

Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA)

LM-PI-UP-04-2016

MEDICIÓN DE DEFORMACIONES DEL PUENTE SOBRE EL RÍO GRANDE DE TÉRRABA RUTA NACIONAL No. 2

Preparado por:
Unidad de Puentes



San José, Costa Rica
17 de agosto de 2016



Documento generado con base en el Art. 6 de la Ley 8114 y lo señalado
Reglamento al Art. 6 de la precitada ley, publicado mediante decreto
DE-37016-MOPT.



Laboratorio Nacional de
Materiales y Modelos Estructurales



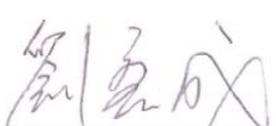
**PROGRAMA DE
INFRAESTRUCTURA DEL
TRANSPORTE**



Laboratorio Nacional de
Materiales y Modelos Estructurales



PROGRAMA DE
INFRAESTRUCTURA DEL
TRANSPORTE

1. Informe: LM-PI-UP-04-2016		2. Copia No. 1
3. Título y subtítulo: MEDICIÓN DE DEFORMACIONES DEL PUENTE SOBRE EL RÍO GRANDE DE TÉRRABA RUTA NACIONAL No. 2		4. Fecha del Informe 17 de agosto de 2016
5. Organización y dirección Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales Universidad de Costa Rica, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica Tel: (506) 2511-2500 / Fax: (506) 2511-4440		
6. Notas complementarias Ninguna		
7. Resumen Este informe de medición de deformaciones del puente sobre el Río Grande de Térraba, en la Ruta Nacional No.2, es un producto del programa de monitoreo de puentes en sitio de la Unidad de Puentes del PITRA - LanammeUCR para brindar apoyo interinstitucional a Acueductos y Alcantarillados.		
8. Palabras clave Puentes, Ruta Nacional No.2, Río Grande de Térraba, Monitoreo, Deformaciones.	9. Nivel de seguridad: Ninguno	10. Núm. de páginas 34
11. Inspección e informe por: Ing. Yi Cheng Liu Kuan Unidad de Puentes  Fecha: 10/08/2016	12. Inspección y revisión por: Ing. Pablo Agüero Barrantes Unidad de Puentes Fecha: 12/08/2016	13. Revisado por: Ing. Roy Barrantes Jiménez Coordinador Unidad de Puentes Fecha: 17/08/2016

Página intencionalmente dejada en blanco



TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN.....	7
2.	OBJETIVO.....	7
3.	ALCANCE DEL INFORME.....	7
4.	DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA	8
5.	MÉTODO EXPERIMENTAL	12
6.	RESULTADOS EXPERIMENTALES DE MEDICIÓN DE DEFORMACIÓN VERTICAL	15
7.	RESULTADOS EXPERIMENTALES DE ANALISIS DE VIBRACIONES	26
8.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	31
9.	REFERENCIAS	34

Página intencionalmente dejada en blanco

1. INTRODUCCIÓN

Mediante oficio UEN-PC-2016-01457 el Ing. Dagoberto Araya Villalobos solicita a la Dirección del LanammeUCR la colaboración para determinar las deformaciones de las superestructuras 1 a 5 del puente sobre el río Grande de Térraba en la Ruta Nacional No.2.

Lo anterior con el fin de que las mediciones sirvan como insumo para el diseño de las juntas de expansión para una tubería recientemente instalada que fue adosada al puente.

La ubicación de los puntos de medición fue coordinada por correo electrónico con el Ing. Néstor Solano Fonseca.

Este informe de medición de deformaciones del puente sobre el Río Grande de Térraba, en la Ruta Nacional No.2, es un producto del programa de monitoreo de puentes en sitio de la Unidad de Puentes del PITRA - LanammeUCR para brindar apoyo interinstitucional a Acueductos y Alcantarillados.

Dicho programa de monitoreo se encuentra en el marco de las competencias asignadas al PITRA - LanammeUCR mediante el artículo 6 de la ley 8114. El monitoreo estructural se realizó los días 4 y 5 de agosto del 2016.

2. OBJETIVO

Determinar las deformaciones máximas inducidas por las cargas operacionales que circulan sobre el puente en las superestructuras 1 a 5 del puente.

3. ALCANCE DEL INFORME

Este informe de medición de deformaciones presenta los resultados obtenidos de la medición las deformaciones inducidas por carga operacional vehicular que circula sobre el puente sobre el río Grande de Térraba en la ruta Nacional No. 2 durante los lapsos de tiempo que se registraron datos de deformación vertical.

Informe No. LM-PI-UP-04-2016	Fecha de emisión: 17 de agosto de 2016	Página 7 de 34
------------------------------	--	----------------

La carga operacional vehicular corresponde a los vehículos que circulan sobre el puente de manera aleatoria, sin control del tipo de vehículo ni del peso de los ejes. Debido a lo anterior se cuenta con la ventaja de que no es necesario cerrar el paso de vehículos sobre el puente.

Se debe diferenciar la prueba realizada a una prueba de carga estática donde se debe cerrar el paso de vehículos sobre el puente, para cargar el puente con camiones a los cuales se les ha realizado el pesaje de los ejes.

Se debe indicar que a pesar de que el puente es accesible lateralmente, no se realizaron mediciones con la cámara perpendicular al eje longitudinal del puente para respetar el protocolo de seguridad de la Unidad de Puentes. Lo anterior debido a que la altura de la maleza impide determinar la presencia de animales peligrosos para los ingenieros inspectores.

4. DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA

El puente monitoreado se ubica en la Ruta Nacional No.2 (tramo Barranca – Cañas) y cruza el río Grande de Térraba. La Figura 1 muestra la ubicación geográfica del puente.

La Tabla No. 1 resume las características básicas del puente y la Figura 2 se presentan una vista del puente. La Figura 3 muestra la identificación utilizada en este informe cuando se hace referencia a ciertos elementos del puente, la cual también coincide con la que se utiliza en los planos constructivos de 1953.



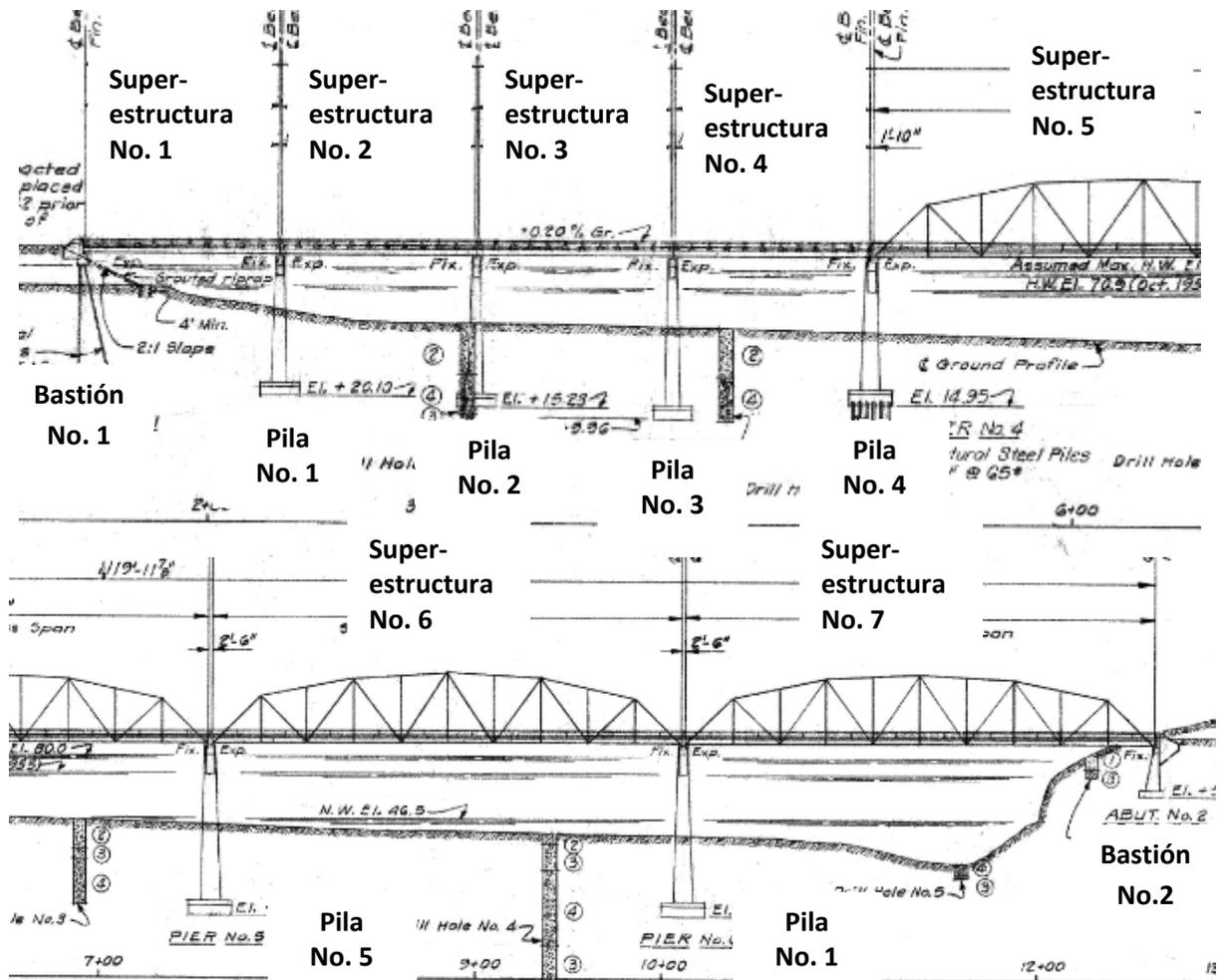
Figura 1. Ubicación del puente.



