

## EVALUACIÓN DINÁMICA DE LA ESTRUCTURA DE UN PUENTE SOMETIDA A ACCIONES ORIGINADAS POR LA EXPLOTACIÓN DE CANTERAS

Carlos Gerbaudo<sup>a</sup> María H.Peralta<sup>b</sup> Norma L. Ercoli<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Universidad Nacional de Córdoba, Facultad de Ingeniería-INGROUP, Oficina de Proyectos.

<sup>b</sup> Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Facultad de Ingeniería –  
Olavarría- Bs.As. Argentina. E-mail: mperalta@fio.unicen.edu.ar. <http://www.fio.unicen.edu.ar>

**Palabras Clave:** análisis estructural, vibraciones, evaluación

**Resumen.** Las vibraciones generadas durante el proceso de voladura en la explotación de canteras inducen deformaciones y solicitaciones en las estructuras o edificaciones próximas a la fuente de la explosión, generando acciones dinámicas temporales en los elementos constitutivos de la construcción, que podrían causar daños.

En el presente trabajo se expone una metodología de análisis para la evaluación de las acciones y efectos dinámicos originados por las voladuras en una estructura de un puente ubicado en cercanías a la zona de explotación de una cantera. Se trata de un puente de 32 m de longitud, con tablero de múltiples vigas pretensadas con losa superior, simplemente apoyado sobre estribos de hormigón armado ubicados en ambos lados de un corte en el macizo rocoso, ubicado a 20 metros de altura del fondo de la excavación de una cantera.

En la verificación de la estabilidad del macizo rocoso en el que se apoyan los estribos, se consideraron las fuerzas inerciales originadas por las voladuras, calculadas para un escenario de voladuras controladas de acuerdo a la metodología del United States Bureau of Mines (USBM), utilizado como criterio de diseño para la preservación de la zona de fundaciones.

La evaluación de la estructura construida se realizó a partir de una Prueba de Carga Estática y de una evaluación dinámica a través del análisis de las frecuencias y modos naturales de vibración. Tanto para la evaluación estática como para la dinámica se efectuaron predicciones mediante modelos numéricos que posibilitaron la planificación de las mediciones “in situ” y su posterior interpretación. La evaluación dinámica permitió observar la importancia del estricto control de las voladuras, asegurar el cumplimiento del criterio de USBM, en cuanto a los límites de velocidades para los rangos de frecuencias correspondientes para preservar a la estructura de posibles daños por acciones dinámicas.

## 1 INTRODUCCION

Las vibraciones generadas durante el proceso de voladura en la explotación de canteras inducen deformaciones y solicitaciones en las estructuras o edificaciones próximas a la fuente de la explosión, generando acciones dinámicas temporales en los elementos constitutivos de la construcción, que podrían causar daños.

En el presente trabajo se expone una metodología de análisis para la evaluación de las acciones y efectos dinámicos originados por las voladuras en una estructura de un puente ubicado en cercanías a la zona de explotación de una cantera.

Se trata de un puente con tablero superior de múltiples vigas pretensadas de 32 metros de luz y calidad de hormigón H-42 (CIRSOC 201, 2005) simplemente apoyadas, mediante apoyos de neopreno armado, sobre estribos de hormigón armado ubicados a ambos lados de un corte del macizo rocoso, a 20 metros de altura del fondo de la excavación, diseñado para la categoría A30 de las Bases para el Cálculo de Puentes de Hormigón Armado de la Dirección Nacional de Vialidad.

En el proyecto se realizaron estudios y análisis sobre la estabilidad del macizo rocoso bajo la consideración de fuerzas inerciales originadas por las voladuras en el lugar de emplazamiento de los estribos del puente. Estas fuerzas se calcularon para un escenario de voladuras controladas, de acuerdo al criterio de USBM, United States Bureau of Mines, (Siskind D.E., Stagg M.S., Kopp J.W. and Dowding C.H., 1980) con velocidades límites dependientes de las frecuencias de la excitación, que da el marco permitido para la preservación de la zona de fundaciones. A partir de dichos estudios se diseñaron anclajes en roca en el sector de fundación de los estribos del puente para asegurar la estabilidad del macizo rocoso y del propio estribo.

Debido a que el nuevo puente a construir se encuentra en las cercanías de la zona de explotación de la cantera, la estructura estará sometida a efectos dinámicos originados por las voladuras durante su vida en servicio, por lo que se programaron y efectuaron evaluaciones estáticas y dinámicas in situ, previa evaluación numérica computacional, a efectos de verificar las condiciones de diseño previstas y originar un punto de referencia inicial para futuros controles. Estas evaluaciones son detalladas en el presente trabajo.

