) aceleraciones en tiempo y frecuencia.  
Fuente: Propia.

La Figura 4 muestra un resumen gráfico y numérico de resultados de oficina y de campo para la Fase 0, consistente en posicionar un juego de camiones en el punto central del

puede como puede verse en la Figura 4(a). La evolución de las microdeformaciones en las barras de anclaje aguas arriba (US) y aguas abajo (DS) así como en los cordones superiores del punto central de la cercha puede verse en la Figura 4 (b). Dichas deformaciones son consistentes con aquellas mostradas en la línea de influencia del modelo numérico de la Figura 1(c). Un modelo adicional preparado en CSI Bridge [5] para complementar el análisis numérico muestra la posición deformada en la Fase 0 en la Figura 4(c). La comparación entre los datos medidos y los resultados del modelo numérico de la Figura 4(d) resumida en las columnas A y C indica una diferencia promedio del 12% entre métodos distintos de medición, para confirmar de forma independiente a las suposiciones de oficina, la razonabilidad de las mediciones en el puente.

Dada la naturaleza cambiante del sistema al paso de los vehículos por la no linealidad de los cables, el registro continuo junto con el rastreo de los armónicos, permitió confirmar el cambio gradual de la fuerza en los cables a través de la de la Ecuación (1). En dicha expresión una señal “x” en el dominio del tiempo es transformada al dominio simultáneo de tiempo “t” y frecuencia “f” en la forma de un espectrograma [6]. Dada la naturaleza vibracional del cable, la solución de la ecuación diferencial del cable permite identificar los diferentes armónicos y hacer una asociación entre fuerza e instante en que circula el vehículo sobre el puente. Con dicha asociación no sólo se tiene un resultado real para comparar con la línea de influencia de la Figura 1(c), sino que se puede evaluar el comportamiento no-lineal del puente, el cual se manifiesta incluso en deformaciones para las que la suposición de modelo lineal limita una interpretación más precisa del comportamiento estructural.

$$X(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} \omega(t - \tau) x(\tau) e^{-j2\pi f \tau} d\tau \quad (1)$$



**Figura 4.** (a) Fase 0 de prueba de carga; (b) microdeformaciones en anclaje de cable y punto central de la cercha medidas durante la Fase 0; (c) modelo numérico de contraste en CSI Bridge; (d) comparación de microdeformaciones medidas y estimadas.

**Fuente:** Propia.

## Conclusiones

La prueba de carga presentada fue diseñada y ejecutada para evaluar el puente con una perspectiva única de identificar qué medir, y tomar las acciones consistentes de campo para ejecutar una medición precisa. En ese sentido, cada puente a ser probado requiere de un diseño específico para potenciar las posibilidades de su prueba de carga. Un aspecto relevante como la no-linealidad del puente podrá ser evaluado junto con la configuración electrónica del sistema de instrumentación, para aumentar las capacidades de su prueba de carga.

## Referencias

- [1] D, Inaudi, SMARTEC S.A., (2009). Structural Health Monitoring of Bridges: General issues and applications.
- [2] MIDAS Engineering Software, (2020). *MIDAS CIVIL*.
- [3] Wigner, E. P. (1932). *On the quantum correction for thermodynamic equilibrium. Physical Review*(40), 749—759.
- [4] Oppenheim, A. V., Schafer, R. W., & Buck, J. R., (2005). *Discrete-Time Signal Processing. Second Edition. Pearson Education*.
- [5] Computers and Structures, (2022). *CSI Bridge*.
- [6] MathWorks, Inc. (2000). *Matlab*.