Figura 2. Vista a lo largo de la línea de centro desde el acceso Sur.

Tabla No. 1. Características básicas del puente.

Geometría	Tipo de estructura	Puente
	Longitud total (m)	341,4 (según planos)
	Ancho total (m)	8,53 (según planos)
	Ancho de calzada (m)	7,31 (según planos)
	Número de tramos	7
	Alineación del puente	Recto
	Número de carriles	2
Superestructura	Número de superestructuras	7
	Tipo de superestructura	Superestructuras 1 a 4: Tipo viga Superestructuras 6 a 7: Tipo cercha
	Número de vigas principales	Superestructuras 1 a 4: 4 (según planos) Superestructuras 6 a 7: 2 cerchas
	Tipo de vigas principales	Superestructuras 1 a 4: tipo I Superestructuras 6 a 7: cerchas de paso inferior
Subestructura	Número de elementos	2 bastiones y 6 pilas
	Tipo de bastiones	Bastión 1: Cabezal sobre pilotes Bastión 2: Marco
	Tipo de pilas	Tipo columna
	Tipo de cimentación	Bastión 1 y pila 3: Pilotes (según planos) Pilas 1, 2, 4, 5 y 6 y bastión 2: placa (según planos)
Diseño y construcción	Especificación de diseño original	AASHO 1953 (planos Abril 1953)
	Carga viva de diseño original	H15-S12-44



Elevación

Figura 3. Identificación utilizada para el puente sobre el río Grande de Térraba.

5. MÉTODO EXPERIMENTAL

Se realizaron mediciones de las deformaciones dinámicas inducidas por carga operacional en varios puntos de interés del puente utilizando método de procesamiento de imágenes digitales, donde el último fue validado a través de pruebas de laboratorio y de campo (Liu-Kuan, 2015). En la Figura 4 se presenta la ubicación de los puntos de medición (puntos rojos para el centro de la luz y amarillos para el cuarto de la luz) y la posición de la cámara identificadas como P1, P2 y P3.

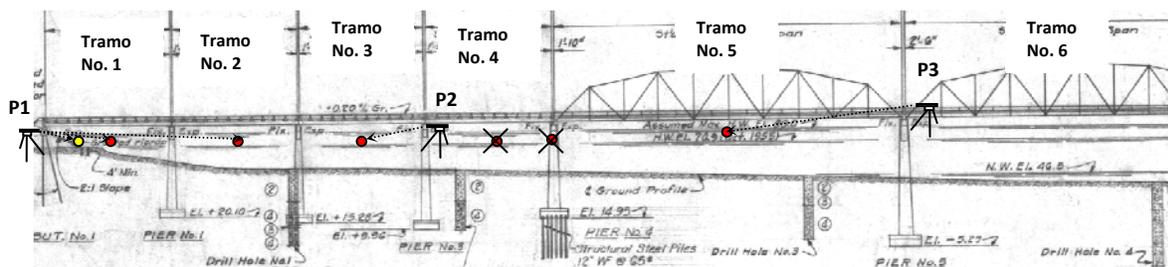


Figura 4. Identificación de los puntos de medición y ubicaciones de la cámara.

Para la medición de las superestructuras 1 y 2 del puente, se pudo instalar el sistema de medición en el acceso 1 (al final de la acera) identificado como P1 de la Figura 4 y presentado en la Figura 5. Dado que se trata de un sistema óptico que realiza la medición a distancia, el sitio de instalación el sistema debe estar libre de cualquier vibración o movimiento para que la medición sea correcta.

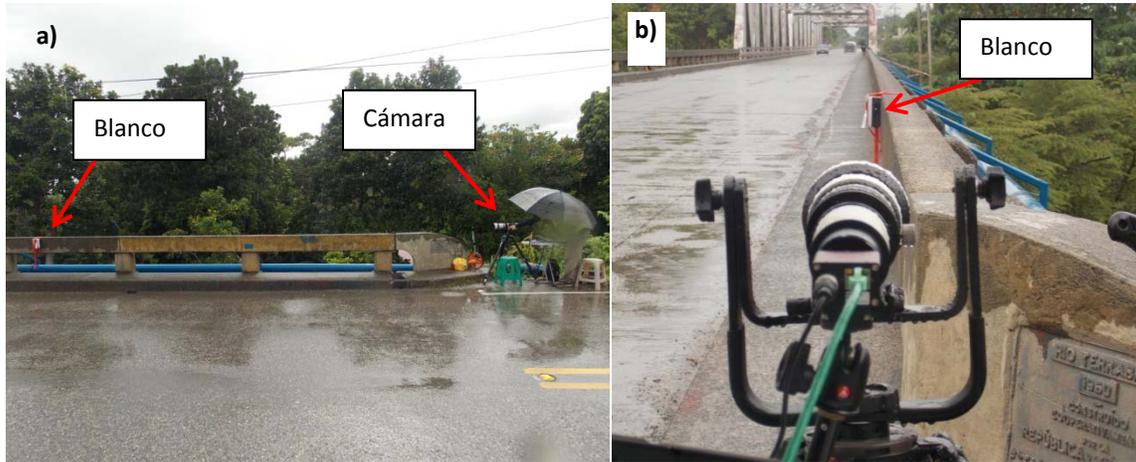


Figura 5. Vistas del punto de medición P1. A la izquierda, el equipo de medición sobre el acceso (punto P1) y el objetivo anclado a la barrera del puente. A la derecha, se presenta una vista desde la perspectiva de la cámara hacia el blanco de medición.



Figura 6. Blanco de rastreo fijado a la barrera vehicular

En la Figura 6 muestra el blanco de rastreo utilizado en esta prueba, el cual es una caja con una fuente que emite un haz de luz a través la ranura vertical, y con marcas blancas que indican la longitud de referencia. La caja es fijada a la baranda utilizabdo una cinta. La Figura 7 muestra la imagen que captura la cámara de video al enfocar el blanco de rastreo en tres ubicaciones distintas del blanco de rastreo. La línea azul vertical contabiliza la cantidad de pixeles que hay entre las dos marcas de referencia, de forma que conociendo la distancia entre ellas (39 mm) el factor de conversión mm/píxel puede ser establecido.

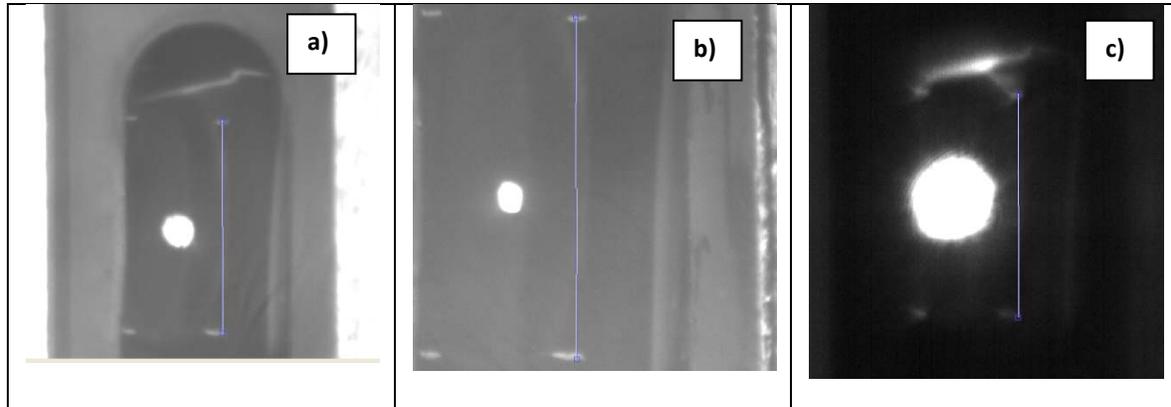


Figura 7. Imagen captada por la cámara de video en diferentes ubicaciones del blanco de rastreo. A) centro de la luz del tramo 1, b) un cuarto de la luz del tramo 1, y c) centro de la luz del tramo 2.