## 2 METODOLOGÍAS DE ANÁLISIS

Se realizó la evaluación estática del puente a través de la Prueba de Carga, siguiendo los procedimientos establecidos en el [Pliego General de Condiciones y Especificaciones Técnicas más Usuales de la DNV, Edición 1998](#), y el análisis dinámico a través de la evaluación de frecuencias y modos naturales de vibración (Peralta, et al, 2008). A continuación se describen las metodologías para ambos casos.

### 2.1 Evaluación Estática

#### 2.1.1 In situ

La estructura evaluada es un puente de un 1 (un) tramo de 32.10 m de longitud, compuesto por cinco 5 (cinco) vigas longitudinales pretensadas de 1.60 m de altura, losa integral de 0.27

m de espesor que incluye la capa de rodamiento, y dos vigas transversales extremas de hormigón armado. Completan el tablero las defensas de hormigón tipo New Jersey y cordones externos de las veredas laterales. En el momento de la realización de la prueba de carga se estaba colocando el cerco metálico de protección peatonal sobre el cordón externo de las veredas. En la Figura 1 se muestra una vista general del puente en estudio.

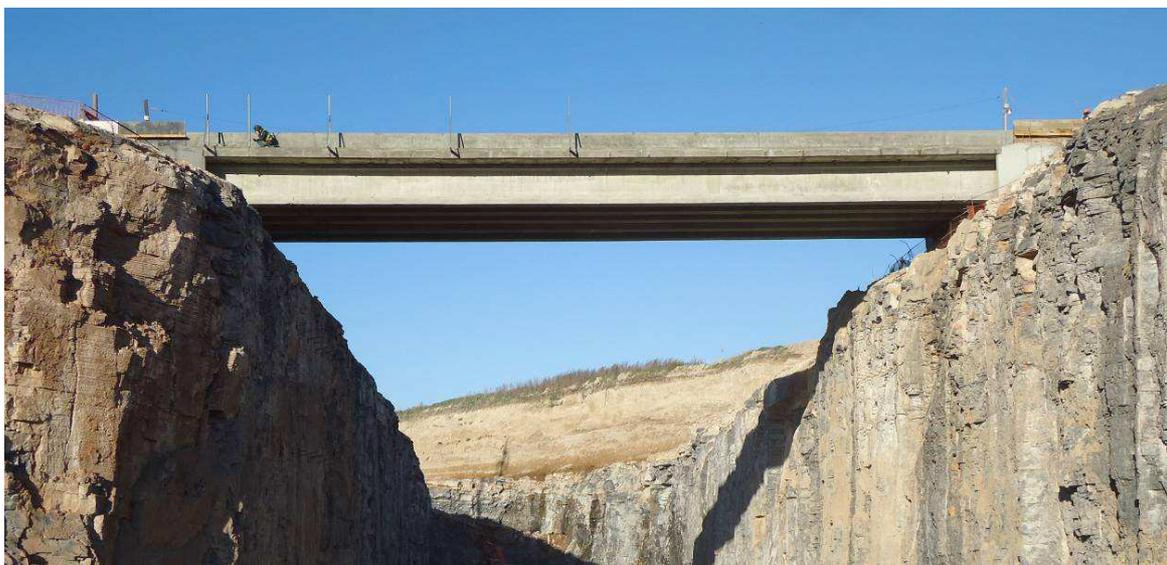


Figura 1: Vista General del Puente evaluado

La Prueba de Carga Estática se realizó mediante la aplicación de vehículos cargados sobre la calzada, cuyas cargas son representativas de las sobrecargas móviles de diseño del puente, siguiendo el Protocolo de Prueba de Carga desarrollado por INGROU, Oficina de Proyectos. El objetivo de la evaluación fue determinar los siguientes aspectos del comportamiento estructural del puente:

- i) La rigidez de la estructura, en función de la máxima flecha medida en la prueba de carga, y su comparación con las previsiones de un modelo numérico del puente.
- ii) La deformación remanente para un ciclo de carga y descarga.
- iii) La capacidad para resistir sin daño las solicitaciones máximas normales de la estructura.

La prueba de carga estática se realizó con cuatro 4 (cuatro) camiones cargados de material granular que fueron pesados en condición sin carga (tara) y con máxima carga (peso total). La tara y el peso total correspondiente a cada uno de los camiones se resumen en la Tabla 1.