Se puede observar, además, que la distancia de 39 mm que hay entre las marcas de referencia (rayas blancas) ocupa casi toda la imagen para Figura 7b), lo que significa que hay una gran cantidad de píxeles disponibles para hacer la medición (hay una mayor resolución); mientras que la misma para c) ocupa una porción relativamente pequeña de la imagen, y como consecuencia se dispone de menos resolución para la medición en el tramo 2. Así que, al instalarse el sistema sobre la posición P1, se pudo tomar, con confianza, las medidas de deformación dinámica debido a las cargas operacionales que transitan por los puentes de aproximación del tramo 1 y 2. Para el tramo 1 en particular, se tomó las medidas de deformación vertical no sólo en el centro sino también a un cuarto del apoyo en aras de verificar que la deformación máxima ocurre efectivamente en el centro del claro (ver figura 4).

No obstante, para el nivel de deformación que experimenta las superestructuras tipo viga del puente, el equipo (específicamente el lente teleobjetivo) permite alcanzar una resolución aceptable de medición hasta 50 metros aproximadamente, razón por la que sólo se dispone de datos confiables de deformación vertical dinámica para los tramos 1 y 2.

6. RESULTADOS EXPERIMENTALES DE MEDICIÓN DE DEFORMACIÓN VERTICAL

A continuación se presentaran los resultados experimentales obtenidos presentados para cada punto de medición de deformación vertical.

6.1 Historia de deformación en el centro del tramo 1

La medición de los desplazamientos se hizo en tiempo real con una tasa de 50 muestras por segundo (Hz). El centro del tramo 1 está a una distancia de aproximadamente 15 metros de la cámara, y se logró alcanzar una resolución de 0.065 mm/pixel; este es el nivel de sensibilidad que permite alcanzar el sistema a la distancia dada, y significa que los movimientos registrados se darán en múltiplos de 0.065 mm. La medición de la deformación vertical durante 31 minutos y 40 segundos (1900 segundos) en el centro del tramo 1 se muestra en la Figura 8.

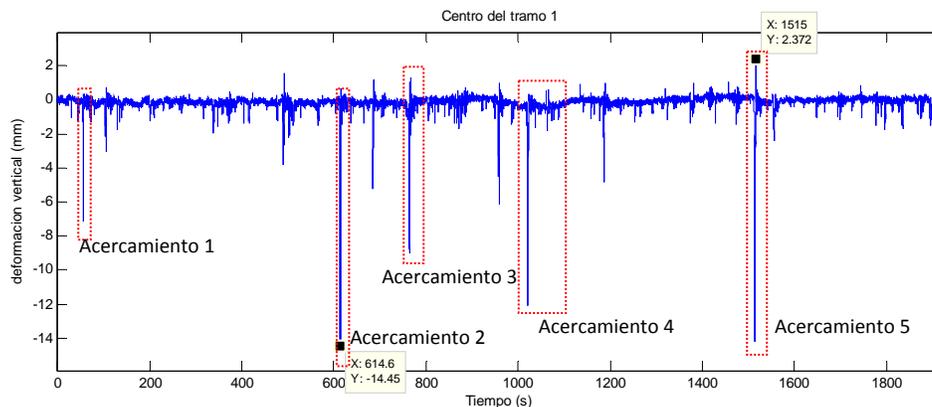


Figura 8. Deformación vertical registrada en el centro del tramo 1.

La toma de los 1900 segundos datos inició a las 14:33:52 y terminó a las 15:05:32 de la tarde día 4 de agosto del 2016. La máxima deformación positiva (encima de la posición de equilibrio estático del puente) alcanzada en este lapso es de 2.37 mm; mientras que la máxima deformación negativa (deflexión) es de 14.45 mm. Basándose en la observación en campo mientras se toman los datos, se nota que estos máximos son causados por el paso

de furgones aparentemente “cargados” viajando en el carril del costado del acueducto (Oeste); pues, según lo observado en campo se apreciaron hay furgones cuyo paso resulta en una deformación vertical entre el rango de unos 6 a 8 mm, mientras que hay otros que lo aumenta hasta por encima de los 12 mm, razón por la que se afirma que los furgones cargados son la causante de las máximas deformaciones en el tramo 1.

En las Figuras 9 a 13 se muestran acercamientos a las respuestas dinámicas del puente ante el paso de diferentes vehículos. El paso de vehículos livianos particulares causan, por lo general, una deformación menores de 1 mm en el centro del puente; por otro lado, se observa una combinación del efecto estático y dinámico en la deformación vertical debido al paso de vehículos de carga pesada como los furgones, y en particular, después de que el eje trasero sale del puente es cuando se produce la máxima deformación positiva (por encima de la posición del equilibrio estático) que antecede a una historia de vibración libre dejando al puente en oscilación durante hasta más de 10 segundos.

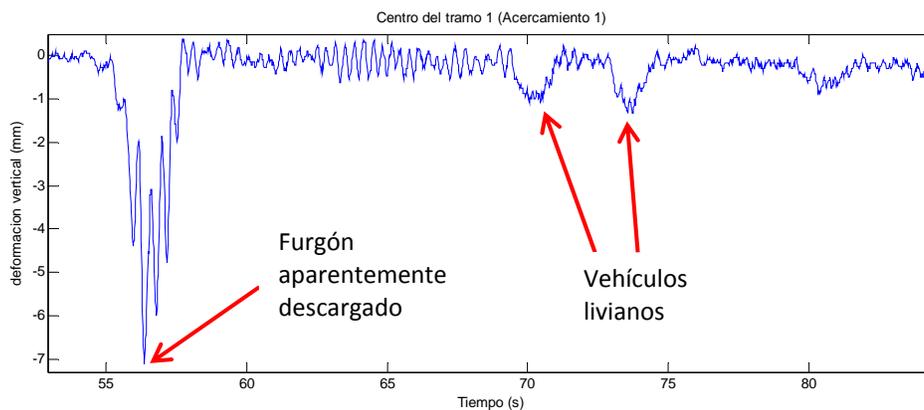


Figura 9. Acercamiento 1 de la Figura 8.

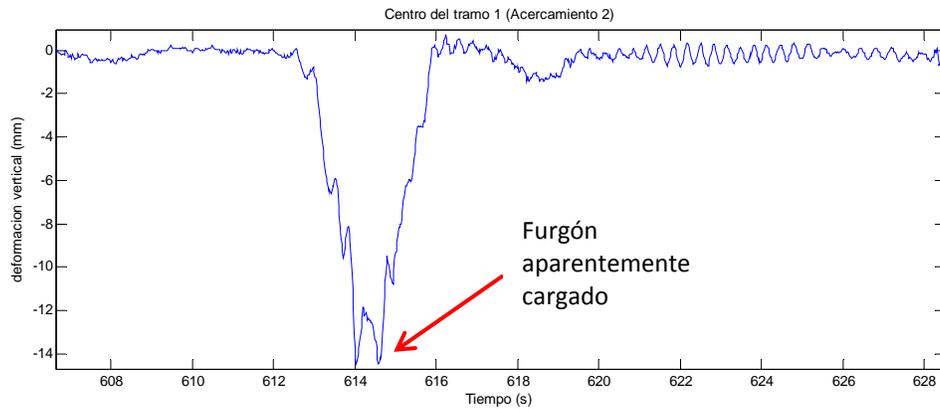


Figura 10. Acercamiento 2 de la Figura 8.

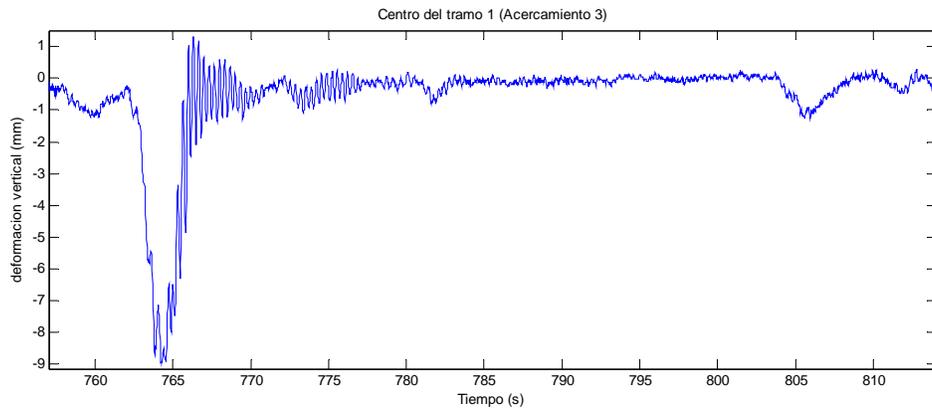


Figura 11. Acercamiento 3 de la Figura 8.

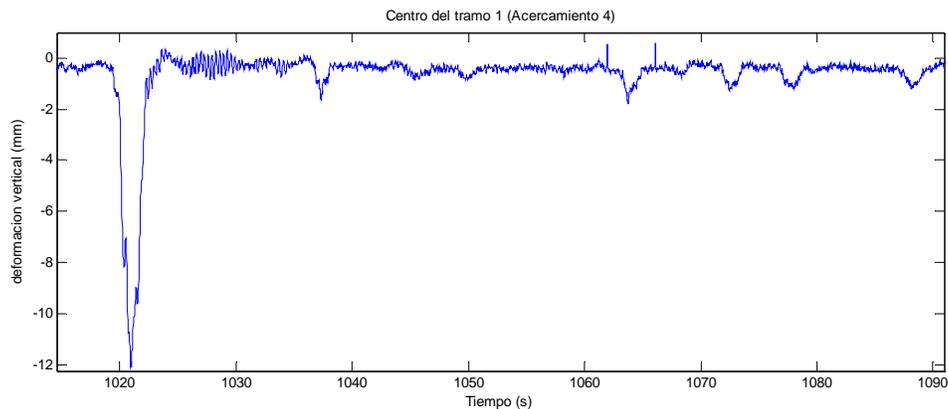


Figura 12. Acercamiento 4 de la Figura 8.

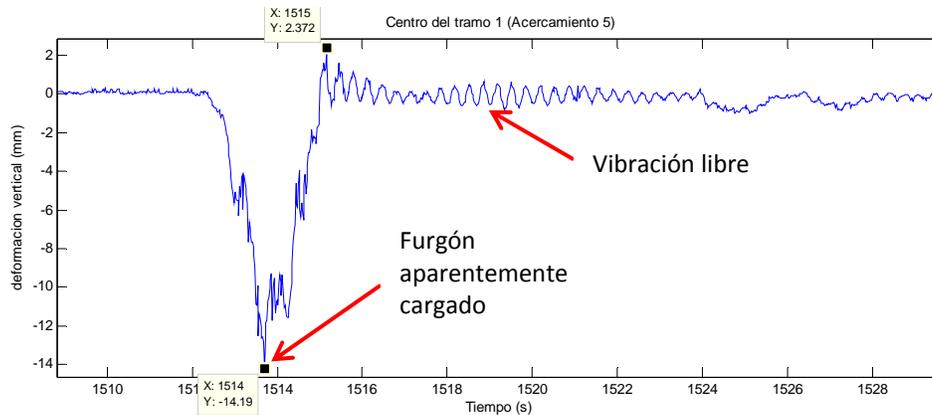


Figura 13. Acercamiento 5 de la Figura 8.

6.2 Historia de deformación a un cuarto del claro en tramo 1.

La tasa de muestreo empleado para este punto de medición es igual de 50 Hz y será la misma para todos los demás casos. Dado que está a un cuarto del claro desde el extremo Norte del tramo 1, el punto de medición está a una distancia de aproximadamente 7.5 metros de la cámara, se logró alcanzar una mayor resolución de hasta 0.038 mm/píxel. Se tomó datos igual durante 27 minutos y 52 segundos (1672 segundos) de tiempo, y la historia de deformación obtenida se muestra en la Figura 14, iniciando desde las 15:25:51 y terminado a las 15:53:43 de la tarde. La deformación máxima positiva registrada en esta casi media hora de medición es de 0.62 mm mientras que la máxima negativa es de 5.06 mm: casi una tercera parte del máximo registrado en el centro del tramo 1; además, basado en observaciones en campo, estas máximas deformaciones negativas alcanzadas corresponden al caso de furgones aparentemente cargados. Esto comprueba que la deformación máxima alcanzada en este primer tramo de aproximación se da en el centro del claro. Las Figuras 15 a 18 muestran acercamientos a algunas partes de la medición.

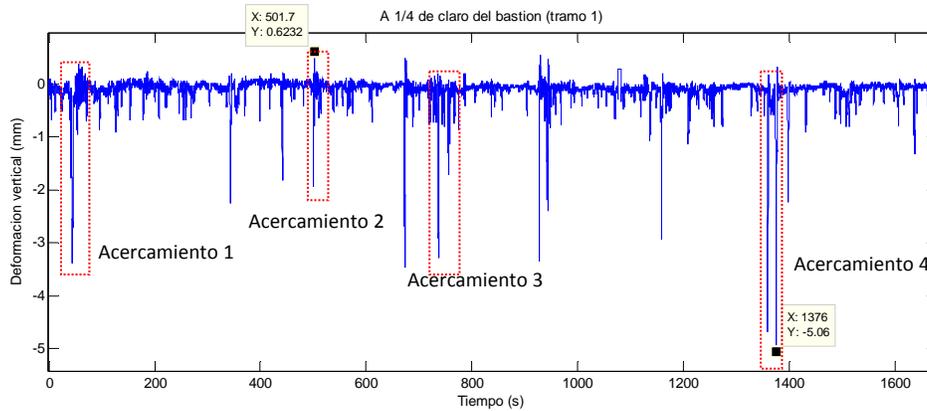


Figura 14. Deformación vertical registrada a 1/4 del claro en el tramo 1.

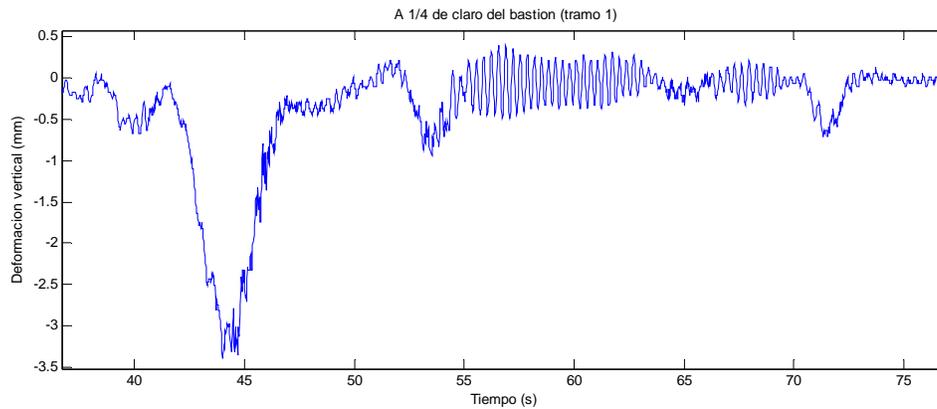


Figura 15. Acercamiento 1 de la Figura 14.

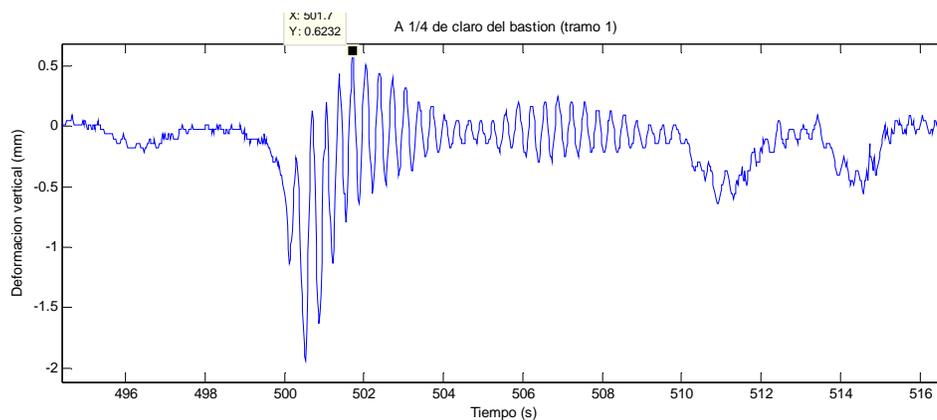


Figura 16. Acercamiento 2 de la Figura 14.

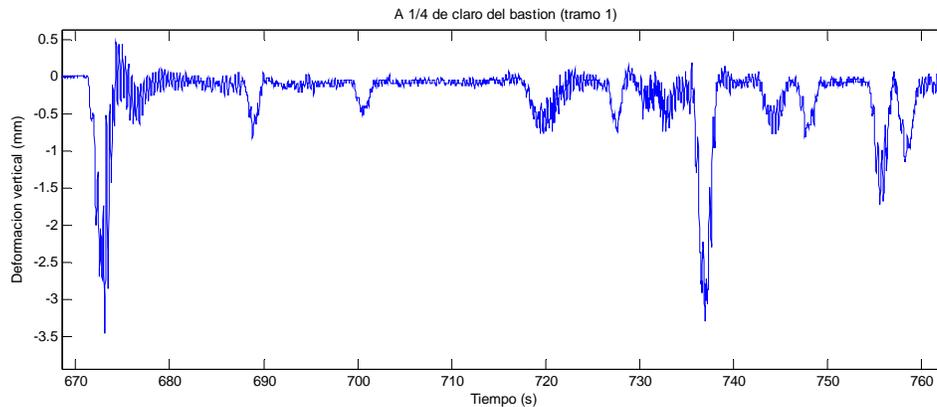


Figura 17. Acercamiento 3 de la Figura 14.