Camión	Tara [t]	Peso Total[t]
1	8.62	25.32
2	8.60	24.69
3	12.98	25.10
4	15.22	25.50

Tabla 1: Pesos de los camiones utilizados en la prueba de carga

La medición de desplazamientos o flechas se realizó con dos procedimientos: i) nivelación de

precisión con estación total y prisma, ii) nivelación de precisión con nivel óptico de gran aumento y soporte en forma de trípode con regla milimetrada y burbuja de nivelación. Teniendo en cuenta la precisión de los equipos de medición, se adoptó para el análisis de resultados la nivelación realizada con la estación total.

En las Figuras 2 y 3 se observan imágenes registradas durante la realización de la Prueba de Carga Estática.



Figura 2: Instancia de la Prueba de carga con dos camiones



Figure 3: Instancia de la Prueba de Carga con 4 camiones

A continuación se describen las etapas de carga y descarga en dos escalones:

#### **1er escalón de carga**

Se ubicaron los camiones denominados 1) y 2) con su último eje trasero a 1.50 m del eje central del tablero, del lado Norte del puente, se tomó lectura inmediatamente después de la carga y cada 5 minutos hasta constatar la estabilización de las deformaciones en todos los puntos de medición establecidos.

#### **2do escalón de carga**

Se ubicaron los camiones denominados 3) y 4) con su último eje trasero a 1.50 m del eje central del tablero, del lado Sur del puente, se tomó lectura inmediatamente después de la carga y cada 5 minutos hasta la estabilización de las deformaciones.

### 1ra descarga

Se retiraron los camiones 3) y 4) y se tomó lectura en todos los puntos de medición inmediatamente y cada cinco minutos hasta la estabilización de las deformaciones.

### 2da descarga

Se retiraron los camiones 1) y 2) y se tomó lectura en todos los puntos de medición inmediatamente y cada cinco minutos hasta la estabilización de las deformaciones, y una lectura final a 30 minutos de realizada la segunda descarga para constatar la recuperación de las flechas.

#### 2.1.2 Numérica

Se recalculó la flecha máxima en el centro del tablero, rectificando la indicada en el Protocolo de Prueba de Carga, teniendo en cuenta la carga total efectiva de cada camión, la ubicación de los ejes cargados y la rigidez efectiva del tablero. Para este fin, se realizó un modelo numérico de barras tipo emparillado plano considerando las propiedades geométricas y mecánicas de cada uno de los componentes del tablero. La Figura 4 muestra la imagen del modelo con las cargas de cada camión, representadas mediante la aplicación de cargas concentradas correspondientes a cada uno de los ejes de los cuatro camiones. Las cargas consideradas para cada vehículo son los dos 2 (dos) ejes duales traseros del camión y un 1 (un) eje simple delantero.