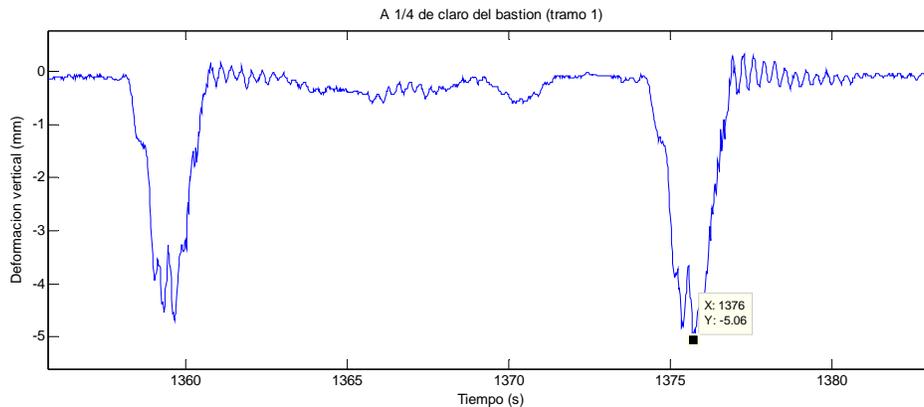


Figura 18. Acercamiento 4 de la Figura 14.

6.3 Centro del tramo 2

El punto de medición ubicado en el centro del tramo 2 está a una distancia de aproximadamente 42 metros de la cámara, con esta última ubicada en el mismo lugar de donde se midieron los puntos del tramo 1. Se debe recordar que la capacidad máxima del sistema para el nivel de deformación de los puentes tipo viga es aproximadamente de 50 metros. Dado que la distancia entre la cámara y el blanco de medición es mayor, la resolución es de 0.18 mm/píxel. Se tomaron datos durante 1900 segundos, iniciando desde las 5:30:53 y terminado a las 5:51:33 de la mañana del día 5 de agosto del 2016.

La medición de la deformación en el centro del tramo 2 fue realizada en el día siguiente debido a que una vez concluida la toma de datos a un cuarto del claro de tramo 1, la fuerte intensidad de lluvia impidió continuar en la labor, la cual tuvo que reanudarse hasta la madrugada del día siguiente. Aunque el tránsito durante estas primeras horas del día es bastante reducido, se registró la presencia del paso de vehículos de carga pesada como buses y furgones, y se obtuvo en este lapso de tiempo la deformación máxima positiva de 5.34 mm; mientras que la negativa es de 14.85 mm tal como se muestra en la Figura 19, medida que fue la mayor obtenida durante todas las mediciones. Acercamientos a algunas partes de esta historia de deformación en el tiempo se muestran en las Figura 17 a 19.

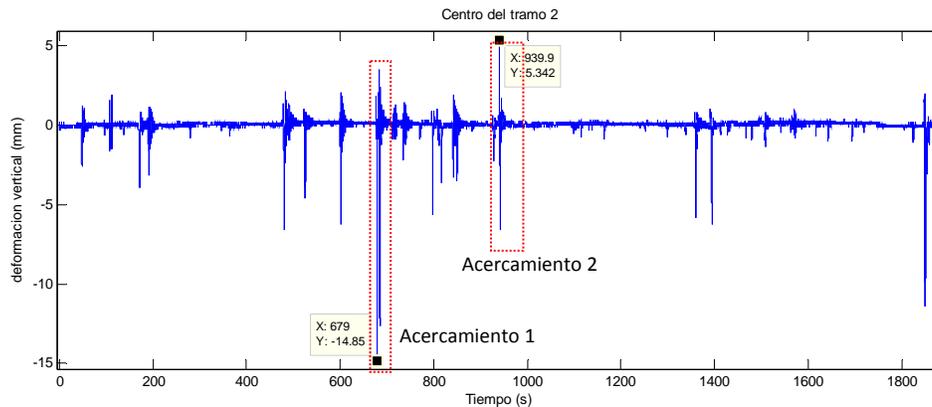


Figura 19. Deformación vertical registrada en el centro del tramo 2.

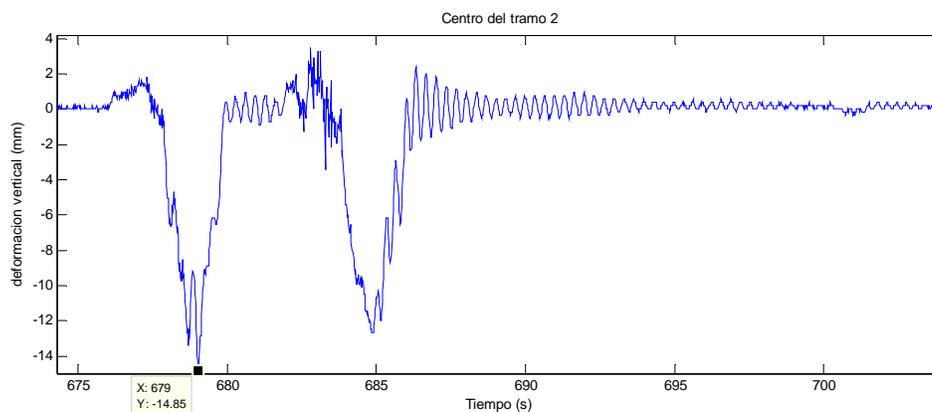


Figura 20. Acercamiento 1 de la Figura 19.

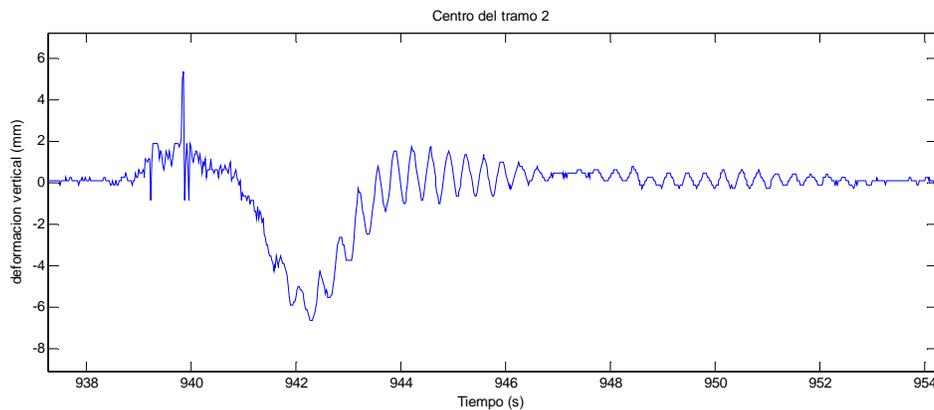


Figura 21. Acercamiento 2 de la Figura 19.

6.4 Centro del tramo 3

El centro del tramo 3 estaría a unos 70 m de la ubicación de la cámara si esta permanece en la ubicación P1 (ver figura 4). Teniendo en cuenta que la resolución de medición del centro de tramo 2 presenta una resolución de 0,18mm/píxel (1,21% de la deformación máxima registrada del tramo 2) para una distancia de 42 metros, al alejarse más la incertidumbre de la medición aumentará debido a la disminución en la resolución. Debido a lo anterior, se decidió trasladar el equipo de medición e instalarlo en la posición P2 mostrada en la Figura 4 y con las patas del trípode apoyadas sobre el apoyo del tramo 4 sobre la pila tal como se aprecia en la Figura 22, con la intención de que las deformaciones inducidas por el tránsito que va entrando al tramo 3 no afecte las mediciones; pues, al tratarse de puentes simplemente apoyados, la zona de los apoyos siempre experimenta movimientos de rotación cuando viaja a través de ellos cargas vehiculares.



Figura 22. Posición de la cámara y trípode para el centro del tramo 3 (P2 en Figura 4).

No obstante, al estar apoyadas las patas del trípode en los apoyos del costado Oeste del tramo 4, una vez que el eje delantero del vehículo entre a tramo 4 (incluso, teniendo aún muchos de sus ejes en el tramo 3) induce una rotación en los apoyos de la cámara y genera mediciones de deformaciones negativas ficticias (es decir, hacia abajo) tal como se ilustra en la Figura 23. Esto se evidencia en las mediciones mostradas en el acercamiento a un lapso de medición en la Figura 24, donde siempre aparece dos picos de deformación negativa por el paso de cada vehículo pesado: el primero corresponde a la deformación correcta mientras que el segundo es inducido por la rotación de la cámara. En la Figura 24 se puede apreciar toda la historia de deformación registrada para el centro del tramo 3.