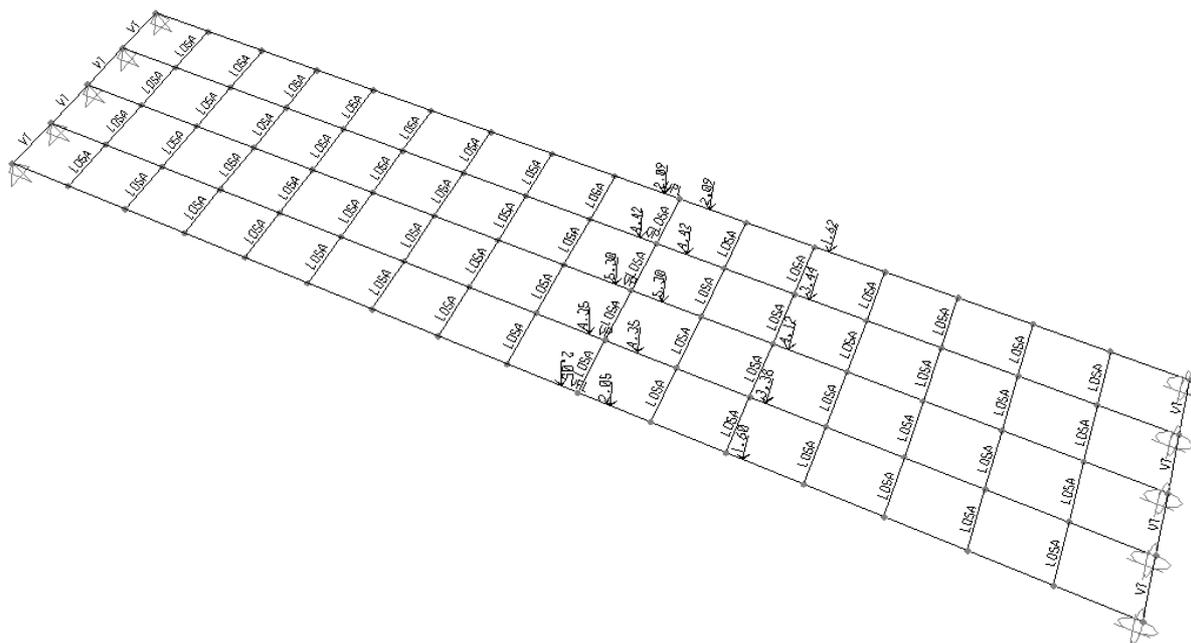


Figura 4: Modelo numérico para evaluación estática

## 2.2 Evaluación Dinámica

### 2.2.1 Numérica

El modelo numérico del tablero del puente para el análisis dinámico coincide con el indicado para el análisis estático, es decir, consiste en un modelo de elementos finitos tipo “vigas” conformado por un entramado plano o “emparrillado” de barras, que representa las dos (2) vigas principales laterales incluyendo la vereda, cordón externo y defensa vehicular, las (3) vigas principales centrales, la losa del tablero y las vigas transversales. En el modelo numérico se representan las propiedades de los elementos estructurales de hormigón armado y

pretensado, teniendo en cuenta la homegeinización de la sección mediante la transformación del acero en hormigón. Asimismo, se representaron mediante resortes elásticos los aparatos de apoyo de neopreno.

En la Figura 5 se presenta el modelo numérico del tablero del puente.

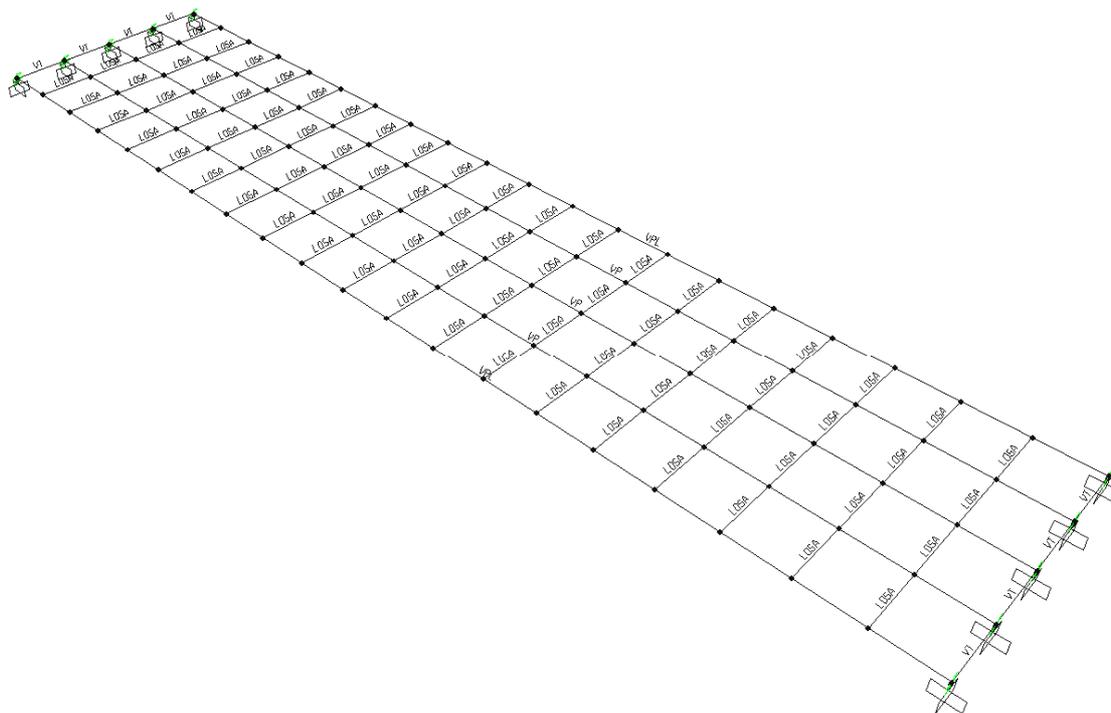


Figura 5: Modelo numérico del tablero del puente para evaluación dinámica

Una vez adoptado el modelo numérico respetando la geometría y materiales según Proyecto, se calibró el modelo para la carga estática aplicada y deformaciones medidas durante la ejecución de la Prueba de Carga del Puente, utilizando como variable el módulo de elasticidad estático del hormigón, cuyos resultados se reflejan en el Informe Final de Prueba de Carga Estática.

Este modelo calibrado denominado “Modelo estático del tablero” del puente, fue ajustado nuevamente teniendo en cuenta que el módulo de elasticidad dinámico del hormigón es mayor que el obtenido para cargas estáticas, aumentándose en un 10 % el módulo de elasticidad del hormigón. Este último modelo numérico es el denominado “Modelo dinámico del tablero” y es el que se utiliza para la determinación de los modos y frecuencias naturales de vibración de la estructura.

El análisis dinámico del tablero del puente se realizó mediante la evaluación de los modos naturales de vibración, características propias de la estructura que involucran la rigidez, el amortiguamiento y la masa. Los modos naturales de vibración tienen directa relación con la respuesta de la estructura frente a cargas dinámicas y al mismo tiempo, los valores de las frecuencias naturales de vibración por su relación directa con la rigidez de la estructura, podrán ser utilizadas, mediante evaluación experimental, en el futuro para el control del comportamiento en servicio del puente (Clough y Penzien, 1993).

### 2.2.2 In situ

Se registraron los espectros de vibración según la instrumentación mediante la colocación de sensores según se indica en Figura 6. En el eje transversal central y centro del tablero (Sensor 1V), en el mismo eje y sobre el lateral del tablero (Sensor 4V), en el cuarto del tablero (Sensor 2V) y un sensor colocado en forma horizontal en el centro del tablero sobre la defensa de hormigón (3T). Asimismo, se efectuaron registros en el tablero en el momento de efectuar una voladura.



Figura 6: Ubicación de los sensores para la evaluación dinámica

## 3 RESULTADOS OBTENIDOS

### 3.1 Evaluación Estática

De acuerdo a los modelos numéricos, la flecha máxima se produce en el centro de la luz del eje central del tablero.

En la Tabla 2 se resumen las flechas calculadas en cada etapa de carga para los puntos de control topográfico ubicados al cuarto y centro del tablero. En Figura 7 se aprecia la deformada del tablero.

	Flecha máxima medida	Flecha máxima calculada
1er. Escalón de Carga (2 Camiones)	4.0 mm	4.6 mm
2do. Escalón de carga (4 camiones)	8.0 mm	9.1 mm

Tabla 2. Cálculo de flechas máximas medidas y calculadas en el centro del tablero

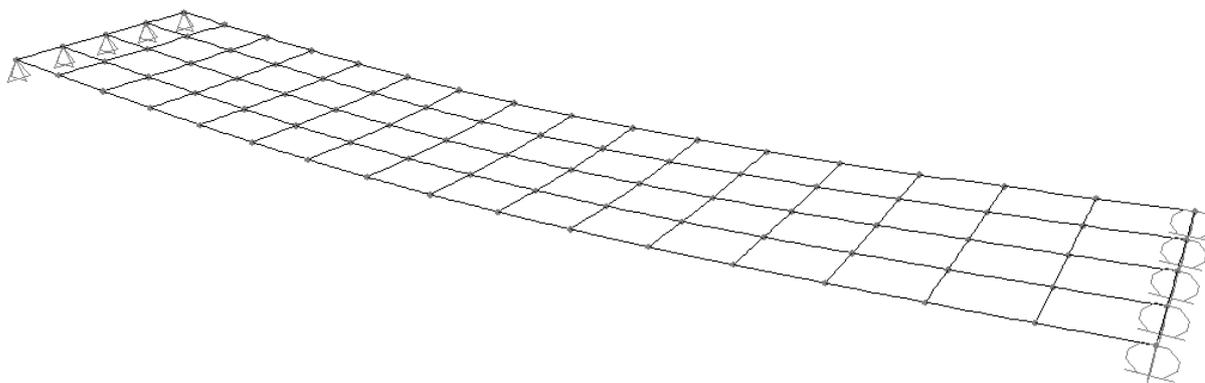


Figura 7: Evaluación estática-Deformada del tablero

### 3.2 Evaluación Dinámica

Se determinaron numéricamente los primeros 20 (veinte) modos naturales de vibración de la estructura del tablero del puente, y en la Tabla 3 se presenta el resumen de los períodos y frecuencias naturales de esos modos de vibración.