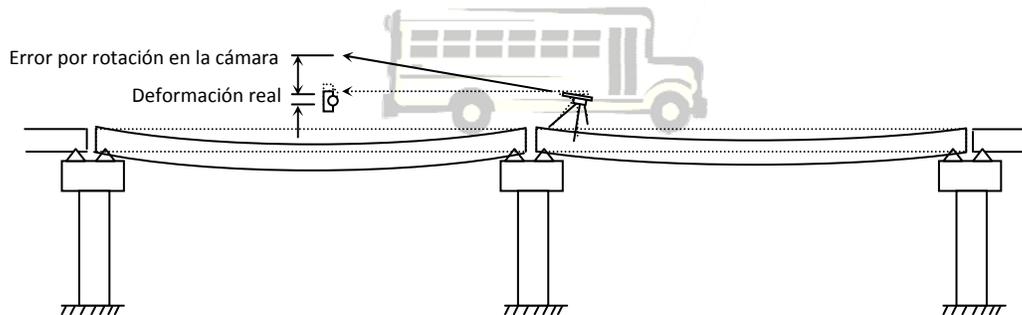


Figura 23. Error en la medición inducido por rotación el lugar de apoyo de la cámara.

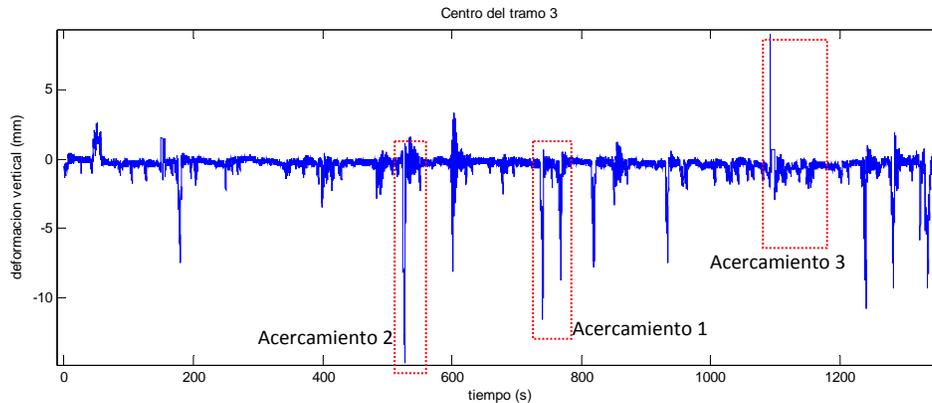


Figura 24. Deformación vertical registrada en el centro del tramo 3.

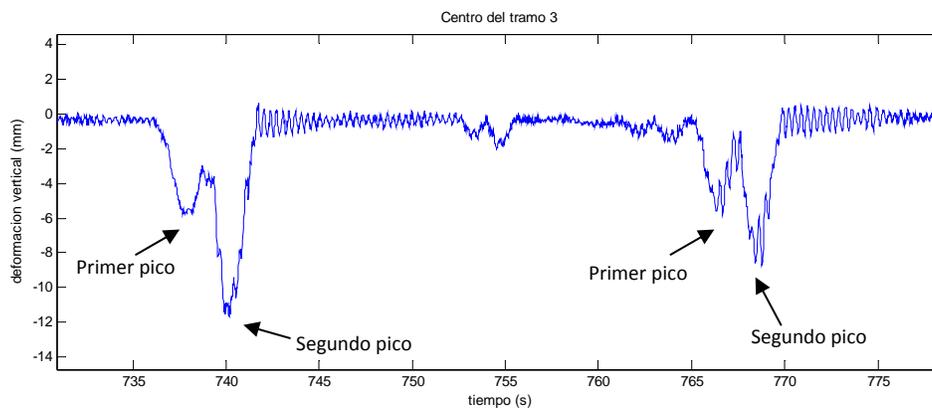


Figura 25. Acercamiento 1 de la Figura 24, donde se observa dos picos generados por el paso de un camión: el primero es la deformación verdadera y la segunda causada por la rotación generada en el apoyo por el paso de la carga.

Además, la gran premisa que se debe cumplir para que la medición del primer pico sea correcta es que en el mismo instante, no debe haber vehículos viajando en el carril del costado Este, de lo contrario, la medición del primer pico también acarrearía error. Por estas razones, aunque se obtuvo mediciones para tramo 3, se considera que la medición no es del todo confiable, aunque inspeccionando la señal y descartando el segundo pico correspondiente a la medición ficticia, se puede obtener que la máxima deformación captada en este tramo también es de unos 11.11 mm tal como se muestra en la Figura 26.

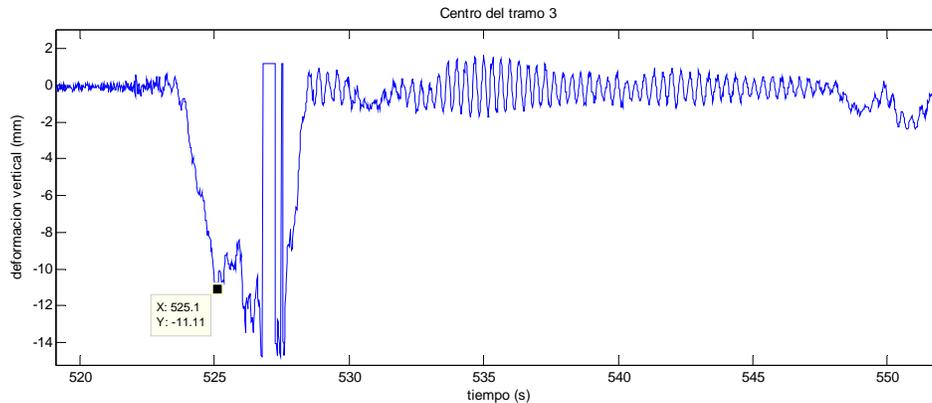


Figura 26. Acercamiento 2 de la Figura 24.

Las partes de la señal donde aparece “cuadrada” significa que no hay señal, tal como se puede observar en la Figura 26 a los 527 segundos aproximadamente y en la Figura 27 como de los 1091 a casi 1100 segundos. Esto se debe a que el blanco de medición fue cubierto por algo (como por ejemplo, por peatones que transitan por la acera) o por el exceso de vibración en donde está apoyada la cámara y que como resultado quedó fuera del rango de medición de la cámara.

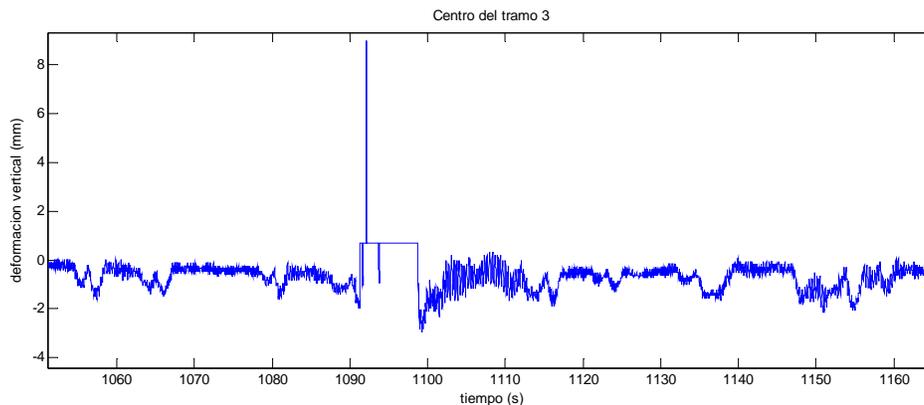


Figura 27. Acercamiento 3 de la Figura 24.

Debido a que no es posible obtener mediciones confiables con el trípode apoyado en la zona de las pilas, además de la larga distancia que hay entre el centro del tramo 4, la pila donde se apoya el puente del tramo 4 y la cercha, así como el centro de la cercha del bastión, no se prosiguió con la medición de estos puntos.

7. RESULTADOS EXPERIMENTALES DE ANALISIS DE VIBRACIONES

Se puede aplicar diversos métodos para obtener los parámetros dinámicos del puente: tal como la transformada de Fourier o la densidad espectral de potencia (Power Spectral Density Function en inglés), así como los métodos subespaciales, sean en el dominio de tiempo: SSI-COV (método de identificación de subespacios estocásticos basado en covarianzas, SSI-COV por sus siglas en inglés: Covariance driven Stochastic Subspace Identification); o en el dominio de frecuencias: FDD (descomposición en el dominio de frecuencias, FDD por sus siglas en inglés: Frequency Domain Decomposition). Sólo que para este caso de una sola medición, no es posible formar matrices de covarianza por lo que en este caso sólo aplica la densidad espectral de potencia.