Modo	Denominación del Modo Natural	Período (seg)	Frecuencia (Hz)
1	Traslación Horizontal Transversal	0.616	1.62
2	Traslación Horizontal Longitudinal	0.609	1.64
3	Rotación Horizontal	0.363	2.75
<b>4</b>	<b>1er Flexión Vertical Longitudinal</b>	<b>0.243</b>	<b>4.12</b>
<b>5</b>	<b>1er. Torsión Transversal</b>	<b>0.225</b>	<b>4.45</b>
6	1er Flexión Transversal	0.084	11.90
7	2do. Torsión Transversal	0.064	15.64
8	2do. Flexión Vertical Longitudinal	0.063	15.78
9	1er Flexión Horizontal Longitudinal	0.048	20.77
10	2do. Flexión Transversal	0.047	21.11
11	2do Flexión Horizontal Longitudinal	0.032	30.99
12	3ro. Flexión Transversal	0.032	31.30
13	3ro. Torsión Transversal	0.031	32.69
14	3ro. Flexión Vertical Longitudinal	0.030	33.12
15	4to. Flexión Transversal	0.027	37.20
16	5to. Flexión Transversal	0.025	39.05
17	1ro. Torsión Horizontal	0.021	46.04
18	3ro. Flexión Horizontal Longitudinal	0.021	46.20
19	6to. Flexión Transversal	0.019	51.66
20	4to. Torsión Transversal	0.018	53.51

Tabla 3. Modos, Períodos y Frecuencias Naturales de Vibración

Seguidamente se indican las mediciones in situ. En el Figura 8 se muestra el espectro de frecuencias determinado con el sensor 1V, y se observa que además de la frecuencia de 9.5 Hz, aparece un pico de frecuencia en 4.1 Hz. En función de los datos obtenidos con el modelo numérico, estas frecuencias corresponderían al primer modo de flexión vertical (4.1 Hz) y al primer modo de flexión transversal (9.5 Hz), ambos modos consistentes con la ubicación del sensor.

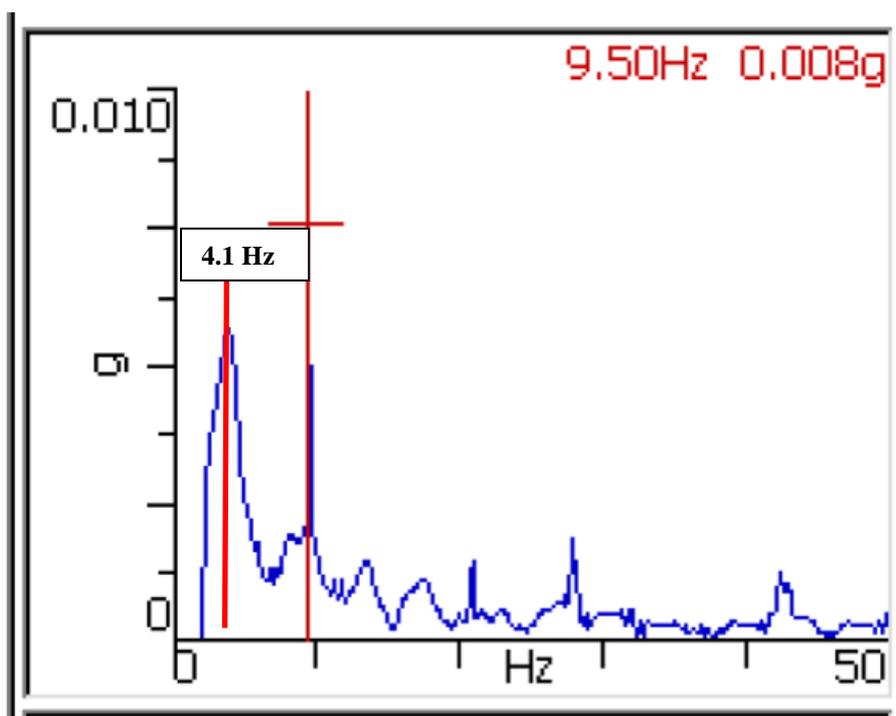


Figura 8: Espectro de frecuencia del sensor 1V

En el Figura 9 se indica el espectro de frecuencias determinado con el sensor 4V, y se observa que además de la frecuencia de 17.8 Hz, aparecen picos de frecuencia en 4.1, 9.5, y 15.7 Hz. En función de los datos obtenidos con el modelo numérico, estas frecuencias corresponderían al primer modo de flexión vertical (4.1 Hz), al primer modo de flexión transversal (9.5 Hz), al segundo modo de flexión vertical (15.7 Hz) y al 3er modo de flexión vertical (33.7 Hz), todos estos modos consistentes con la ubicación del sensor en el cuarto y centro del tablero.