7.1 Centro del tramo 1

Como una primera aproximación se puede calcular la densidad espectral de potencia para toda la historia de deformación obtenida para el centro del tramo 1, la cual se muestra en la Figura 28. Se puede observar un pico ubicado en 2.93Hz el cual indica la frecuencia dominante en la señal; no obstante, se observa también que este pico es sumamente ancho y pareciera no tratarse de una sola frecuencia. Al revisar en detalle la historia de deformación en el tiempo, se aprecia en repetidas ocasiones historia de vibración libre, generada después del paso de vehículos pesados, pero con una apariencia modulada tal como se muestran en la Figura 29.

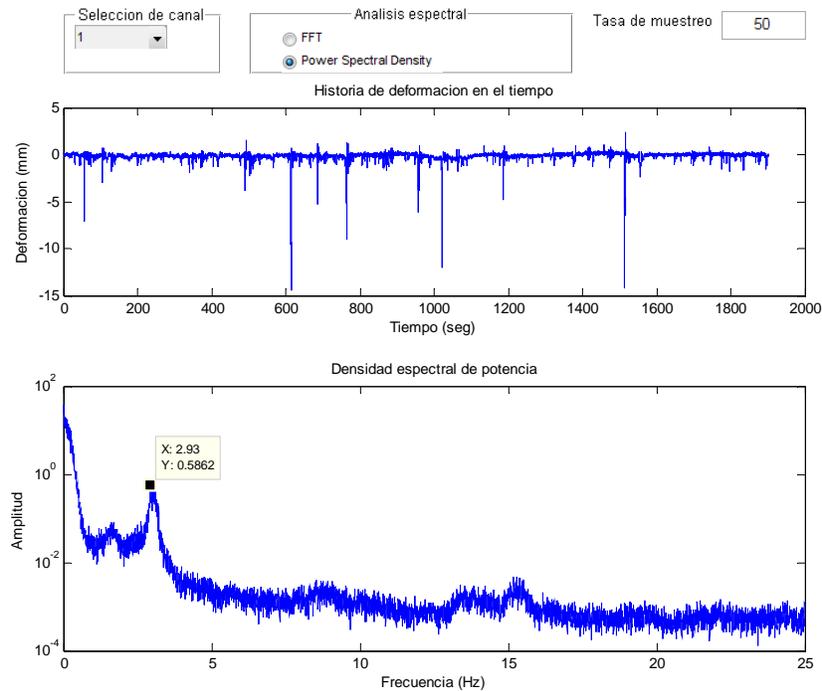


Figura 28. Densidad espectral de potencia de la historia obtenida en el centro del tramo 1.

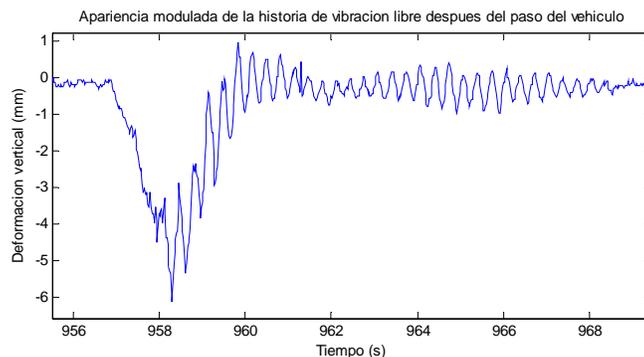


Figura 29. Apariencia modulada en la historia de vibración libre.

Debido a esta apariencia modulada en la señal de vibración libre, métodos convencionales como el decremento logarítmico, el cual es utilizado para la estimación de amortiguamiento a partir de señales de vibración libre, no puede ser aplicado en este tipo de señales moduladas. Asimismo, esta apariencia modulada sugiere la existencia de dos frecuencias muy cercanas alrededor de 2.93 Hz en la historia de vibración libre, tal como se ilustra en forma de ejemplo en la Figura 30. Sin embargo, estas dos frecuencias no se logran

identificar en la densidad espectral de potencia, razón por la que se recurre a métodos más rigurosos como SSI-COV para su identificación. El diagrama de estabilización generado por el método SSI-COV y con la densidad espectral de potencia en el fondo es mostrado en la Figura 31.

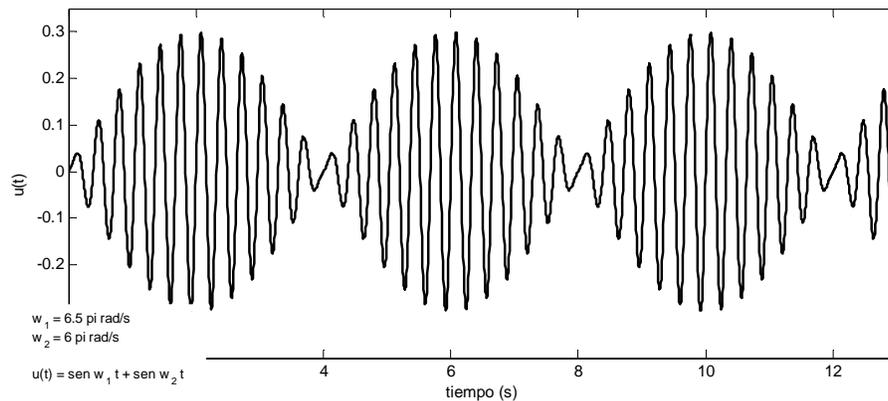


Figura 30. Apariencia modulada creada por dos sinusoidales con frecuencias muy cercanas entre ellas.

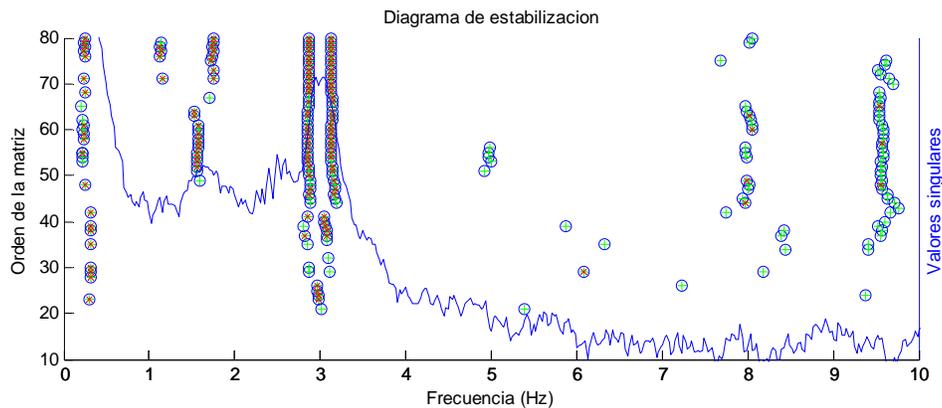


Figura 31. Diagrama de estabilización del método SSI-COV para la identificación de frecuencias muy cercanas una de la otra.

Se puede observar en la Figura 31 dos diagramas muy estables alrededor de los 3 Hz, indicando así que hay dos modos de vibración. Los parámetros dinámicos obtenidos para estos dos modos se muestran en la Tabla No. 2. Dada la naturaleza de la medición que es de deformación vertical (desplazamiento), las vibraciones debido a los modos fundamentales

regirán en la medición. Por lo tanto, aunque no se dispone de formas modales experimentales identificadas, es de esperar que una de estas dos frecuencias corresponden al modo fundamental de flexión y la otra al de torsión.

Tabla No. 2. Modos fundamentales de flexión y torsión identificados

Frecuencia (Hz)	Amortiguamiento
2.88	0.028
3.14	0.042

7.2 Centro del tramo 2

Similar a lo hecho para el tramo 1, se calculó como una primera aproximación la densidad espectral de potencia para toda la historia de deformación del centro de tramo 2, la cual se muestra en la Figura 32. Se puede observar un pico ubicado en 2.90 Hz con las mismas características observadas en el caso de tramo 1, y se aprecia también la misma apariencia modulada en la señal de vibración libre tal como se muestra en la Figura 33. Razón por la que el método SSI-COV es empleado de nuevo para tratar de identificar los dos modos de vibración con frecuencias muy cercanas; no obstante, sólo se pudo identificar una sola frecuencia en este caso: 2.91 Hz y con un amortiguamiento de 0.02.

La razón de esto puede ser debido a que las frecuencias están mucho más cercanas, las cuales en presencia de ruido de la medición no fue posible para el método discriminar un modo de otro, por lo que aparece diagramas inestables rodeando de uno muy estable en 2.91 Hz; la otra causa puede ser también por la falta de resolución en la medición para el tramo 2. El diagrama de estabilización con la densidad espectral de potencia en el fondo es mostrado en la Figura 34.