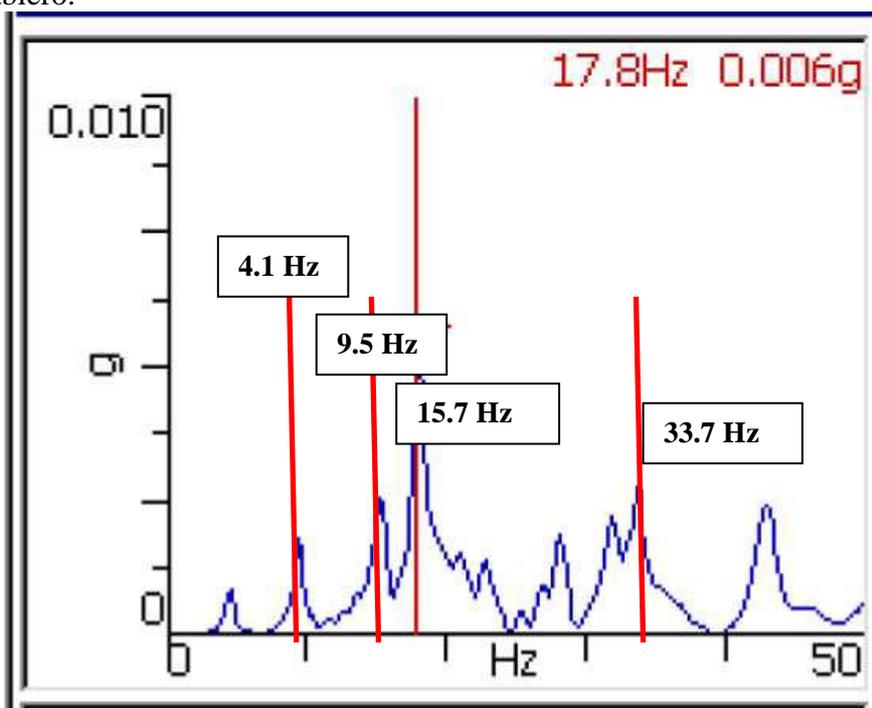


Figura 9: Espectro de frecuencia del sensor 4V

Con respecto a las frecuencias captadas por el sensor 2V, se registraron los valores de 4.5 Hz, 17 Hz y 36.8 Hz. En función de los resultados del modelo numérico se pueden relacionar estas frecuencias con el primer, segundo y tercer modo de torsión transversal, consistente con la ubicación del sensor.

En Figura 10 se muestra la medición efectuada en la base del puente en el momento de efectuar una voladura controlada. Puede observarse que los valores de velocidades se encuentran dentro de los límites establecidos (gráfico de la derecha) por los criterios establecido por USBM y adoptados en el presente trabajo, para el rango de frecuencias medidos.

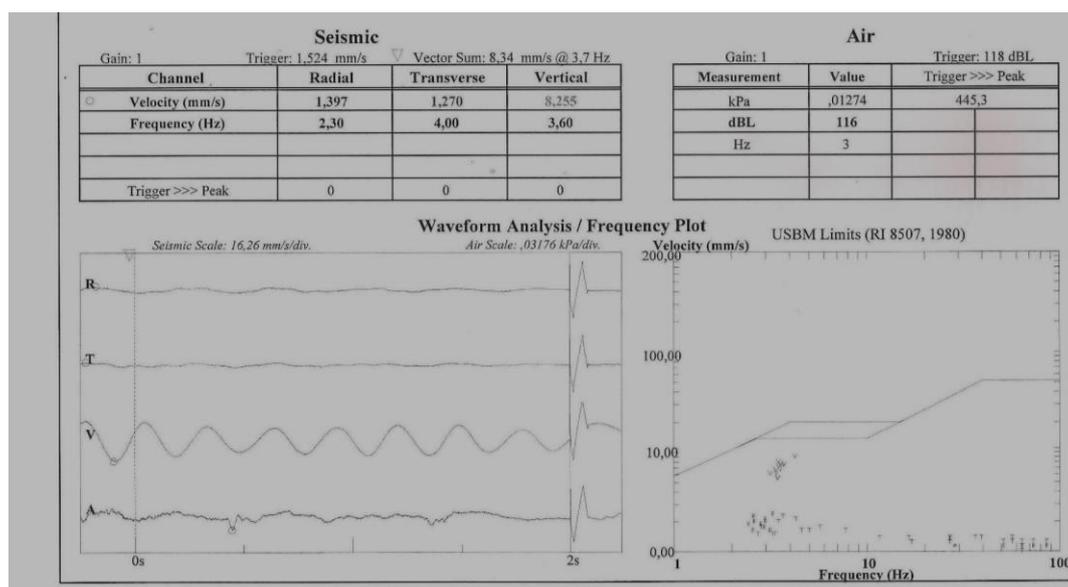


Figura 10: Espectro de frecuencia del sensor 4V

## 4 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

### 4.1 De la Evaluación Estática

Las flechas medidas y calculadas se resumen en la Tabla 2, donde se observa que las diferencias entre flechas máximas medidas y calculadas son inferiores al 12 %, y teniendo en cuenta que la precisión del instrumento y de la toma de datos se puede establecer en +/- 1 mm, los valores de flecha registrados en obra resultan admisibles para puentes de hormigón de una edad inferior a 6 meses de construido, por lo que se consideran satisfactorios los resultados de la prueba de carga estática.

Del análisis de los resultados de flecha calculados y medidos se concluye que, en todas las etapas de carga y descarga existe una buena correlación entre las flechas calculadas y medidas, y además se observa que existe linealidad entre los dos escalones de carga y descarga, demostrando que la estructura se comporta elásticamente.

A partir de las mediciones realizadas, se constató en todos los casos que después de retirar las cargas del tablero se recuperaron en su totalidad las flechas producidas por las cargas, hecho que confirma que la estructura del tablero presenta un comportamiento esencialmente elástico.

## 4.2 De la Evaluación Dinámica

Del análisis comparativo realizado entre las evaluaciones efectuadas in situ y numéricas, se puede concluir que el procedimiento y registros dinámicos realizados son consistentes y reflejan en forma clara las frecuencias fundamentales de vibración del tablero.

Por otro lado es de destacar que las velocidades de vibración de la estructura debido a voladuras efectuadas en la zona se encuentran dentro de los límites admisibles por el criterio adoptado de USBM.

## 5 CONSIDERACIONES FINALES

De los resultados de la Prueba de Carga Estática se concluye que el puente evaluado responde en un todo de acuerdo a lo esperable en función de sus dimensiones, características de los materiales y proceso constructivo. El comportamiento estructural durante las pruebas estáticas resultó satisfactorio. Las deformaciones se estabilizaron en el tiempo, se recuperaron las al descargar el puente y no se observó ningún patrón de fisuración o daño en el tablero y estribos como consecuencia de las cargas aplicadas.

La determinación analítica de los modos y frecuencias naturales de vibración del tablero del puente permitió relacionar las frecuencias y modos de vibración con los registros de frecuencias captados con los sistemas de medición implementados en obra.

A efectos de garantizar los límites fijados de velocidades pico para los distintos rangos de frecuencias durante la realización de las voladuras es importante el cumplimiento del criterio de USBM ya que las consideraciones de estabilidad tanto del puente como del macizo de fundación fueron asumidas en el contexto de cumplimiento de dicho criterio. Para ello es determinante el control de las voladuras.

## REFERENCIAS

- Clough, R. W. and Penzien, J. *Dynamics of Structures*. Second Edition, McGraw-Hill, Inc. 1993.
- Dirección Nacional de Vialidad, *Bases para el Cálculo de Puentes de Hormigón Armado*, 1952.
- Dirección Nacional de Vialidad, *Pliego General de Condiciones y Especificaciones Técnicas más Usuales*, Edición 1998.
- INTI-CIRSOC, *CIRSOC 201*, 2005
- Peralta, M., Ercoli, N., Pico, L., Bacchiarello, R., La Malfa, S., Correa, L., *Análisis Numérico y Experimental de Vibraciones para la Evaluación del Comportamiento de un Puente*. Mecánica Computacional, Vol. XXVII, pp. 2033-2052. 2008.
- Siskind D.E., Stagg M.S., Kopp J.W. and Dowding C.H. Structure Response and Damage Produced by Ground Vibration From Surface Mine Blasting, *United States Department Bureau of Mines* TN23.U43 TA654-7 622s(690'-21) 80-607825, 1980.
- Zienkiewicz, O.C., and Taylor, R.L., *The finite element method*, volume II. McGraw Hill, 1991.