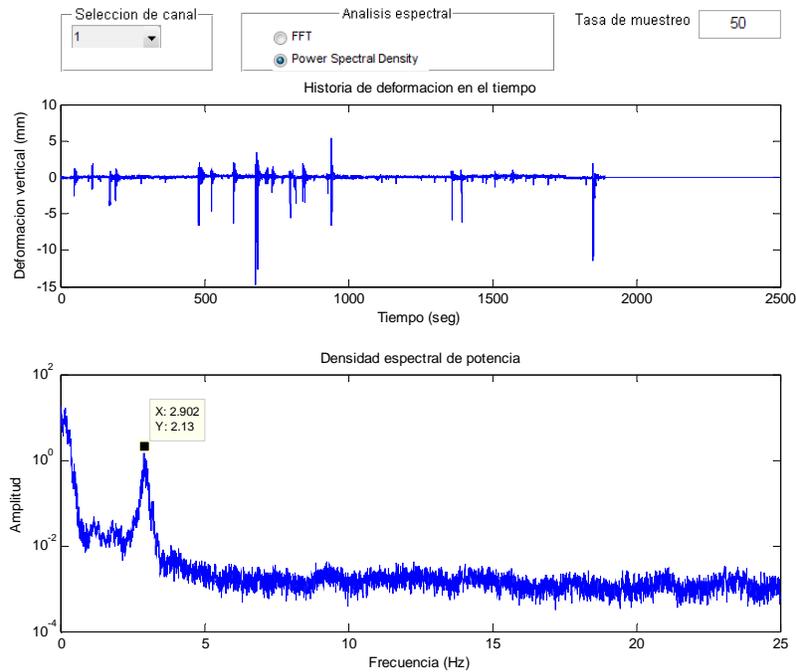


Figura 32. Densidad espectral de potencia de toda la historia del tramo2.

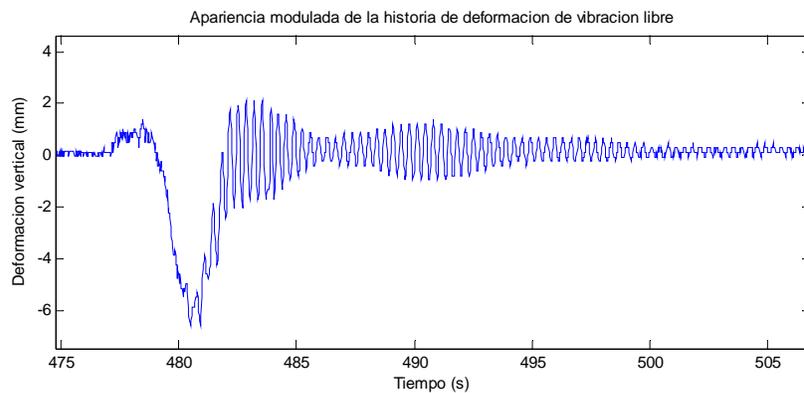


Figura 33. Apariencia modulada en la historia de vibración libre.

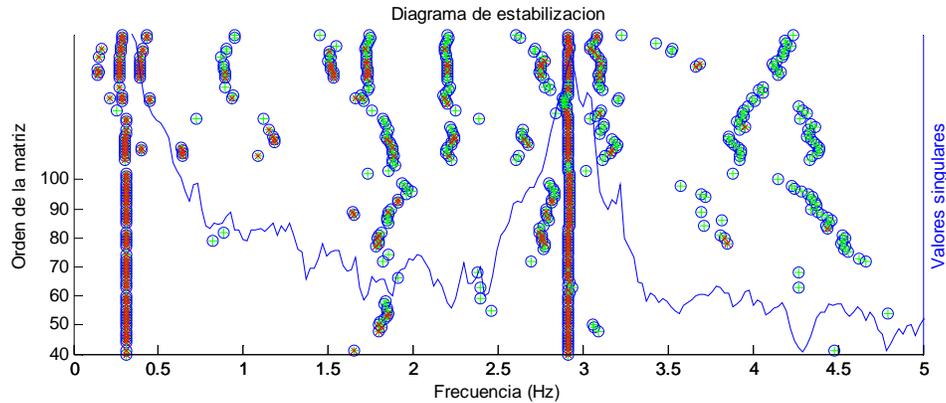


Figura 34. Diagrama de estabilización del método SSI-COV.

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se pudo obtener con confianza la historia de deformación en el tiempo para los puntos ubicados en el centro del tramo 1 y 2, así como a un cuarto de claro de tramo 1. Mientras que la medición del tramo 3 conlleva cierta incertidumbre al estar la cámara apoyada en una superficie afectada por vibraciones del puente. Debido a lo anterior se decidió no realizar mediciones en los tramos 4 y 5.

Las deformaciones máximas y mínimas obtenidas para lapsos de 30 minutos se muestran en la Tabla No. 3.

Tabla No. 3. Deformaciones máximas negativas y positivas obtenidas

	Deformación máxima negativa ↓ (mm)	Deformación máxima positiva ↑ (mm)
Centro del tramo 1	14.45	2.37
1/4 del tramo 1	5.06	0.62
Centro del tramo 2	14.85	5.34
Centro del tramo 3	11.11**	-

** Leer los comentarios de la sección 6.4

Se realizó el análisis dinámico con el método SSI-COV para obtener las frecuencias de los modos dominantes de vibración y el amortiguamiento en la condición operacional. Para el primer tramo se obtuvo dos modos dominantes en la historia de deformación vertical: 2.88 Hz con 0.028 de amortiguamiento y 3.14 Hz con 0.042 de amortiguamiento. Dado que son modos obtenidos de la historia de desplazamiento de un punto en el centro del tramo 1, es de esperar que estos dos modos correspondan a los modos fundamentales de flexión y torsión. Para el tramo 2, sólo se pudo recuperar una frecuencia de 2.91 Hz con un amortiguamiento de 0.02.

Por último, se observó en campo que las máximas deformaciones verticales operacionales son producidas por el paso de furgones en el carril del lado del acueducto (Oeste); sin embargo, debido a que no es posible controlar las cargas operacionales que circulan sobre el puente, no fue posible registrar la deformación que induce el caso cuando circulan sobre el puente dos furgones en sentido contrario en un mismo tramo. Debido a lo anterior se recomienda, para propósitos de diseño de la tubería, estudiar la pertinencia de utilizar un factor de seguridad para contemplar el caso de 2 camiones cargando simultáneamente una misma superestructura del puente.

Las deformaciones registradas debido a la carga operacional son menores al límite de deformación para carga viva vehicular de diseño establecido en la norma AASHTO, que es $L/800$. En el caso de las superestructuras tipo viga el límite corresponde a una deformación vertical en el centro aproximadamente de 35 mm.

Además, para el diseño de las juntas expansivas de la tubería, se recomienda revisar el comportamiento dinámico del acueducto sobre los apoyos, procurando que el período natural de vibración del sistema de acueductos se desfase de los modos fundamentales de vibración identificados en los tramos. Esto para evitar que entren en resonancia provocando daños mayores.

La medición del resto de los puntos es factible colocando la cámara perpendicularmente al eje longitudinal del puente. Sin embargo para cumplir el protocolo de seguridad de la UP se recomienda realizar la remoción de la maleza que crece en la planicie de inundación de la

margen oeste del río. Además, asegurarse de que no existan peligros para los ingenieros que realizarán el monitoreo, por ejemplo animales salvajes.

9. REFERENCIAS

1. AASHTO. "The Manual of Bridge Evaluation". Second Edition. Washington, DC. 2011.
2. Liu, Y.C.; Loh, C.H.; Ni, Y.Q. "Stochastic subspace identification for output-only modal analysis: application to super high-rise tower under abnormal loading condition". *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. 42:477-498. Wiley Online Library. June, 2012.
3. Lui-Kuan, Y.C, Agüero-Barrantes, P., Barrantes-Jiménez, R., Loria-Salazar, L.G. (2015). *Desarrollo y validación de un sistema portátil de monitoreo y evaluación de puentes LM-PI-UP-07-2015*. San José, Costa Rica: Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA), LanammeUCR.
4. Lui-Kuan, Y.C, Agüero-Barrantes, P., Barrantes-Jiménez, R., Loria-Salazar, L.G. (2015). *Desarrollo y validación de un sistema de medición de desplazamiento en tiempo real mediante técnicas de procesamiento de imágenes digitales LM-PI-UP-06-2015*. San José, Costa Rica: Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA), LanammeUCR.
5. Peeters, Bart. "System Identification and Damage Detection in Civil Engineering". Ph.D. Dissertation, Katholieke Universiteit, Leuven, December 2000.